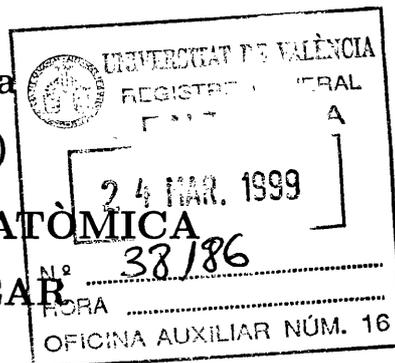


Físicas
T.D.
357

Universitat de València
(ESTUDI GENERAL)

DEPARTAMENT DE FÍSICA ATÒMICA
MOLECULAR I NUCLEAR



Físicas
T.D.
357

UNIVERSITAT DE VALÈNCIA

**ESTUDIO Y TEST DE DETECTORES DE SILICIO
PARA LA RECONSTRUCCIÓN DE TRAZAS
EN LA ZONA DE BAJO ÁNGULO DEL
DETECTOR DE ATLAS DE LHC
DEL CERN**



UNIVERSITAT DE VALÈNCIA
TESIS DE DOCTORADO
FRANCISCO JAVIER ALBIOL
COLOMER
1999

UMI Number: U607748

All rights reserved

INFORMATION TO ALL USERS

The quality of this reproduction is dependent upon the quality of the copy submitted.

In the unlikely event that the author did not send a complete manuscript and there are missing pages, these will be noted. Also, if material had to be removed, a note will indicate the deletion.



UMI U607748

Published by ProQuest LLC 2014. Copyright in the Dissertation held by the Author.
Microform Edition © ProQuest LLC.

All rights reserved. This work is protected against
unauthorized copying under Title 17, United States Code.



ProQuest LLC
789 East Eisenhower Parkway
P.O. Box 1346
Ann Arbor, MI 48106-1346

UNIVERSITAT DE VALÈNCIA

FACULTAD DE CIÈNCIES FÍSQUES

Reunit el Tribunal que subscriu, en el dia de la data,
acorda d'atorgar, per unanimitat, a aquesta Tesi Doctoral
d'En/ Na/ N' FRANCISCO JAVIER AUBIOL
la qualificació d' SOBRE SALIENTE CUM LAUDE

València a 28 d' MAIG de 1999

El Secretari,

Guis Jover

El President,

Jurubenech



FÍSICAS

UNIVERSITAT DE VALÈNCIA
BIBLIOTECA CIÈNCIES
Nº Registre <u>13.891</u>
DATA <u>14.9.1999</u>
SIGNATURA T. D. 351
Nº LIBIS: <u>i20044057</u>

D. JUAN ANTONIO FUSTER VERDÚ, Científico Titular del C.S.I.C.,

CERTIFICA :

Que la presente memoria ESTUDIO Y TEST DE DETECTORES DE SILICIO PARA LA RECONSTRUCCIÓN DE TRAZAS EN LA ZONA DE BAJO ÁNGULO DEL DETECTOR DE ATLAS DE LHC DEL CERN ha sido realizada bajo mi dirección en el Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear de la Universitat de València por D. Francisco Javier Albiol Colomer y constituye su tesis de doctorado para optar al grado de Doctor en Ciencias Físicas por dicha Universidad.

Y para que conste, en cumplimiento de la legislación vigente, firmo el presente Certificado en Burjassot a 13 de Marzo de 1999.



Juan Antonio Fuster Verdú



A Bea



Agradecimientos.

En primer lugar, me gustaria agradecer a Juan Fuster porque con esta tesis aparte de aprender nos hemos divertido. Durante este tiempo hemos compartido ideas y sobre todo una ilusión que parece haber cuajado.

Muy especialmente a D. Antonio Ferrer, con él empecé en ATLAS, y durante todo este tiempo siempre he contado con su apoyo, y ha estado dispuesto a escucharme.

A Paul Booth que me acogió como a uno más, a Phill Allport, Tim Jones, Tony Smith de quienes he aprendido tanto.

A Carmen García, Eduardo Ros y Pepe Salt. Ellos también hicieron posible esta idea.

A Paqui, Tere, Ana, Asun, Enrique, siempre atentos a solucionar mis problemas con los papeles.

A toda la gente con la que he compartido buenos y malos momentos, José Angel, Carlos, Carla, Salva, Silvia, Antonio, Nati, Fernando, Susana, Reyes, Inés, Santi, Toni, Paco, Emiliano, Farida, Juamba...

A Eduardo y Mara, amigos desde siempre y para siempre.

No me puedo olvidar de Jorge amigo eterno, Laura, Luis, Ascen, Rocío y Sergio amigos sinceros durante toda la carrera.

A Rosario, Pablo, Luis, Marcell y Ulrich, que se han incorporado recientemente para mejorar el laboratorio.

A mis Padres, a Toto que le animo a que siga aprendiendo, a Antonio, a José y Beatriz. A Inma, Carmen y Alvarito: una Paella Albiol, requiere esta compañía.

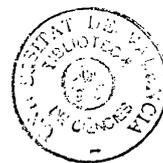
A Julio que ha sabido tener paciencia esperando a que esto terminase, el ha soportado estoicamente una parte importante de este trabajo.

A Bea, por su cariño, paciencia y fuerza de voluntad, y su especial calor en todo momento.

A Pepe, Rosa y a Paco aprendimos juntos pasamos buenos momentos, y siempre han sido muy buenos camaradas y compañeros.

A Javier, admiro su tesón y profesionalidad, siempre en sintonía. Y a Alfredo su capacidad de trabajo y sobre todo buenas formas. Las cosas son mucho más sencillas rodeado de gente excelente.

Por último, dar ánimos para continuar a María José, que siga aprendiendo y divirtiéndose con esta pequeña locura. Le deseo mucha suerte a partir de ahora, que se encamina a trabajar en la tesis, ya sabes: todo pasa y todo queda.



Índice General

Agradecimientos	i
Índice General	iii
Prefacio	1
1 Introducción	3
1.1 El proyecto LHC.	5
1.2 El colisionador LHC.	7
1.3 El experimento ATLAS.	8
1.3.1 Las cámaras de muones.	11
1.3.2 El sistema de calorímetros.	12
1.3.3 El detector interno.	17
1.3.4 El sistema de trigger y DAQ.	22
1.3.5 Medidas de la luminosidad.	23
2 Detectores de Silicio.	25
2.1 Introducción histórica.	25
2.2 Definiciones generales.	25
2.3 Unión P-N en silicio.	28
2.3.1 Propiedades generales de los semiconductores.	28
2.3.2 Unión PN.	30
2.4 Detectores de trazas.	33
2.4.1 Detectores de silicio de acoplo directo.	34
2.4.2 Resolución espacial.	34
2.4.3 Factores externos.	37
2.4.4 Detectores de silicio de acoplo alterno.	39
2.5 Nuevas tecnologías.	41
2.5.1 Detectores de doble cara y detectores N^+N .	42
2.5.2 Detectores de anchura variable.	43
2.5.3 Detectores de <i>pixel</i> .	44
2.5.4 Detectores de lectura binaria.	45
2.6 Caracterización de detectores de silicio.	46
2.7 Electrónica de lectura.	46
3 Test de los detectores en haz.	49
3.1 La zona experimental de SPS.	49
3.2 La zona experimental de H8.	50
3.3 Descripción del offline.	52

3.3.1	Telescopios.	52
3.3.2	Detectores analógicos.	54
3.3.3	Detectores binarios.	55
4	Tecnología de silicio en la parte forward.	57
4.1	Detectores de Micro Strip Gas Chamber.	57
4.2	Detectores de silicio.	59
4.3	Geometría del detector.	61
4.3.1	Caracterización del módulo.	62
4.4	La electrónica de lectura.	63
4.4.1	Diseño del chip.	63
4.4.2	Preamplificador y <i>shaper</i>	64
4.4.3	Buffer de retraso.	65
4.4.4	Amplificador de lectura.	66
4.4.5	Multiplexor de salida.	66
4.4.6	Prestaciones del chip.	67
4.5	Módulo en el <i>test-beam</i>	68
4.5.1	Mejora de la señal/ruido.	69
4.5.2	Eficiencia y ruido del detector.	70
4.5.3	Estudios de resolución.	72
4.6	Conclusiones.	74
5	Elección de la electrónica de lectura.	77
5.1	Electrónica binaria.	78
5.2	Dispositivo experimental.	78
5.3	Análisis de resultados.	80
5.3.1	Respuesta del detector con el voltaje de depleción.	82
5.3.2	Efectos de campo magnético y rotación.	83
5.3.3	Respuesta a la tasa nominal de LHC.	85
5.4	Conclusiones.	85
6	Laboratorio de Valencia.	87
6.1	Zona de caracterización.	87
6.1.1	Estación de pruebas.	88
6.1.2	Fuentes de medida.	89
6.1.3	Analizador de componentes.	90
6.1.4	Sistema de adquisición.	92
6.2	Área de electrónica.	92
6.2.1	Área de microsoldadura.	94
6.2.2	Conclusiones.	95
7	Construcción de un módulo binario.	97
7.1	Descripción de los componentes.	97
7.2	Test de componentes.	98
7.2.1	Medidas estáticas.	100
7.2.2	Medidas en frecuencia.	101
7.2.3	Calibración de la electrónica.	102
7.2.4	Puesta a punto del sistema de microsoldadura.	104
7.3	Ensamblado de componentes.	106
7.4	Conclusiones.	109

8 Test en haz del módulo.	111
8.1 Descripción del test-beam.	111
8.1.1 Descripción de la electrónica.	113
8.2 Resolución temporal.	114
8.3 Respuesta del detector.	115
8.4 Resolución espacial.	118
8.5 Conclusiones.	119
 Índice de Tablas	 123
 Índice de Figuras	 125

Prefacio

Tras la construcción de LEP¹ en el CERN², se ha comprobado la validez del denominado **Modelo Estándar** refinando y mejorando las medidas de parámetros relacionados con la teoría electrodébil.

El descubrimiento del último quark por descubrir, el top en Tevatrón³, no ha hecho más que validar el conocimiento actual sobre los constituyentes de la materia.

Existen sin embargo, numerosas cuestiones por resolver. A pesar de conocerse que el **Modelo Estándar** no es una teoría completa, ni los experimentos de LEP ni los de Tevatrón han conseguido hasta ahora pruebas o evidencias de nuevas partículas o procesos que den un sentido final al **Modelo Estándar**.

La búsqueda de estas evidencias, impone un límite mayor a las energías que actualmente se están utilizando en los colisionadores. Por otra parte la baja sección eficaz de generación que involucrarían estos nuevos procesos, requiere el uso de luminosidades sin precedentes en colisionadores de partículas.

Para dar respuesta a todas estas cuestiones es necesario el empleo de una nueva máquina, el colisionador LHC⁴ que será puesto en marcha a mediados de la primera década del 2000. Esta nueva máquina contará con enormes detectores de propósito general (ATLAS y CMS) destinados a realizar medidas, y que contarán con los últimos avances en técnicas de detección y adquisición de datos.

En 1996, cuando se aprobó definitivamente el proyecto LHC, y los detectores de propósito general, se produjeron restricciones generales respecto a las descripciones técnicas iniciales. Al no poder contar con el presupuesto requerido, se hacía necesario reducir costes, sin que las prestaciones planteadas inicialmente produjeran impacto en los objetivos físicos. Así por ejemplo a LHC se le redujo la energía en centro de masas de 16 TeV a 14 TeV, y se propuso a los distintos detectores que reexaminaran sus diseños para poder reducir precios.

Durante el año 1995 se iniciaron en Valencia los trabajos para la participar en el detector interno de ATLAS. Durante este periodo inicial se colaboró estrechamente con la Universidad de Liverpool, y se trabajó con este grupo colaborando en tareas de análisis de datos.

Durante el año 1996 se inició así mismo la construcción en Valencia del laboratorio de detectores de trazas basados en semiconductores, adquiriendo y poniendo a punto equipo y material, para poder participar en la construcción de detectores de silicio. Asimismo se empezó a colaborar activamente con el proyecto ATLAS, principalmente en análisis de resultados de módulos detectores de la colaboración a través de test-beams. Estos resultados estaban orientados a optimizar y concluir el diseño del detector interno de silicio de ATLAS, con las directivas de presupuesto mencionadas anteriormente.

¹Large Electron Positron, colisionador electrón positrón del CERN con 200 GeV de energía máxima en centro de masas.

²European Laboratory for Particle Physics.

³Colisionador protón antiprotón de Fermilab con 2 TeV de energía máxima en centro de masas.

⁴Large Hadron Collider

Durante 1997 se construyó un módulo íntegramente en Valencia, y se puso en un test-beam. El objetivo era comprobar la capacidad del grupo para poder participar en la construcción de módulos de ATLAS, y sobre todo ganar experiencia en las técnicas relacionadas con los detectores de silicio.

Esta tesis se enmarca dentro de esta fase de adecuación y desarrollo del laboratorio de silicio, así como del trabajo de *I+D* destinado a mantener las prestaciones del detector interno de ATLAS, tras aplicar una reducción del presupuesto inicial.

- El primer capítulo de esta tesis cuenta cuales son los propósitos de ATLAS y las características más destacables de éste detector.
- El capítulo segundo se centra en el funcionamiento de los detectores de silicio así como los parámetros más relevantes en cuanto a su funcionamiento y diseño.
- El capítulo tercero, describe cuales son las características de las zonas experimentales habilitadas en el CERN, para el análisis en haz de detectores de silicio.
- Los capítulos cuarto y quinto exponen los sucesivos test de detectores en haz realizados durante ésta tesis, con objeto de mejorar y fijar un diseño en el detector SCT de ATLAS.
- El capítulo sexto describe las características de laboratorio montado en Valencia.
- El capítulo séptimo explica la construcción y test en laboratorio del primer módulo de Valencia (VAL1) construido en el marco de la colaboración ATLAS.
- Por último el capítulo octavo muestra los resultados obtenidos con dicho módulo en test análogos a los realizados con módulos de otros laboratorios tales como los que se exponen en los capítulos cuarto y quinto.

Capítulo 1

Introducción

La Física de Altas Energías tiene como objetivo el estudio de las interacciones de los constituyentes elementales de la materia. Si bien durante el principio de siglo, se dedicó al estudio y clasificación de las partículas, es en las últimas décadas donde se ha profundizado y realizado un notable progreso en el conocimiento de la dinámica responsable de las interacciones entre las partículas. Este avance se ha conseguido gracias a los avances tanto en técnicas de aceleración, que han permitido cada vez alcanzar energías y luminosidades mayores, como en técnicas de detección.

Las propiedades medidas de las partículas se explican a través del Modelo Estándar. Esta teoría se construye a partir de tres familias de leptones y tres familias de quarks que son los constituyentes de la materia. Las interacciones entre éstos se describen a través de una teoría cuántica de campos cuya dinámica está descrita por un lagrangiano invariante bajo transformaciones *gauge*. El grupo de simetrías que describe estas transformaciones es conocido como $SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$.

Asociado a la invariancia *gauge* se introducen los bosones intermediarios, que transportan las distintas cargas de la teoría (de color, débil y electromagnética), y son responsables de las interacciones mediante su acoplo a los fermiones fundamentales.

La invariancia bajo $SU(3)_C$ genera la interacción fuerte, descrita por la Cromodinámica Cuántica. Es la responsable de las fuerzas nucleares. Está mediada por ocho gluones distintos de masa nula, que transportan la *carga de color*. Los leptones no se acoplan mediante esta interacción.

El grupo $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$ es el responsable de la interacción electrodébil para leptones y quarks. Los bosones intermediarios en este caso son cuatro: W^+, W^-, Z^0 , mediadores de masivos de la interacción débil que por ejemplo es responsable de la desintegración beta, y el fotón γ sin masa, mediador de la interacción electromagnética.

Para poder dotar de masa a los bosones W^\pm y Z^0 , es necesario introducir el mecanismo del *Higgs*, que lleva consigo la predicción de una partícula aún no descubierta [1–4].

Los leptones se agrupan en tres familias (sabores), e, μ y τ de la siguiente forma:

$$\begin{array}{ccc} \begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L & \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L & \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L \\ e_R & \mu_R & \tau_R \end{array}$$

donde el subíndice L hace referencia a *left handed*, transformándose como dobletes bajo $SU(2)$ y R a *right handed* que se transforma como singlete en dicho grupo. No existen neutrinos (ν) *right handed* en el Modelo Estándar, lo cual está asociado a suponerles masa nula.

Análogamente las familias de quarks son:

$$\begin{array}{ccc} \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L & \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L & \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L \\ (u)_R & (d)_R & (c)_R & (s)_R & (t)_R & (b)_R \end{array}$$

La interacción fuerte descrita por el grupo $SU(3)_C$ conserva el sabor de las familias de quarks si bien no existe conservación de sabor a través de la desintegración electrodébil. Existe pues una mezcla entre los estados de masa, descrita por la matriz de Cabbibo Kobayashi Maskawa (CKM) [5–7]. Asociada a esta cuestión está la violación de la simetría CP en el sector de quarks

Uno de los mayores éxitos del Modelo Estándar fue la predicción de la existencia de los bosones vectoriales masivos W^\pm y Z^0 , confirmada con su observación directa en el colisionador protón-antiprotón SppS del CERN, en 1983 [8].

LEP, el mayor colisionador de electrones situado en el CERN, se ha dedicado posteriormente a la medida precisa de la masa del Z^0 y la explotación del Modelo Estándar a $\sqrt{s} = M_{Z^0}$ en una primera etapa, y desde 1996, con una energía en centro de masas entre 130 y 187 GeV se ha dedicado a la producción de pares W^\pm y búsqueda de nueva física. Entre los éxitos de LEP están las medidas del número de familias de neutrinos, test de parámetros del Modelo Estándar, medidas precisas de QCD, y un gran número de cotas a la existencia de nueva física.

Una de las mejoras técnicas que más ha contribuido a la identificación de sucesos, e incremento de prestaciones dentro del programa LEP ha sido la inclusión de detectores de vértices con semiconductores. Éstos proporcionan resoluciones de decenas de micras a pocos centímetros del Punto de Interacción (PI). La simple inclusión de estos detectores ha permitido aumentar prestaciones en la identificación de sucesos, y conseguir medidas con una precisión mucho mejor que las precisiones planteadas al inicio del programa LEP.

En 1994 en Tevatrón (colisionador protón-antiprotón), con una energía en centro de masas de 1.8 TeV, se consiguió la primera evidencia del último quark por descubrir dentro del Modelo Estándar, el quark top, con una masa alrededor de 174 GeV [9]. De nuevo ha sido fundamental contar con detectores basados en semiconductores de alta resolución y situados cerca del PI, para poder realizar dicho descubrimiento.

Sin embargo, aún a pesar de los éxitos logrados en la descripción precisa de la interacción de la materia, el Modelo Estándar deja cuestiones sin resolver y no puede considerarse como una descripción completa de las fuerzas fundamentales. No explica por que existe el patrón de masas de los distintos constituyentes, por qué los fermiones se replican en familias idénticas, no describe si las masas son las únicas diferencias entre familias, cual es el origen de la estructura de sabor del Modelo Estándar, ni la dinámica responsable de los procesos de la violación de la simetría CP, etcétera [10–23].

Para obtener respuestas a parte de estas preguntas fundamentales en el conocimiento de la materia, se requiere cambiar la escala de energía actual del orden de los 100 GeV al TeV. LEP no es capaz de abarcar este rango de Energías, y debido a problemas de pérdida de energía por radiación no es capaz de incrementar mucho más su energía. Tevatrón a pesar de contar 2 TeV de energía, es un colisionador protón-antiprotón, que son partículas con estructura, y por tanto en la colisión sólo está disponible una fracción de dicha energía.

La energía en centro de masas de LHC de alrededor de 14 TeV permitirá estudiar nuevos elementos que confirmen o hagan cambiar el Modelo Estándar tal como lo conocemos, en particular permitirá explorar la existencia del Higgs en un rango de energías entre 100 GeV y 1 TeV [3, 24–27].

$H \rightarrow b\bar{b}$ de WH, ZH y $t\bar{t}H$
usando una firma ℓ^\pm e identificación de b,
rango de masas $80 < m_H < 100$ GeV;

$H \rightarrow \gamma\gamma$ Rango de masas $90 < m_H < 150$ GeV;

$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell^\pm$

rango de masas $130 \text{ GeV} < m_H < 2m_Z$;

$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell^\pm, 2\ell^\pm 2\nu$

rango de masas $m_H > 2m_Z$;

$H \rightarrow WW, ZZ \rightarrow \ell^\pm \nu$ 2 jets, $2\ell^\pm$ 2 jets

de la fusión WW, ZZ usando identificación de jets a bajo ángulo para m_H por encima de 1 TeV.

1.1 El proyecto LHC.

En 1984 el CERN en coordinación con el ECFA ¹ propuso en el Workshop de Laussane, antes de que el túnel de LEP estuviera acabado las primeras ideas acerca de la construcción de un colisionador protón-protón en dicho túnel, una vez el programa LEP hubiese terminado.

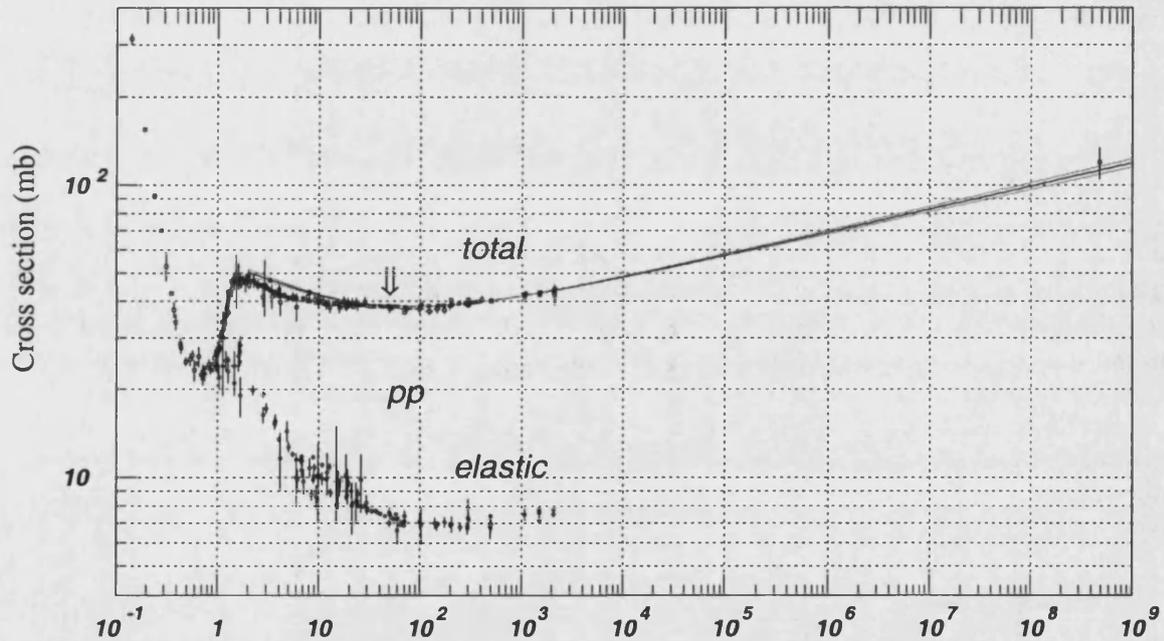


Figura 1.1: Sección eficaz total y elástica protón-protón a varias energías. Extrapolando a las energías de LHC se espera una sección eficaz total alrededor de 100 mb. Las medidas a las energías de LHC se han realizado con experimentos de rayos cósmicos.

En aquel momento los criterios que se establecieron eran la búsqueda de nuevas partículas: la búsqueda del top (que se ha descubierto recientemente [9]) y de los bosones de Higgs, de los que hasta ahora de sólo tenemos evidencias teóricas. Otro objetivo fué el estudio en alta luminosidad de física del B, principalmente violación CP y la medida de los tres ángulos interiores de la matriz de CKM.

Durante este tiempo se fijaron cuales son los parámetros que deberían poder obtenerse con dicho colisionador (luminosidad y energía) que se establecieron en $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y una energía en centro de masas de 16 TeV. Dentro de este acelerador se planteó la posibilidad de realizar

¹ECFA: European Comitee for Future Acellerators

colisiones electrón-protón utilizando LEP y con las mismas instalaciones de LHC poder realizar física de iones pesados (Pb-Pb o Pb-protón) con energías en centro de masas de 1200 TeV. Es decir una máquina con un sistema binario: LEP/LHC que además permitiese el estudio de colisiones con núcleos pesados a muy alta energía.

Con las ideas acerca de la futura máquina puestas en marcha, fué entonces cuando se empezó a hablar del esfuerzo que se debe realizar en *I+D* en detectores para cubrir los retos de un colisionador protón-protón de alta luminosidad. Estos problemas se trataron en un Workshop en Barcelona en 1989, [28, 29] donde se reflejaron los intereses de física que deben cumplir los detectores. En 1990 en Aachen [30] se mostraron los elementos y tecnologías más prometedoras capaces de responder las especificaciones requeridas. En 1991 tanto el CERN como EFCA presentaron de manera firme el proyecto LHC.

ATLAS Barrel Inner Detector

$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow e^+e^-e^+e^- \quad (m_H = 130 \text{ GeV})$$

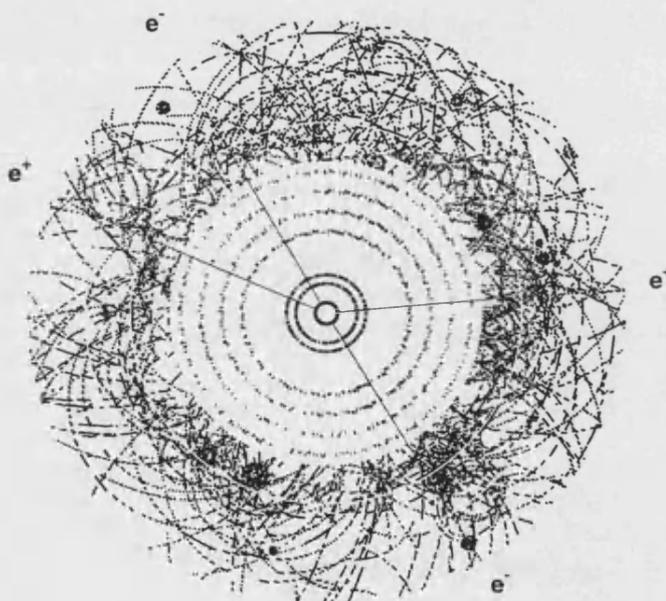


Figura 1.2: Suceso Higgs decayendo a 4 leptones (electrones). A pesar de la elevada multiplicidad del suceso es posible reconstruirlo aplicando cortes fuertes de momento transversal (momento mayor de 4 GeV).

Con una luminosidad de $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, un cruce de haces cada 25 ns y una sección eficaz del orden de los 100 mb [31, 32] (Fig. 1.1), se espera obtener alrededor de 20 colisiones por cada cruce de haces. Esto implica una densidad de 10 millones de partículas cargadas por centímetro cuadrado y por segundo a un radio de unos 30 centímetros del punto de interacción (Fig 1.2).

LHC dispondrá de dos detectores de propósito general para colisiones protón-protón, ATLAS (A Thoroidal LHC AparatuS) y CMS (Compact Muon Solenoid). El concepto de ambos detectores está determinado por las características diferentes en el campo magnético. En CMS se dispone de un enorme campo magnético central de 4 T en un volumen que incluye los calorímetros. Sin embargo en ATLAS este campo se reduce a 2 T, y sólo contiene al detector interno en dicho campo. A cambio dispone de una componente toroidal de 2 T de campo magnético fuera de las estructuras de calorímetros, y englobando un volumen mucho mayor.

En 1994 se publicó el Technical Proposal [33] de los detectores ATLAS y CMS donde se exponía el planteamiento general de dichos detectores expuesto, pero dejando libres ciertas opciones de

optimización de diseños a concretar durante los años posteriores. Así se inició una fase de *I+D* con el objetivo de aclarar las soluciones planteadas en dicho documento de carácter general.

En enero de 1996 se aprobaron LHC, ATLAS y CMS con algunas restricciones generales en cuanto a los objetivos iniciales por temas de presupuesto. Por una parte a LHC se le eliminó la opción de poder operar conjuntamente con LEP, en colisiones electrón-protón, aunque mantiene en el diseño la posibilidad de poder operar con iones pesados. Se redujo la energía en centro de masas a 14 TeV, según la tabla 1.1, y se recomendó a los grupos reducir las prestaciones y tamaños de los detectores para poder adecuarlos a una reducción de presupuesto.

En este contexto ATLAS pidió a cada uno de los subdetectores que inicie así un *I+D* adicional con el objetivo de compatibilizar dicha reducción de elementos sin que ello tenga un impacto en las prestaciones y motivaciones de física del detector.

La propuesta inicial de CMS es la siguiente:

- Poseer un sistema de detección de muones eficiente y de altas resoluciones.
- El calorímetro electromagnético con las mejores características de resolución energética posible.
- Un sistema de reconstrucción de trazas (*tracking*), capaz de reconstruir y asociar muones y electrones de alto momento transverso.

Este diseño se consigue con el campo magnético central de 4 T albergando los calorímetros, y utilizando la parte externa del detector de hierro compacto como retorno del campo magnético y estructura de muones intercalada, proporcionando una medida de momento independiente del detector interno. El calorímetro electromagnético está compuesto de cristales que proporcionan excelentes prestaciones de resolución de energía. El calorímetro hadrónico está compuesto de cobre y material centelleador. En el detector interno se emplea una solución mixta de detectores gaseosos (MSGC) que se describirán en el capítulo 4, y detectores de silicio en la parte más interna.

En ATLAS la propuesta de diseño contiene los siguientes requerimientos:

- Un calorímetro electromagnético muy optimizado, que además de tener una excelente hermeticidad, pueda realizar medidas precisas de energía perdida.
- Dos medidas independientes de alta precisión del momento.
- Capacidad de realizar *tracking* satisfactoriamente en alta luminosidad.
- Capacidad de identificar eficazmente sucesos complejos de física de sabores pesados, tales como b y τ , a través de la reconstrucción de vértices secundarios, durante el periodo inicial de baja luminosidad.

1.2 El colisionador LHC.

Como ya hemos comentado LHC (Large Hadron Collider) es el futuro colisionador protón-protón del CERN con una energía en centro de masas de 14 TeV. LHC será instalado en el túnel de 27 km. de circunferencia de LEP. Así mismo, los aceleradores de protones disponibles en el CERN serán utilizados como inyectores (Fig.-1.3). Muchas de las cuestiones físicas más interesantes, dentro de la amplia gama de oportunidades que el LHC ofrece, requieren alta luminosidad dado las bajas secciones eficaces de los procesos de interés, por ello el objetivo es conseguir operar a

Tabla 1.1: Parametros y prestaciones del colisionador LHC.

Parámetro	Valor
Energía (TeV) (por haz)	7.0
Campo dipolar (T)	8.4
Apertura del imán (mm)	56
Distancia entre aperturas (mm)	180
Luminosidad ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	10^{34}
Energía de inyección (GeV)	450
Intensidad de corriente circulando/haz (A)	0.53
Espacio entre paquetes (ns)	25
Partículas por paquete	10^{11}
Energía almacenada en el haz (MJ)	332
Emitancia transversa normalizada (μm)	3.75
Dispersión de la longitud del haz (m)	0.075
Valores de beta en el P.I. (m)	0.5
Ángulo de cruce (μrad)	200
Vida media del haz (horas)	22
Vida media de la luminosidad (horas)	10
Energía perdida por vuelta (keV)	6.9
Potencia total radiada por haz (kW)	3.7

luminosidades de $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Sin embargo, hasta alcanzar este objetivo, la luminosidad será inferior e inicialmente del orden de $10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ incrementándose conforme el programa avance.

Para conseguir las elevadas luminosidades es importante contar con un colisionador protón-protón, y no protón-antiprotón debido a la baja eficiencia que se tiene en la producción de antiprotones.

Como las dos partículas tienen la misma carga los haces deberán circular por anillos separados. Sin embargo, debido al tamaño de la sección del túnel de LEP la instalación de dos criostatos separados, uno para cada haz de protones, es complicada. La mejor solución encontrada para resolver esta cuestión ha sido la de utilizar el mismo imán y el mismo criostato para los dos haces. Esta solución además ha demostrado proporcionar un campo mayor en el espacio restringido del túnel [34]. El sistema magnético deberá operar en helio superfluido por debajo de 2 K, con un campo dipolar de 8.4 T. Los imanes (dipolos) superconductores proporcionarán campos magnéticos de igual intensidad pero sentidos opuestos, teniendo un yugo de retorno y una estructura de campo en común tal como se observa en la figura 1.4.

Al estar en el mismo túnel que LEP, tendrá 8 tramos curvos y 8 rectos. Los dos haces de protones, separados 180 mm en el plano horizontal, alternarán su posición del exterior al interior en mitad de cada uno de los 8 tramos rectos, donde en principio podrían interactuar. Los parámetros generales del colisionador [35] vienen dados en la tabla 1.1.

1.3 El experimento ATLAS.

En esta sección se va a realizar una descripción de los detectores más relevantes desde la parte más externa de ATLAS hasta la parte más interna, por último se describirá de forma genérica la forma de lectura y adquisición del detector incidiendo en los aspectos que sean más relevantes en éste trabajo.

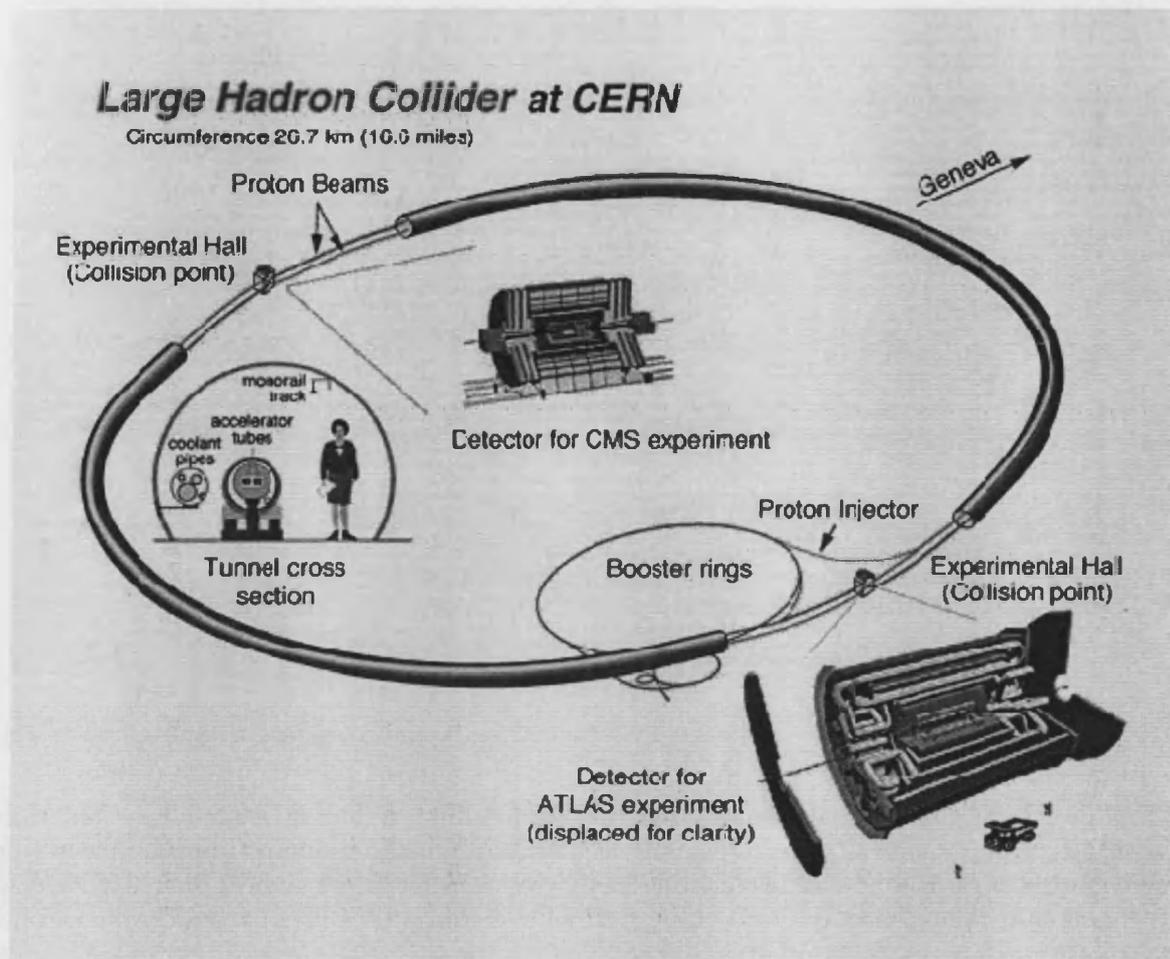


Figura 1.3: Esquema de los aceleradores e inyectores en LHC, así como la disposición de los detectores con algunos elementos de referencia de escala.

ATLAS es un experimento de propósito general para recoger datos de colisiones protón-protón en LHC. Con 44 metros de longitud y 22 metros de altura es el diseño de detector de geometría 4π más grande que existe. El diseño del detector se ha optimizado para cubrir búsquedas del bosón de Higgs, posibles esquemas alternativos de rotura de simetría, búsqueda de partículas supersimétricas y otras partículas nuevas así como el estudio de los posibles constituyentes de quarks, leptones y violación CP en el sector de B. La colaboración consta de más de 1500 científicos, ingenieros y estudiantes graduados pertenecientes a 148 instituciones participantes.

ATLAS incluye un detector interno dentro de un campo magnético de 2 T, seguido de un calorímetro electromagnético y hadrónico fuera de dicho campo. El detector dispone de un espectrómetro de muones en un campo magnético toroidal también de 2 T que proporciona una medida de momento independiente de la dirección polar de salida.

Para poder obtener una selección apropiada de sucesos es necesario exigir partículas con alto momento transversal². Para poder realizar dicha selección es necesario contar con un intenso campo magnético, que además desvíe las partículas cargadas con bajo momento transversal fuera del detector.

²Por una parte la mayoría de los procesos fuertes suceden con bajo P_T , y por otra los sucesos que implican procesos relacionados con el Higgs, o más allá del modelo estándar tienen un P_T elevado.

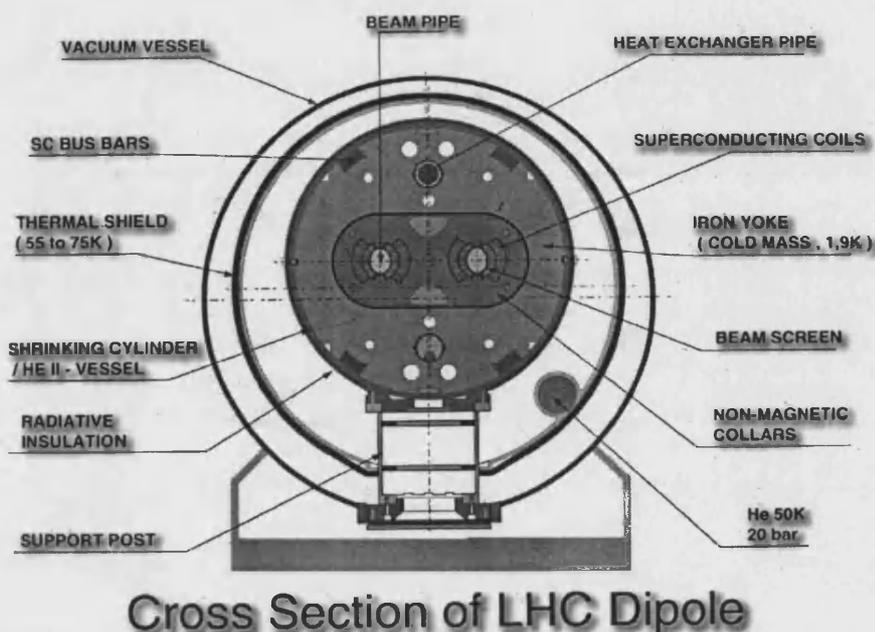


Figura 1.4: Sección transversal del elemento dipolar de LHC mostrando las partes más relevantes del mismo

El diseño pues del campo magnético central es muy importante para eliminarse fondos de partículas de bajo momento. Incluir campo magnético toroidal, permite realizar una medida de momento independiente de la dirección de la traza. La inclusión de ambos, dificulta disponer de un elevado campo magnético en el interior del detector, al destinar parte del volumen del detector a soportar estas estructuras.

En los detectores de geometría 4π un sistema de coordenadas adecuado es el sistema polar, con el eje Z definido por la dirección del haz, θ el ángulo polar respecto a este eje, R como la distancia al eje Z y Φ el ángulo azimutal. Sin embargo en colisionadores protón-(anti)protón, es conveniente emplear en vez del ángulo polar θ una variable denominada pseudorapidez η que está relacionada con el ángulo θ de la forma:

$$\eta = -\ln\left(\tan\frac{\theta}{2}\right) \quad (1.1)$$

esta variable tiene ventajas a la hora de describir la dinámica de procesos producidos, ya que la sección eficaz diferencial en colisiones protón-(anti)protón, es aproximadamente constante respecto a esta variable. Por tanto en éste sistema de coordenadas para obtener una respuesta uniforme del detector, la ocupación de cualquier sistema de detección ha de ser lo más uniforme posible en función de Φ y η . Esto idealmente implica una mayor granularidad en las zonas cercanas al haz y a bajo ángulo, justo donde la radiación es más intensa.

Para poder realizar medidas en LHC donde las luminosidades y secciones eficaces de producción son considerables, se requiere una elevada granularidad, es decir gran cantidad de elementos sensibles por unidad de volumen, y una respuesta rápida de todos los detectores, algunos de los cuales deben procesar información cada 25 ns. Ello implica una gran complejidad e integración de todos los elementos. El esquema adoptado en ATLAS se basa en reducir esta complejidad utilizando tres niveles de *trigger* donde en cada nivel, se reduce la tasa de cruce de haces de 40 MHz en el primer nivel hasta 10-100 Hz finales del tercer nivel.

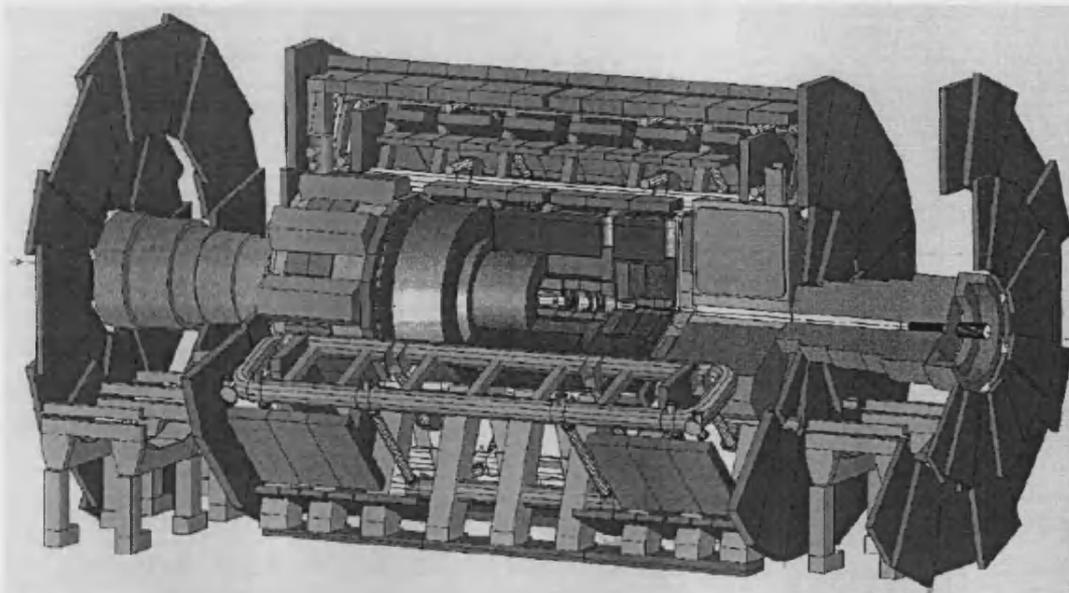


Figura 1.5: Vista general del detector ATLAS mostrando los subdetectores.

1.3.1 Las cámaras de muones.

Uno de los detectores en los que se ha hecho especial énfasis en ATLAS es el espectrómetro de muones. Consiste en un sistema de detectores gaseosos situados en una estructura que proporciona un campo magnético toroidal de 2 T de intensidad. Esta estructura está situada en la región de 14 m y 22 m desde el punto de interacción en Z , entre 4 y 11 metros de distancia en R . Las prestaciones globales que se esperan con este diseño pueden encontrar en la tabla 1.2. La importancia esencial de este detector es su capacidad en el *trigger* debido a su rapidez de respuesta en un entorno con bajo ruido. Ello es debido a que al estar más alejado del PI, requiere una menor granularidad que el resto de los detectores. Es posible realizar lecturas de todo el detector y cruzar información internamente a la tasa nominal de 40 MHz (ver tabla 1.1). Además la tecnología empleada en la lectura de este detector permite un tiempo de respuesta del orden de los 4 ns (menor de los 25 ns que supone el cruce de haz).

Consta de dos subsistemas cada uno con su propio sistema de imanes que permiten realizar medidas de momento con independencia al ángulo polar de salida del muón (Fig. 1.6):

Parte barril que cubre la región $\eta \leq 1.1$.

Parte a bajo ángulo que cubre la zona $1 \leq |\eta| \leq 3$

En cada subsistema, el momento transverso P_T , se define como el momento transverso a la dirección de campo magnético, que en este detector tiene componente Φ .

La parte barril proporcionará medidas en seis puntos con una precisión $\leq 60 \mu\text{m}$ a distancias R comprendidas entre 4 y 11 metros. Dichos puntos están como ya hemos mencionado en un campo magnético toroidal, que proporcionarán 8 imanes superconductores. Esta resolución espacial se conseguirá haciendo uso de la información de varias capas de cámaras de gas simultáneamente.

La parte hacia delante proporcionará también seis puntos con la misma resolución espacial pero dichos puntos estarán a distancias entre 14 m y 22 m en Z .

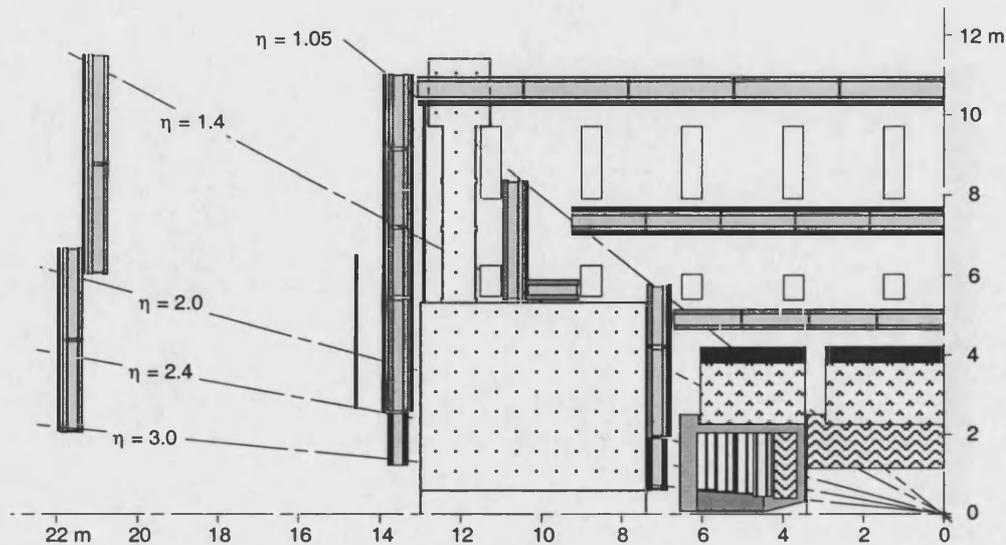


Figura 1.6: Vista lateral del detector mostrando, sobre el sistema de calorímetros, las cámaras de muones. En gris claro se representa el soporte, mientras que en gris oscuro se muestra las cámaras de precisión. Se observa asimismo los intervalos de pseudorapidez que cubre dicho detector.

La eficiencia que se espera tener para muones en este detector es casi del 100 %. La tabla 1.2 resume las prestaciones requeridas por este detector. En la figura 1.7(b) se muestra las capacidades de *trigger* del detector para los cortes de alto y bajo momento transversal.

En el programa de física de ATLAS es importante la identificación de leptones (ℓ , en particular electrones y muones). Estos suelen ser una señal característica de nueva física, a través de la desintegración de partículas de gran masa que producen leptones con gran P_T . En particular desintegraciones del Higgs $H \rightarrow W^+W^- \rightarrow \ell^+\ell^-\ell^+\ell^-$, además sucesos con el quark b que también es indicativo del Higgs con una masa alrededor de 100 GeV, e identificación del quark t . Esto le convierte en uno de los detectores con más peso de decisión en el esquema de *trigger* general de ATLAS.

Para poder establecer el *trigger*, tal como se observa en la figura 1.7 se realiza una clasificación de sucesos en dos rangos de momento transversal:

Muones de bajo P_T : se les exige coincidencia en dos planos próximos.

Muones de alto P_T : a los que se les exige coincidencia en planos alejados.

Esta clasificación permite tener una aceptación mayor de sucesos cuando opera a baja luminosidad (identificando muones de bajo P_T) y realizar una reducción mayor de sucesos cuando se trabaja en alta luminosidad.

La figura 1.7 muestra las eficiencias esperadas para cada grupo de leptones así como las combinatorias exigidas en las cámaras de muones.

1.3.2 El sistema de calorímetros.

El sistema de calorimetría en ATLAS consiste en dos calorímetros uno hadrónico y otro electromagnético situados en la parte barril cilíndrica y en los tapones *end caps*.

Cada calorímetro cuenta con una tecnología muy distinta:

Calorímetro hadrónico: Es un sistema de placas de material inerte (hierro) y activas (centelleador), donde la lectura se realiza a través de fotomultiplicadores.

Tabla 1.2: Parámetros principales de las prestaciones del espectrómetro de muones para distintos canales, en resolución de energía y en capacidades de *trigger*

Parámetro	Principales criterios físicos	Prestaciones		Comentarios
		deseado	actual	
Medida de momento				
$\Delta P_T/P_T$ a 20 GeV	$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$	< 1%	2%	Limitado por pérdida de energía y dispersión múltiple. Límite dispersión múltiple. Optimización global del detector.
$\Delta P_T/P_T$ a 100 GeV	$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$	< 1%	2%	
$\Delta P_T/P_T$ a 1000 GeV	$Z \rightarrow \mu\mu$	< 1%	8%	
Covertura en rapidez	Procesos de arriba	3	3	Integración del sistema
Prestaciones del <i>trigger</i>				
P_T Nivel I	Física del B Violación CP	4 GeV	6 GeV	Pérdida de energía por <i>trigger</i> en calorímetro. Dependiente del fondo.
P_T Nivel II	$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\mu$	15 GeV	20 GeV	
Covertura en rapidez	$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\mu$ $W \rightarrow \mu\nu$	2.2 3	2.2	Línea base. Incremento en estudio.
Segunda coordenada	Medidas de momento	$\sigma = 10$ mm $\sigma < 10$ mm	$\sigma = 10$ mm $\sigma < 10$ mm	Barril. Tapón (función de Φ y η).
Cruce de haces	Asociación de sucesos	$\sigma < 5$ ns	$\sigma < 4$ ns	

Calorímetro electromagnético: Es un sistema de elementos de plomo en forma de acordeón y lleno de argón líquido, donde la lectura se realiza recolectando la avalancha de carga eléctrica producida en el propio líquido.

Una característica deseable es que tanto la resolución energética como angular de estos detectores sea homogénea en Φ y en η , sin embargo debido a que la variable η es una variable con fuerte dependencia angular esto no es en general posible haciendo que los detectores pierdan resolución en $\Delta\eta$ a medida que η aumenta. La segmentación de estos calorímetros se establece de base como:

$$\Delta\Phi \times \Delta\eta = 0.025 \times 0.025 \quad (1.2)$$

para el calorímetro electromagnético y

$$\Delta\Phi \times \Delta\eta = 0.1 \times 0.1 \quad (1.3)$$

para el calorímetro hadrónico.

Dentro de esta resolución espacial se espera una respuesta uniforme en resolución de energía. La resolución energética ΔE viene dada por la siguiente expresión:

$$\Delta E = \frac{A}{\sqrt{E}} \oplus C \quad (1.4)$$

donde A es el término estocástico debido a las fluctuaciones estadísticas de la cascada, y C es un término constante debido a las características propias del detector. La expresión 1.4 no tiene en cuenta problemas debidos a la no linealidad de la electrónica.

Tabla 1.3: Resumen de canales y características del sistema de calorímetros de ATLAS.

Calorímetro electromagnético		
	Barril	<i>End-caps</i>
Aceptancia en η	1.4	1.4-3.2
Número de capas en profundidad:		
radiador	1	-
calorímetro	3	3
Granularidad en $\Delta\eta \times \Delta\phi$:		
radiador	0.025 \times 0.1 ($\eta < 0.8$)	-
	0.003 \times 0.1 ($\eta > 0.8$)	-
calorímetro	0.003 \times 0.100	0.003 \times 0.100 ($\eta < 2.4$)
	0.025 \times 0.025	0.025 \times 0.025 ($\eta < 2.4$)
	0.025 \times 0.050	0.025 \times 0.050 ($\eta < 2.4$)
		0.050 \times 0.050 ($\eta > 2.4$)
Canales de lectura:		
radiador	32000	-
calorímetro	100000	41000 por cada lado
End-caps hadrónicos LAr		
Aceptancia en η	-	1.5-3.2
Número de capas en profundidad	-	4
Granularidad en $\Delta\eta \times \Delta\phi$	-	0.1 \times 0.1 ($\eta < 2.4$)
	-	0.2 \times 0.2 ($\eta > 2.4$)
Canales de lectura	-	4300 por cada lado
Calorímetro hacia adelante LAr		
Aceptancia en η	-	3.1-4.9
Número de capas en profundidad	-	3
Granularidad en $\Delta\eta \times \Delta\phi$	-	$\sim 0.15 \times 0.15$
Canales de lectura	-	750 por cada lado
Calorímetro hadrónico		
	Barril	Barriles extendidos
Aceptancia en η	1.0	1.0-1.6
Número de capas en profundidad	3	3
Granularidad en $\Delta\eta \times \Delta\phi$	0.1 \times 0.1	0.1 \times 0.1
	0.2 \times 0.1 (última capa)	0.2 \times 0.1 (última capa)
Canales de lectura	6000	2000 por cada lado

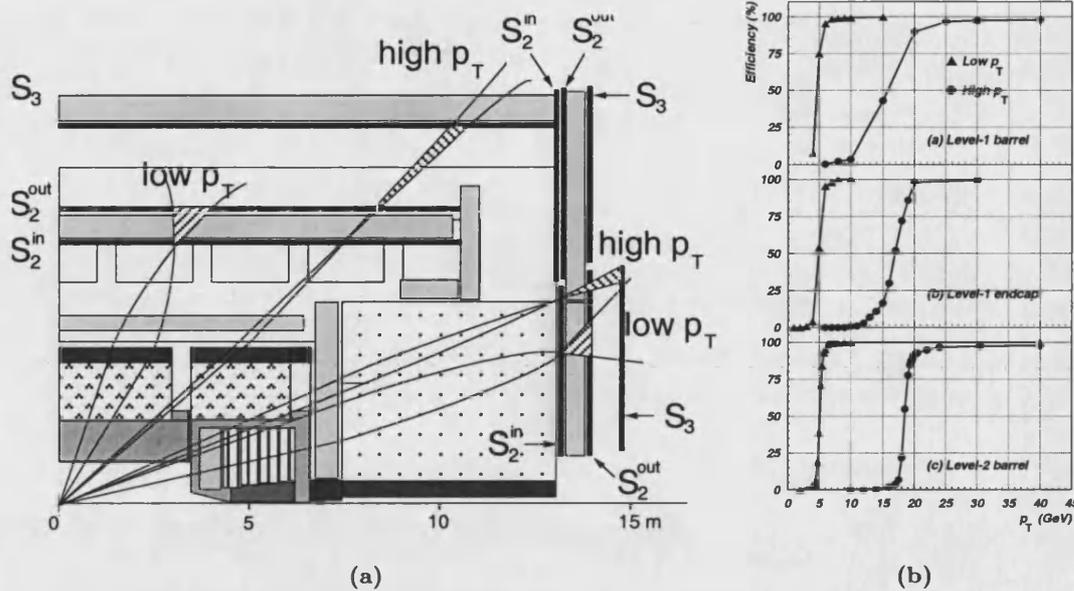


Figura 1.7: En la figura (a) se muestra la combinatoria en primer nivel de trigger para muones de alto y bajo p_T . En la figura (b) se representan las eficiencias que se esperan en función del momento total del muón.

1.3.2.1 Calorímetro hadrónico.

El principal cometido del calorímetro hadrónico de ATLAS consiste en identificar jets y medir su energía y dirección, medir la energía total perdida E_T^{miss} , y mejorar las capacidades del calorímetro electromagnético midiendo magnitudes como ocupación y separación entre jets.

Una característica novedosa de este detector es la disposición del material activo (tejas centelleadoras) en relación a la dirección de salida de las partículas desde el punto de interacción. Generalmente se colocan paralelas al ángulo Φ para conseguir buena hermeticidad, sin embargo en éste detector están orientadas perpendicularmente a dicho ángulo.

Esta geometría permite que la lectura recogida en fibras ópticas, pueda discurrir a lo largo de las placas de centelleador, optimizando de esta forma la recolección de luz. Las fibras envían el pulso de luz a unos fotomultiplicadores que permiten situar la electrónica alejada de las partes internas del detector donde existe mayor radiación, y posteriormente son leídas por microelectrónica específica de ATLAS.

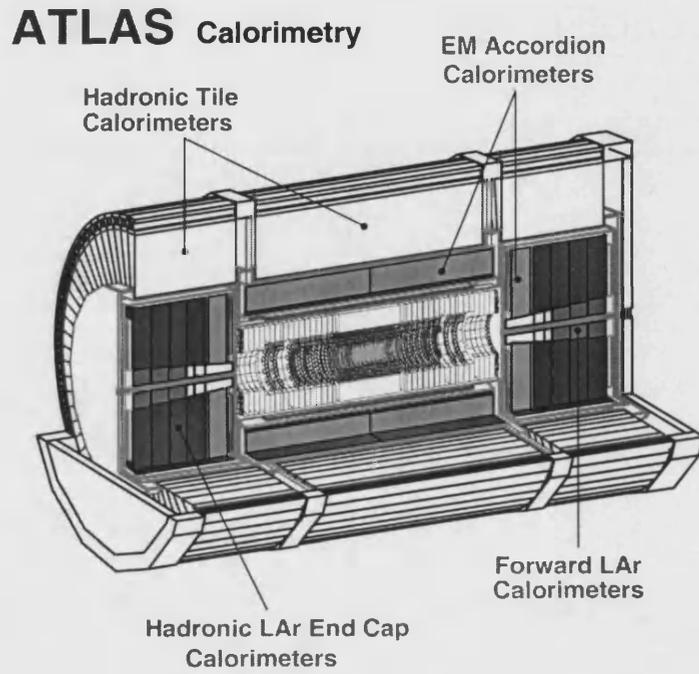
Como la cascada hadrónica es mucho más amplia en término medio que la anchura del material pasivo, con este diseño se obtiene también una buena hermeticidad.

Se ha comprobado en sucesivos tests en haz que este calorímetro puede contribuir a la identificación de muones con las cámaras de muones [36].

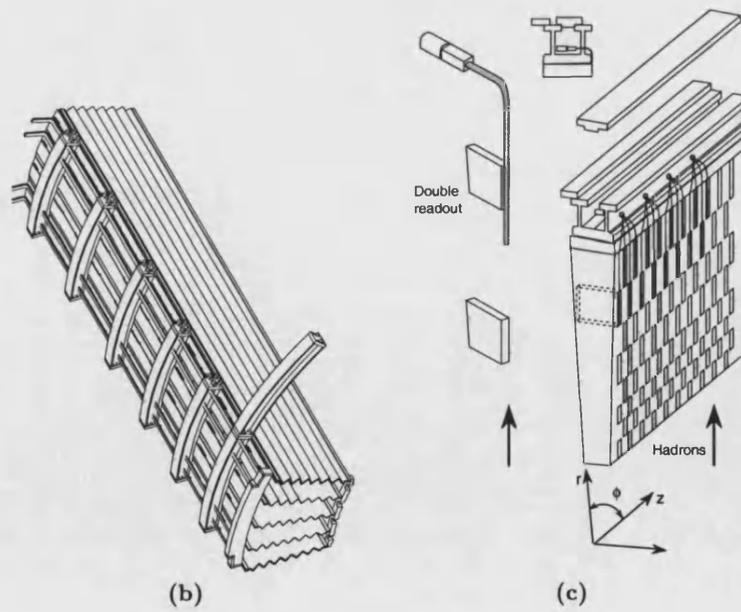
La inclusión del calorímetro hadrónico juega un papel muy importante para la detección del Higgs en canales $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu jj$ si éste tiene una masa por encima de los 800 GeV.

1.3.2.2 Calorímetro electromagnético.

Este es un calorímetro compacto compuesto de material pasivo (plomo) y activo (argón líquido) dentro de un criostato propio. La técnica de lectura en el calorímetro electromagnético, consiste en recoger la deriva de la carga depositada por la ionización de un líquido. Ésta se produce en un medio contenido por elementos de plomo con forma de acordeón que permite ensamblar



(a)



(b)

(c)

Figura 1.8: En la figura (a) se muestra el esquema global de los calorímetros en ATLAS. La figura (b) muestra una celda del calorímetro electromagnético. La figura (c) muestra la disposición de elementos del calorímetro hadrónico.

los módulos entre si sin que existan huecos entre los módulos del calorímetro. La longitud del calorímetro implica un mínimo de $26 X_0$ para la parte barril y un máximo de $28 X_0$ en la parte endcap.

El hecho de que la avalancha se produzca en un líquido inerte, le proporciona excelentes capacidades de resistencia a la radiación, pues permite la regeneración del material activo, y las avalanchas son frenadas en el propio líquido evitando la degeneración de los ánodos y cátodos del detector por efecto de las descargas.

El calorímetro electromagnético tiene una estructura de capas tal que le dota por una parte de una buena hermeticidad, y por otra de capacidad para realizar medidas en profundidad de la cascada electromagnética.

El hecho de poder analizar la cascada electromagnética en profundidad le permite tener una buena resolución angular. La resolución angular que se espera obtener en la dirección η es de $40 \text{ mrad}/\sqrt{E(\text{GeV})}$, necesaria para una buena reconstrucción del canal $H \rightarrow \gamma\gamma$ en alta luminosidad. Para poder realizar esta medida es esencial la contribución del detector interno para poder distinguir los γ de electrones.

Este calorímetro ha de ser capaz de identificar y reconstruir de forma precisa la energía de electrones y fotones sobre un amplio rango. El rango de baja energía viene determinado por la capacidad de reconstruir el canal $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e$, [37–39] para lo cual requiere una buena reconstrucción de electrones con $E_T \simeq 5 \text{ GeV}$. Además la reconstrucción de electrones provenientes del canal semileptónico de la desintegración del b requiere una identificación de electrones con $E_T \simeq 2 \text{ GeV}$. El límite de alta energía viene dado por las desintegraciones de partículas como $Z \rightarrow ee$ y $W \rightarrow e\nu$, partículas con masas del orden de los 5 TeV . Lo que nos da un intervalo de 2 GeV a 5 TeV .

1.3.3 El detector interno.

El detector interno se encuentra en el interior de un campo magnético en la dirección Z de 2 T en su parte central, que permite realizar la reconstrucción del momento y de vértices. Se compone de tres partes:

TRT: (*Transition Radiator Tracker*) Consiste en un detector gaseoso con un radiador de radiación de transición. Tiene como misión proporcionar información continua de las trazas así como contribuir la identificación de piones, electrones y fotones, gracias a la información proporcionada por la radiación de transición. Esto lo logra utilizando información en 36 puntos de las alrededor de 64 capas de detector.

SCT: (*SemiConductor Tracker*) es un detector formado por varias capas de detectores de silicio que proporcionan información discreta de la traza de la partícula. Se compone de dos zonas con geometrías diferenciadas, la parte barril donde los detectores están situados alrededor de un cilindro y la parte *forward*, donde los detectores están situados en un disco.

Pixels: Se constituye de tres capas muy cerca del punto de interacción que proporcionan con la misma resolución información en dos coordenadas (X e Y del plano del detector según figura 1.9). Tiene una geometría análoga al SCT.

Para la parametrización de la trayectoria de cada partícula que posteriormente se utilizarán para la reconstrucción de vértices se emplean las siguientes variables:

1. Las dos componentes del parámetro de impacto (mínima distancia de la traza al vértice principal), en el plano XY y en la dirección Z .

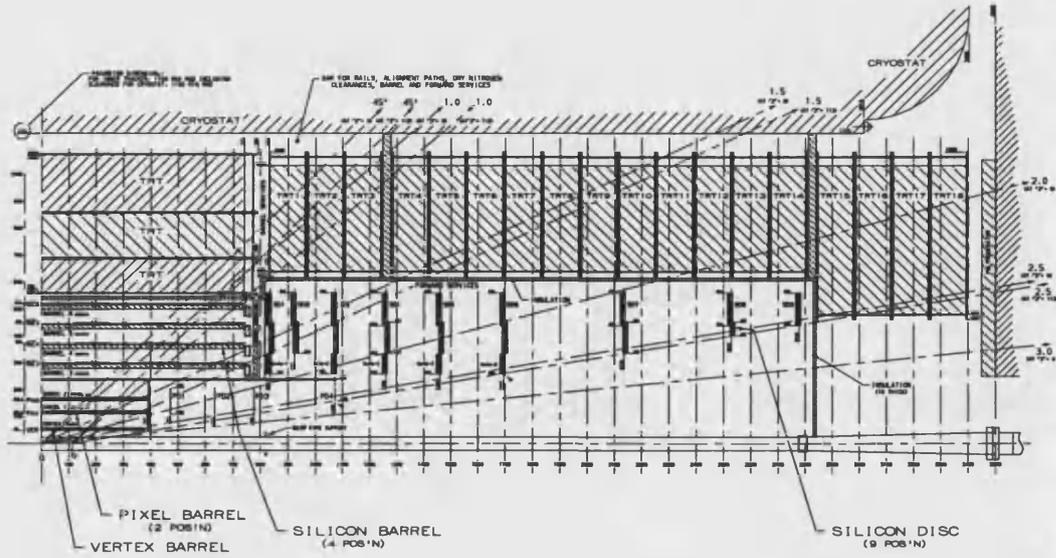


Figura 1.9: Cuadrante del detector interno de ATLAS mostrando todos los subdetectores.

2. El ángulo polar θ .
3. El ángulo azimutal Φ .
4. La inversa del radio de curvatura $1/R$ de la traza debida al momento transverso y al campo B .

Utilizando dicha parametrización la resolución del parámetro de impacto de un detector se puede expresar como:

$$\sigma = A \oplus \frac{H}{P_T \cdot f(\theta)} \quad (1.5)$$

donde σ es la resolución del parámetro de impacto, A corresponde a la resolución intrínseca del detector, H es un término relacionado con la dispersión múltiple de las partículas con el material del detector, y $f(\theta)$ es una función que depende de la disposición geométrica del detector.

Tabla 1.4: Resolución del parámetro de impacto parametrizado para el detector interno de ATLAS. Las contribuciones se sumarán de forma cuadrática. Dichas resoluciones se parametrizarán en función de P_T y del ángulo polar θ .

Detector de vértices	σ_{ip} (μm)	σ_z (μm)
Alta luminosidad	$27 \oplus \frac{220}{P_T \sqrt{\sin \theta}}$	$130 \oplus \frac{240}{P_T \sqrt{\sin \theta}^3}$
Pixeles binarios	$18 \oplus \frac{61}{P_T \sqrt{\sin \theta}}$	$84 \oplus \frac{130}{P_T \sqrt{\sin \theta}^3}$
Micro bandas	$13 \oplus \frac{62}{P_T \sqrt{\sin \theta}}$	$39 \oplus \frac{90}{P_T \sqrt{\sin \theta}^3}$

1.3.3.1 El detector TRT

El propósito de este detector es el de realizar un *tracking* continuo que permita una asociación de trazas con el detector interno, y mejorar a través de las capacidades de radiación de transición del

Tabla 1.5: Parámetros del detector interno con las resoluciones esperadas por detector, los valores de la resolución son valores típicos aunque la dependencia en η no se incluye.

Sistema	Posición	Area (m^2)	Resolución $\sigma(\mu m)$	Canales (10^6)	Cobertura en η
Pixels	1 capa extraíble barril	0.2	$R_\Phi = 12, z = 66$	16	± 2.5
	2 capas barril	1.4	$R_\Phi = 12, z = 66$	81	± 1.7
	4 discos por lado	0.7	$R_\Phi = 12, R = 66$	43	$\pm(1.7 - 2.5)$
SCT	4 capas barril	34.4	$R_\Phi = 16, z = 580$	3.2	± 1.4
	9 discos por lado	26.6	$R_\Phi = 16, R = 580$	43	$\pm(1.4 - 2.5)$
TRT	Barril axial		170 por tubo	0.1	± 0.7
	Radial forward		170 por tubo	0.32	$\pm(0.7 - 2.5)$

detector las prestaciones de ATLAS de identificación y separación de fotones, piones y electrones. Esto se consigue alternando 96 capas de detectores gaseosos con capas dieléctricas (polyamidas) que producen la radiación de transición y que proporcionan una media de 36 puntos por traza, para todas las trazas con $P_T > 1$ GeV.

Tabla 1.6: Tasa esperada en el detector de TRT a distintas zonas y niveles de señal.

Posición	Umbral 0.2 KeV	Umbral 6.5 KeV	Señales mayores
Barril (R=108)	6 MHz	0.400 MHz	11 kHz
Barril (R=64)	18 MHz	1.1 MHz	21 kHz
End-cap tubos 39 cm	8 MHz	.5 MHz	4 kHz
End-cap tubos 55 cm	19 MHz	1.1 MHz	10 kHz

La capacidad de separar piones, electrones y fotones viene dada del hecho de alternar entre las capas de detectores radiadores de transición. Esta capacidad se logra introduciendo material con capas de distinta constante dieléctrica. La separación depende fuertemente con la variable γ relativista³ de la partícula. Esta radiación es muy elevada para electrones, a partir de 10 GeV, pero no así para el resto de partículas que atraviesen dicho detector.

La radiación de transición implica la emisión de fotones de unos pocos KeV producidos en la dirección de la partícula incidente, que se manifiestan en el detector con un incremento de la energía total recogida. A diferencia de los detectores Cherenkov, el mismo detector que detecta la partícula detecta la radiación de transición, no precisando de dispositivos ópticos adicionales.

La identificación correcta de electrones, fotones y piones en ATLAS ayuda en la búsqueda y selección de canales [40] de desintegración del Higgs del tipo $H \rightarrow ZZ \rightarrow 2e2\mu$ y $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e$, y a reducir fondos en los canales del $H \rightarrow \gamma\gamma$.

Una diferencia especial de este detector comparado con el resto de los detectores de ATLAS es el apilamiento que presenta al tener una velocidad de respuesta mayor que 42 ns. Esto hace que éste opere a un máximo de alrededor de 20 MHz para sincronizar (en un factor 2) con los 40 MHz de LHC. Esto le impide participar en el *trigger* pero puede funcionar con el resto de los detectores debido a:

- La tasa máxima esperada se da en la parte *end-cap* y ésta varía de 6 MHz en la parte

³ $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$ con $\beta = v/c$ siendo v la velocidad de la partícula y c la velocidad de la luz

barril a 19 MHz en el peor de los casos (ver la tabla 1.6)

- Sólo se leen zonas del detector asociadas a sucesos producidos en los calorímetros y cámaras de muones.
- En caso de apilamiento excesivo se hace uso de la información proporcionada por otros detectores, que permiten asociar en el tiempo los sucesos.

Como una de las informaciones que tiene que medir el detector es el número de clusters por hit así como la energía depositada en cada tubo, para electrones de 20 GeV, se observa una eficiencia del 90% en la discriminación con piones.

1.3.3.2 El detector SCT

Los requerimientos que ha de cumplir este detector son:

Vértices: Ha de ser capaz por sí sólo de proporcionar una buena reconstrucción de vértices indispensable para física de b así como ser sensible a topologías características que implican la producción de B para la detección de Higgs.

Momento: El detector ha de tener intrínsecamente una resolución de momento para partículas de 500 GeV mejor del 30 %.

Para ello se compone de dos estructuras de detección, la *parte barril* ($\eta < 1$) y la parte a bajo ángulo o *zona forward*, ($1 < \eta < 2.5$) como se observa en la figura 1.9. El objetivo de estas dos geometrías es tratar de conseguir que las trazas incidan perpendicularmente a las superficies de detección y minimizar el número de detectores necesarios para obtener un mínimo de 4 puntos por traza que permitan su reconstrucción.

Cada parte (*barril* y *parte forward*) esta constituido por módulos independientes de 6×12 cm con dos detectores de *microstrips* de silicio pegados por la parte posterior y rotados 40 mrad. Esta rotación está optimizada para para:

- Proporcionar información en dos dimensiones de la posición de la traza (ver tabla 1.5).
- Permitir una reducción de ruido al poder correlacionar las señales de la traza en los dos planos.
- En caso de fallo de una de las dos caras del detector asegurar que se puede seguir midiendo la componente Φ de la traza sin contar con la información del otro detector.

Este trabajo se enmarca dentro del periodo de $I+D$, con estudios realizados para la adecuación del detector de trazas a esta reducción de presupuesto manteniendo al máximo las prestaciones recogidas inicialmente en [33], así como en la adecuación de un laboratorio para poder llegar a la construcción y desarrollo de detectores de silicio de la zona de bajo ángulo de ATLAS en Valencia.

En los siguientes capítulos se describirán las características de la electrónica y funcionamiento de los detectores con más detalle, en esta introducción se mencionarán aquellos aspectos que inciden en la concepción global detector ATLAS.

1.3.3.3 El detector de pixels

Si miramos la figura 1.9, vemos que este sistema de detectores es el más próximo al punto de interacción (PI), de la tabla 1.5. Se puede observar que éste es el detector de ATLAS con mayor número de canales. El objetivo de este detector es proporcionar 3 puntos espaciales para partículas cargadas muy cercanas al PI, esencial para identificar con precisión vértices.

Este detector está constituido por detectores de silicio segmentados en ambas direcciones ($50 \mu m \times 300 \mu m$), que dan una resolución independiente de $\sigma_{R-\phi} = 15 \mu m$ y $\sigma_z = 100 \mu m$, y que son leídos de forma independiente en todos sus canales. El objetivo es tratar de obtener a pesar de estar extremadamente cerca del PI una baja ocupación de partículas por suceso. Esto permite que el detector pueda mantener en sus memorias hasta 23 sucesos para luego correlacionarlos de forma unívoca con el resto de los detectores y poder realizar la reconstrucción de vértices. Ello lleva incluido unos tiempos muertos de $2.5 \mu s$ para las capas más externas y $0.5 \mu s$ para la capa más interna.

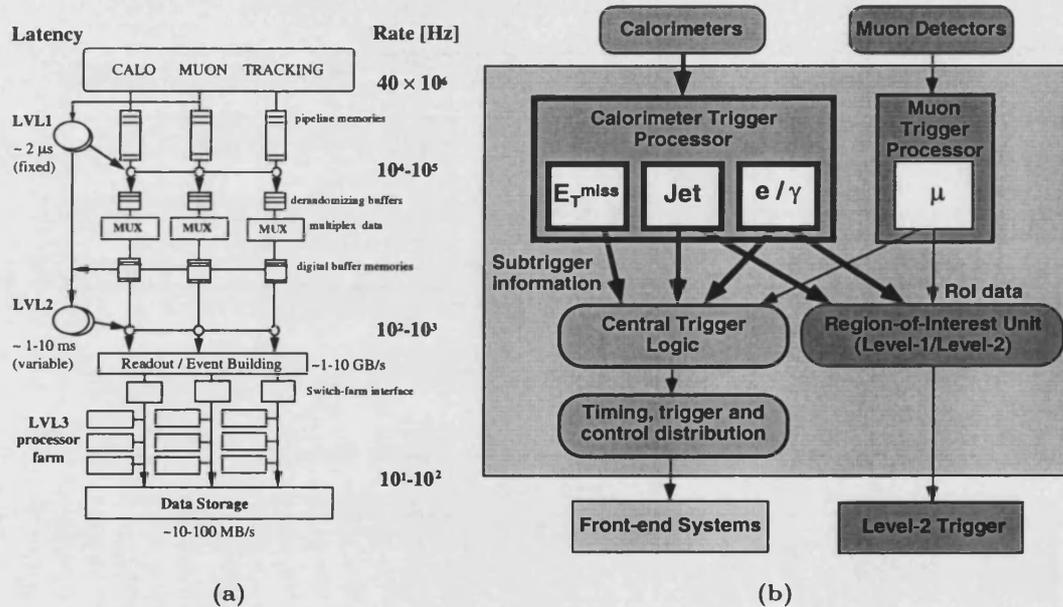


Figura 1.10: Esquema previsto para el en ATLAS. La figura (a) es un esquema del primer nivel de trigger, con los detectores que participan. La figura (b) muestra un detalle de la combinatoria esperada en el primer nivel de *trigger*.

Estos tiempos muertos se compensan debido al hecho que es el detector con la mayor granularidad de ATLAS como se ve en la tabla 1.5. Por otra parte estos detectores son leídos únicamente en las zonas definidas de interés por el resto de los detectores.

La capa más interna (situada a 47 mm del PI) es una capa que sólo sobrevivirá durante el primer periodo de baja luminosidad, ésta será eliminada al entrar en luminosidades de $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, debido a problemas con la radiación.

La tecnología empleada en el sustrato del detector es de pixels N^+ en sustrato N separados por zona p^+ análogos a los detectores del SCT, pero mientras que en estos últimos la electrónica está localizada sólo en una parte del detector (la parte central) en los detectores de pixels se encuentra localizada en toda la superficie del detector.

Tabla 1.7: Lista de los requerimientos de trigger en LVL1 and LVL2 y tasa asociada a baja y alta luminosidad.

Requerimientos de Trigger	tasa LVL1 (kHz)	tasa LVL2 (kHz)
Luminosidad $\mathcal{L} = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$		
$\geq 1 \mu P_T > 20 \text{ GeV} (1\mu_{20})$	4	
$\geq 1 \mu P_T > 20 \text{ GeV} (1\mu_{20I})$ aislado		0.2
$\geq 1 \mu P_T > 40 \text{ GeV} (1\mu_{40})$		0.1
≥ 1 sector e.m. $E_T > 30 \text{ GeV} (1e_{30})$ aislado	20	
$\geq 1 e E_T > 30 \text{ GeV} (1e_{30})$		0.3
$\geq 1 \gamma E_T > 60 \text{ GeV} (1\gamma_{60})$		0.1
$\geq 2 \mu P_T > 6 \text{ GeV} (2\mu_6)$	1	
$\geq 2 \mu P_T > 10 \text{ GeV} (2\mu_{10})$		0.08
$\geq 2 \mu P_T > 6 \text{ GeV} (2\mu_{6I})$ aislados		0.1
$B_d^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$, $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$		0.01
≥ 2 sectores e.m. $P_T > 20 \text{ GeV} (2em_{20})$ aislados	4	
$\geq 2 e P_T > 20 \text{ GeV} (1e_{20})$ o $\geq 2 \gamma P_T > 20 \text{ GeV} (2\gamma_{20})$		0.2
≥ 1 jet $P_T > 150 \text{ GeV} (1j_{150})$	3	
≥ 1 jet $P_T > 300 \text{ GeV} (1j_{300})$		0.1
≥ 3 jets $P_T > 150 \text{ GeV} (3j_{150})$		0.04
Elevada E_T^{miss} (E_T^{miss})	1	0.1
Otros triggers	5	0.1
Total	$\lesssim 38$	$\lesssim 1.4$
Luminosidad $\mathcal{L} = 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$		
$\geq 1 \mu P_T > 6 \text{ GeV} (1\mu_6)$	8	
B-physics LVL2 triggers		0.8
$\geq 1 \mu P_T > 20 \text{ GeV} (1\mu_{20})$		0.2
≥ 1 sector e.m. $P_T > 20 \text{ GeV}$ aislado ($1em_{20}$)	10	
$\geq 1 e P_T > 20 \text{ GeV} (1e_{20})$		0.2
$\geq 1 \gamma P_T > 40 \text{ GeV} (1\gamma_{40})$		0.06
≥ 2 sectores e.m. $P_T > 15 \text{ GeV} (2em_{15})$ aislados	2.5	
$\geq 2 e P_T > 15 \text{ GeV} (2e_{15})$		0.01
$\geq 2 \gamma P_T > 20 \text{ GeV} (2\gamma_{20})$		0.01
≥ 1 jet $P_T > 100 \text{ GeV} (1j_{100})$	0.9	
≥ 1 jet $P_T > 200 \text{ GeV} (1j_{200})$		0.06
≥ 3 jets $P_T > 100 \text{ GeV} (3j_{100})$		0.02
Elevada E_T^{miss} (E_T^{miss})	0.1	0.01
Otros triggers	1	0.1
Total	$\lesssim 23$	$\lesssim 1.5$

1.3.4 El sistema de trigger y DAQ.

Una de las características que ha de tener todo detector es la capacidad de seleccionar sucesos en función de su importancia. Esto se consigue a través del llamado sistema de *trigger*. Su misión es conseguir el máximo de sucesos con significado de física, sincronizar la adquisición de todos los detectores y reducir al máximo el número de sucesos irrelevantes.

En ATLAS la implementación consta de tres niveles de *trigger*, (LVL1, LVL2 y LVL3) los dos primeros implementados en hardware y el tercero implementado en software. En cada etapa se filtran los sucesos cruzando de forma cada vez más elaborada información entre cada subsistema de detección. Ello implica así mismo que cada etapa requiere mayor tiempo para poder seleccionar sucesos de forma más elaborada.

En cada nivel de *trigger* se trata de reducir la tasa de sucesos en al menos un orden de magnitud de esta forma la tasa de sucesos va de $40 \cdot 10^6 \text{ Hz}$ en el detector, $10^4 - 10^5 \text{ Hz}$ una vez pasado el primer nivel, (LVL1) $10^2 - 10^3$ después del segundo nivel de trigger (LVL2) y $10 - 10^2$ sucesos por segundo finales (LVL3).

Respecto a LEP en el LHC nos encontramos con una situación más complicada debido a la mayor cantidad de sucesos por unidad de tiempo y número de canales.

1. La alta granularidad del detector implica órdenes de magnitud mayor de información a procesar respecto a LEP. Esta granularidad es imprescindible para conseguir trabajar con la gran cantidad de partículas que implican los procesos protón-protón.
2. Un cruce de haz cada 25 ns necesario para alcanzar la luminosidad requerida, implica tener capacidad de procesar con esta frecuencia.

La solución propuesta, a diferencia de los sistemas de *trigger* de LEP, es incluir una elevada paralelización de todas las etapas de adquisición así como una enorme supresión de canales.

La alta paralelización se logra procesando parte de los sucesos en el mismo detector y otra parte en granjas de ordenadores conectadas por una red de elevado ancho de banda (1 Gb/sec) ATM o SCI.

La supresión de canales se obtiene entre otros métodos volcando únicamente la información de los conos de las llamadas regiones de interés (ROI). Dadas las configuraciones que se siguen de la figura 1.10(a), éstas son aquellos conos con muones detectados con un determinado P_T , y aquellos conos donde los calorímetros obtienen excesos de señal como se muestra en la tabla 1.7, que pueden implicar jets, electrones o fotones. En estas condiciones el tamaño de medio de cada suceso se estima en 1 MB. Así pues se espera un ancho de banda de salida equivalente a 10-100 MB/s a partir del tercer nivel de trigger.

1.3.5 Medidas de la luminosidad.

Por último, un punto crucial para obtener una buena calidad en los datos es la medida de la luminosidad. Puesto que el proceso protón-protón es un proceso difractivo, a diferencia del proceso e^+e^- , donde la interacción es entre partículas puntuales, no es posible utilizar monitores de luminosidad como los utilizados en LEP donde se mide la sección eficaz elástica electromagnética, que está perfectamente conocida.

La forma de realizar dicha medida se basa en tres posibles procesos, que han de ser previamente estimados:

Dispersión elástica: La sección eficaz total se puede deducir empleando el teorema óptico [41, 42], de la extrapolación de la sección eficaz elástica $d\sigma/dt$, siendo t el cuadrimomento transferido, para $t = 0$ con el número total de sucesos por unidad de tiempo.

Producción de bosones W y Z: Cuyas secciones eficaces son para LHC 135 nb y 45 nb respectivamente [43], ello implica 5 y 3 Hz a luminosidades de $10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, obteniéndose un error de un 5 % en menos de un minuto a $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Este procedimiento se puede emplear para luminosidades superiores a $10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Procesos QED: el proceso $p+p \rightarrow e^+e^-$ se conoce con una buena precisión (1 %). Se requiere la búsqueda de pares e^+e^- y se realizaría a $10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para evitar apilamientos.

Capítulo 2

Detectores de Silicio.

En este capítulo se realizará una descripción acerca de los detectores de silicio con aplicaciones para altas energías, para pasar a describir el funcionamiento básico de estos de detectores así como los parámetros de interés. Seguidamente se expondrá el método experimental empleado para caracterizar los detectores de silicio y cuantificar dichos parámetros.

2.1 Introducción histórica.

El inicio de los detectores basados en semiconductores empieza en 1951, con la construcción detectores de silicio de gran volumen dedicados a espectrografía nuclear. La energía depositada para la creación de un par electrón hueco, 3.6 eV, lo hacen idóneo para las medidas de espectros nucleares.

En Noviembre 1974 el descubrimiento simultáneo del mesón J/Ψ en BrookHaven por Samuel Ting [44] y SLAC por Burton Richter [45], dirigió la atención experimental hacia experimentos dedicados al charm. La detección de los nuevos hadrones con vidas medias cortas (10^{-13} 10^{-12} s) requería buscar detectores con resoluciones espaciales de acuerdo a estas vidas medias.

En 1980 la tecnología planar en semiconductores está suficientemente desarrollada. Así J. Kemmer planteó un método [46] capaz de producir detectores altamente segmentado, aptos para utilizarse en física de partículas y realizar la medida de las trayectorias de partículas cargadas con gran precisión.

Desde entonces los detectores de silicio se han empleado como una herramienta común en física de altas energías: como blancos activos [47], detectores de vértices, para predecir trazas en emulsiones nucleares [48], y un sin fin de experimentos en colisionadores con detectores formados por múltiples capas de silicio [49–52]. En el futuro estos detectores se emplearán en factorías de B [53] así como en los detectores del colisionador LHC.

2.2 Definiciones generales.

Cuando una partícula cargada atraviesa un medio deposita una fracción de su energía cediéndola principalmente a los electrones que forman parte del material que atraviesan. La pérdida de energía de una partícula viene descrita por la ecuación de Bette-Bloch [31]. La figura 2.1 muestra la pérdida de energía de varias partículas en distintos materiales.

Se observa que la pérdida de energía disminuye hasta un mínimo en estos materiales, y después crece hasta alcanzar un valor asintótico. Cuando la partícula incidente tiene una energía mayor o igual que este mínimo se denomina mip (*minimum ionizing particle*), el valor de la

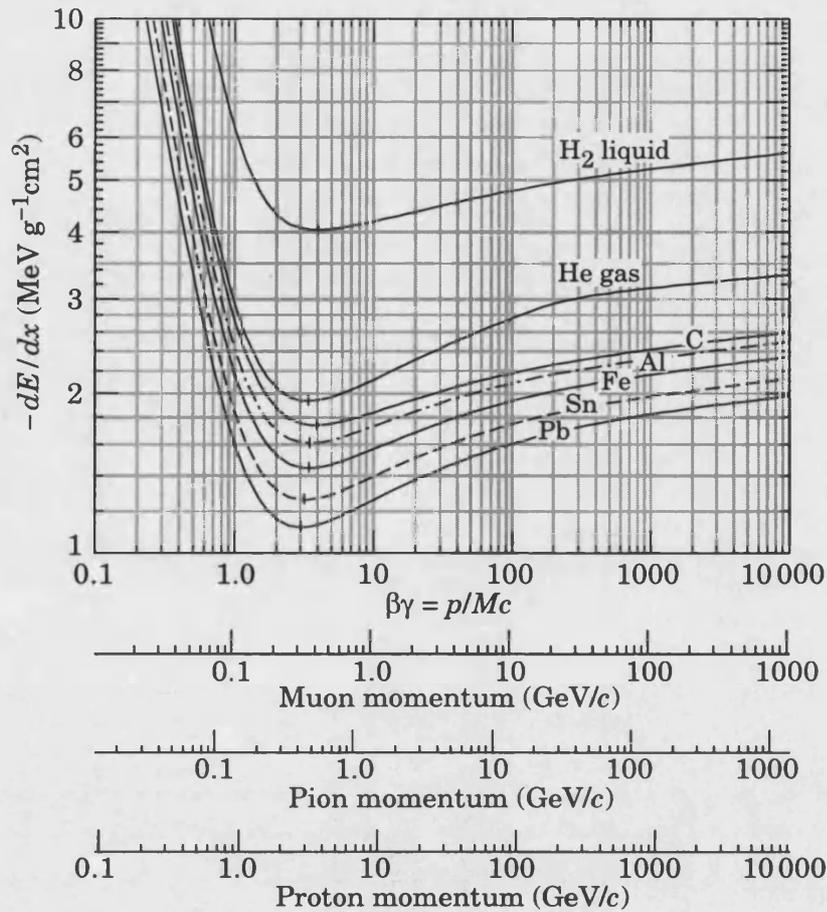


Figura 2.1: Pérdida de energía de una partícula en hidrógeno líquido, helio gaseoso, carbono, aluminio, estaño y plomo. Datos tomados del Particl Data Group [31].

energía depositada en este mínimo es una magnitud de referencia de deposición de energía para cada material detector, (ver figura 2.1).

La energía que deposita una partícula en el material sigue una distribución estadística en torno al valor descrito anteriormente. Existen efectos estadísticos que pueden hacer que la partícula deposite más o menos energía siguiendo una distribución de Poisson. Además, existen colas debido a la energía adicional que depositan electrones que son arrancados del material (ver figura 2.2). La distribución estadística de la deposición de energía en un material es pues una distribución asimétrica llamada distribución de Landau [54]. La asimetría de esta distribución hace que la media y el máximo no coincidan, nosotros nos referiremos siempre al máximo de esta distribución cuando hagamos referencia a la energía depositada por un mip.

Cuando se deposita energía en el medio, los detectores de partículas han de ser capaces de convertir esta energía en un parámetro medible, generalmente carga eléctrica. Existen técnicas directas e indirectas de realizar esta conversión, los centelleadores, por ejemplo producen fotones en cantidad proporcional a la energía depositada en el material, en este caso se requieren típicamente 100 eV [54] de energía depositada para producir un único fotón.

Para poder obtener una buena respuesta, es necesario que exista una gran cantidad de generación de señal por MeV de energía depositado. Esto permite por una parte separar adecuadamente la señal sobre el ruido que siempre está presente en la electrónica y por otra, dado que

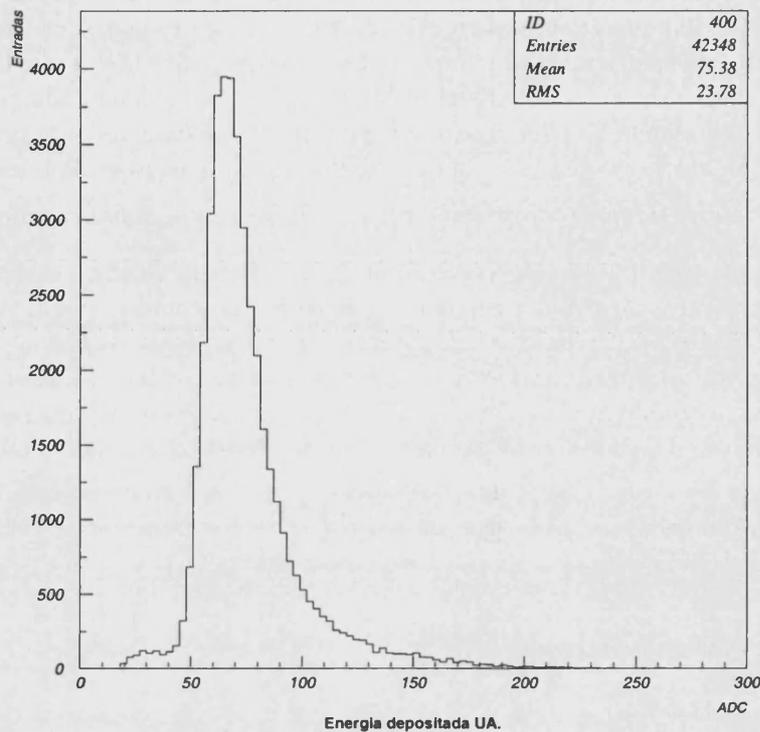


Figura 2.2: Distribución de energía depositada en un detector mostrando la forma de la distribución de Landau.

la generación de carga está sujeta a la estadística de Poisson, reducir la fluctuación estadística.

Es deseable también que el proceso de conversión a señal eléctrica, tenga una buena eficiencia para reducir al máximo los efectos estadísticos asociados a este paso. En el ejemplo del centelleador, esta conversión está regulada por una parte por la eficiencia del transporte óptico, y la eficiencia cuántica de fotoeléctrico del fotocátodo (que oscilan entre 20 % al 30 %), requiriéndose al final típicamente 500 MeV para generar un único fotoelectrón.

Si queremos recoger directamente la carga generada por la ionización de un material al paso de un mip, hemos de aplicar un voltaje. Podemos encontrarnos con tres casos dependiendo de la diferencia de energía que exista entre la banda de conducción (primera banda de energía del material con huecos¹), y la banda de valencia (última banda de energía del material con electrones):

Conductor: En éste caso, al aplicar un voltaje, la corriente que se genera va a ser siempre mucho mayor que la carga depositada que se pretende medir, puesto que las bandas de conducción y de valencia coinciden.

Al no tener mecanismo regulador de la corriente, los conductores no pueden operar como detectores de partículas.

Semiconductor: Existe poca diferencia de energía (gap) entre las bandas de conducción y de valencia, por tanto al aplicar un voltaje no se va a producir conducción, y será posible

¹Las bandas de energía, se refiere a los niveles energéticos del material en estado sólido. El origen de estas bandas se puede obtener al aplicar la ecuación de Schrödinger a un potencial periódico tal como se espera que tenga un cristal. Una descripción más detallada se puede encontrar en [55, 56]

recoger la carga generada. Presentan también la ventaja de que al no tener un gap demasiado elevado la energía para producir un electrón es muy pequeña (3,6 eV en el silicio a comparar con los 100 eV requeridos en el centelleador). El problema, como se expone en breve, es que no existen semiconductores reales a temperatura ambiente, debido a que los electrones en el cristal tienen una distribución energética que viene dada por la estadística de Fermi-Dirac, y además los semiconductores reales tienen defectos químicos y de red que hace que existan electrones en la banda de conducción (o huecos en la banda de valencia).

Los semiconductores a temperatura ambiente no pueden operar como detectores de partículas.

Aislante: El gap entre las bandas de conducción y de valencia es muy elevado. Esto tiene dos efectos en contra para poder ser empleados como detectores, por una parte la carga generada en este tipo de cristales es fácilmente atrapada de nuevo por la red, requiriendo para funcionar voltajes muy elevados y con la consiguiente pérdida de señal. Por otra parte requieren una energía de generación de carga substancialmente mayor que la que requiere un semiconductor. Típicamente se requiere más de 15 eV para generar un electrón en un aislante.

Los aislantes a temperatura ambiente pueden operar como detectores de partículas pero con baja eficiencia de recolección y generación de carga.

2.3 Unión P-N en silicio.

El silicio es un semiconductor que presenta una alta eficiencia de generación de carga (3.6 eV para producir un electrón, comparado con los 30 eV que se requieren para arrancar un electrón en un gas). La alta densidad reduce el alcance de electrones secundarios, lo cual proporciona una buena localización de la carga, y la elevada densidad del material permite que en 300 μm de material se generen típicamente $25 \cdot 10^3$ portadores (4 fC) [31].

2.3.1 Propiedades generales de los semiconductores.

Como ya hemos comentado, un semiconductor no puede trabajar a temperatura ambiente, dado que se comportan eléctricamente como metales:

- Por una parte un semiconductor siempre presenta defectos e impurezas que hacen que existan electrones en la banda de conducción (semiconductor tipo N), o bien que existan huecos [56] en la banda de valencia (semiconductor tipo P), esto hace que se comporten como metales.
- A temperatura ambiente, el número de portadores de carga que se espera tener en el semiconductor viene dado por la densidad de huecos (p) y de electrones (n) de la siguiente forma:

$$n = N_c e^{-\frac{E_c - E_f}{kT}} \quad (2.1)$$

$$p = N_v e^{-\frac{E_f - E_v}{kT}} \quad (2.2)$$

donde N_c y N_v son las densidades de estados efectivos en las bandas de conducción y valencia respectivamente (ver tabla 2.1), E_c , E_f y E_v son las energías de las bandas de conducción, del nivel de Fermi, y de la banda de valencia, k es la constante de Boltzmann

y T es la temperatura. En semiconductores intrínsecos, se cumple que $p = n$, y se llama densidad de portadores intrínsecos n_i . En un material cualquiera se define n_i como:

$$np = n_i^2 = N_c N_v e^{-\frac{E_g}{kT}} \quad (2.3)$$

donde $E_g = E_c - E_v$ se llama la energía del gap. En silicio este valor es igual a 1.11 eV.

En silicio puro, el número es $n_i = 1.45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. En un detector de 1 cm^2 y un espesor de $300 \mu\text{m}$ de espesor, el número de portadores debería ser de $4.5 \cdot 10^8$, cuatro ordenes de magnitud por encima de la señal esperada. En materiales dopados, el número de portadores puede ser ordenes de magnitud peor reduciendo aún más señal en el fondo.

Existen dos formas de mejorar la señal sobre el fondo de portadores, una es enfriar el semiconductor. Este método no es práctico, por la complejidad de enfriar el material y la práctica imposibilidad de obtener semiconductores intrínsecos. Es preferible, emplear una unión PN donde en la zona de la unión se tiene una región libre de portadores y polarizar dicha región en inversa. Idealmente la zona de depleción no proporciona corriente cuando se aplica un voltaje pero la carga depositada en dicho volumen deriva en el campo y puede ser recolectada.

Antes de describir las características de la unión PN , se va definir las nociones de movilidad del portador y resistividad del material, que están relacionadas entre sí, la movilidad μ se define como:

$$\mu = \frac{v}{E} \quad (2.4)$$

donde E es el campo eléctrico y v es la velocidad de deriva. Es un factor que describe de forma intuitiva, cual es la velocidad de un portador bajo un campo eléctrico. La resistividad de un material, ρ , está relacionada con el número de portadores positivos y negativos y su movilidad como:

$$\rho = \frac{1}{q(\mu_n n + \mu_p p)} \quad (2.5)$$

donde q es la carga del electrón, $1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ y μ_n y μ_p son las movilidades de electrones y huecos respectivamente (ver tabla 2.1). La resistividad del silicio puro a temperatura ambiente es de $235 \text{ k}\Omega\text{cm}$. La resistividad de los materiales dopados es siempre menor debido a la mayor densidad de portadores.

Si tenemos un semiconductor con las densidades de impurezas distribuidas uniformemente, la densidad de carga dq por elemento de volumen dV será 0. Si denominamos N_d la concentración de impurezas donantes y N_a la concentración de impurezas aceptoras, se tiene que:

$$\frac{dq}{dV} = q(p - n + N_d - N_a) = 0 \quad (2.6)$$

substituyendo de las ecuaciones (2.1) y (2.2) en (2.6), obtenemos la concentración de electrones en un semiconductor de tipo N :

$$n = \frac{1}{2} \left(N_d - N_a + \sqrt{(N_d - N_a)^2 + 4n_i^2} \right) \quad (2.7)$$

Tabla 2.1: Propiedades físicas del silicio a temperatura ambiente

Propiedad	Valor
Número atómico	14
Peso atómico	28.8
átomos	$4.99 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$
Densidad	2.44 g/cm^3
Constante dieléctrica	11.7
Energía del gap	1.11 eV
N_c	$2.8 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
N_v	$1.04 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
Movilidad del electrón	$1350 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
Movilidad del hueco	$480 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
Constante de difusión del electrón	$34.6 \text{ cm}^2/\text{s}$
Constante de difusión del hueco	$12.3 \text{ cm}^2/\text{s}$
Densidad de portadores intrínseca	$1.45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
Resistividad intrínseca	235 kΩcm
Punto de fusión	1688 K
Coefficiente de expansión	$2.5 \cdot 10^{-6}/\text{K}$
Voltaje de ruptura	$30 \text{ V}/\mu\text{m}$

y para semiconductores de tipo P :

$$p = \frac{1}{2} \left(N_a - N_d + \sqrt{(N_a - N_d)^2 + 4n_i^2} \right) \quad (2.8)$$

Se sigue que cuando la concentración de impurezas $|N_d - N_a|$ es mucho mayor que la concentración de portadores intrínsecos N_I , entonces $n = N_d - N_a$ y $p = N_a - N_d$. Generalmente un tipo de impurezas es dominante sobre el otro, así la resistividad de un material con un tipo de impurezas $N_d > N_a$, se obtendría la siguiente expresión para la resistividad:

$$\rho = \frac{1}{q\mu N_d} \quad (2.9)$$

2.3.2 Unión PN.

Para describir la unión PN , definimos un cristal de tipo P como aquel que el número de dopantes que generan aceptores de electrones en la red (elementos del grupo III) predomina sobre el los dopantes que generan electrones (elementos del grupo V), y un cristal de tipo N a la inversa.

Normalmente se puede generar una unión de tipo PN difundiendo dopantes de tipo P en un cristal de tipo N , o bien al revés. Esta concentración de huecos en la zona P y electrones en la zona N , hace que exista una migración de portadores a través de la zona intermedia, hasta que se llegue a una situación de equilibrio.

El equilibrio se alcanza pues el sistema aislado no puede mantener indefinidamente el flujo de corriente. Cuando se llega al estado de equilibrio dependiendo de la pureza del material y asumiendo que $N_a, N_d \gg n_i$, el voltaje generado [57] se puede calcular como:

$$V_d = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) \quad (2.10)$$

Este potencial V_d se llama potencial intrínseco y es del orden de pocos cientos de milivoltios.

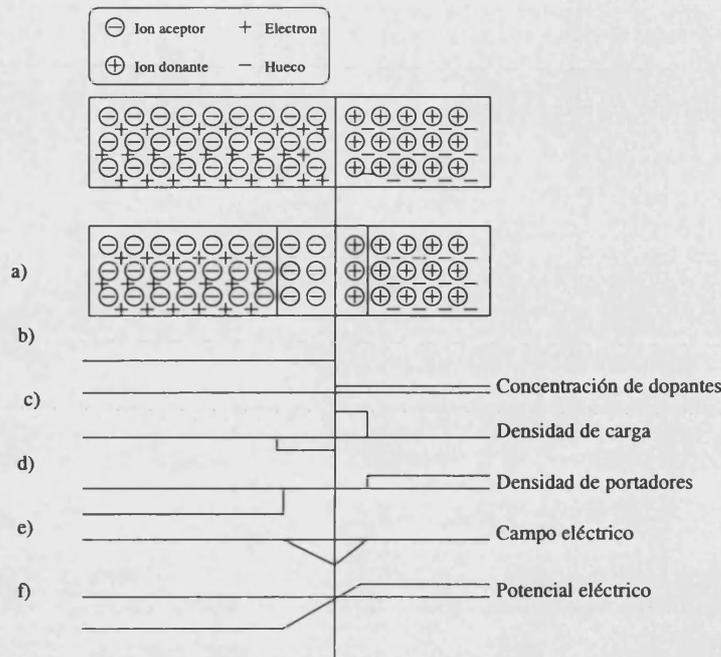


Figura 2.3: Concentraciones de dopante, densidades de carga, portadores, configuraciones de campo y potencial en una unión PN.

En la zona de depleción se tiene un volumen sin portadores en un campo eléctrico, así si partícula pasa por esta zona y genera carga eléctrica, esta carga será recolectada en los extremos de la unión donde se recombinará, y finalmente se perderá. Si incrementamos la anchura de la zona sin carga, se incrementará igualmente la señal recolectada. Es posible aplicando una diferencia de potencial externa V_{bias} del mismo signo que V_d .

Se puede estimar en una dimensión el potencial y campo eléctrico empleando la ecuación de Poisson. Para calcular el campo eléctrico, la densidad de carga cuando se ha producido la migración de electrones es $-qN_a$ para la zona de tipo P y qN_d para la zona tipo N. Como el conjunto es neutro, se tiene que:

$$N_a \cdot W_1 = N_d \cdot W_2 \tag{2.11}$$

donde W_1 y W_2 son las anchuras de la zona de depleción en la zona P y en la zona N respectivamente. De esta forma la ecuación de Poisson queda como:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} = \frac{qN_a}{\epsilon} \tag{2.12}$$

donde ρ es la densidad de carga y ϵ es la constante dieléctrica. Integrando dos veces, y dejando como condiciones de ligadura que cuando $x = -W_1$, campo eléctrico y potencial son cero, se obtiene:

$$V = \frac{qN_a}{\epsilon} \left(\frac{x^2}{2} + W_1x + \frac{W_1^2}{2} \right) \tag{2.13}$$

La figura 2.3 muestra la distribución de campo eléctrico y potencial en una unión polarizada en inversa.

En ambos lados de la unión se puede obtener el potencial como:

$$V_1 = \frac{qN_a W_1^2}{2\epsilon} \quad (2.14)$$

y

$$V_s = \frac{qN_d W_2^2}{2\epsilon} \quad (2.15)$$

El potencial de *bias* es entonces:

$$V_b = V_1 + V_2 = -\frac{q}{2\epsilon}(N_a W_1^2 + N_d W_s^2) \quad (2.16)$$

Es más interesante conocer la anchura de la capa de depleción como función de la diferencia de potencial de la unión.

$$W_1 = \sqrt{\frac{2\epsilon V_b}{qN_a(1 + N_a/N_d)}} \quad (2.17)$$

$$W_1 = \sqrt{\frac{2\epsilon V_b}{qN_d(1 + N_d/N_a)}} \quad (2.18)$$

En la práctica la unión *PN* se realiza con uno de las dos partes dopada en exceso comparado con la otra. Esto es así por dos motivos:

- La unión *PN* se tiene que conectar externamente a un metal, aunque no se va a discutir aquí conviene que la unión se realice con cristal altamente dopado.
- En el caso de detectores de silicio nos interesa que los strips, como se comentará en adelante sean conductores cuando el detector está deplecionado para poder recolectar la carga.

De esta forma si por ejemplo tomamos una unión *PN* de las siguientes características: $N_a = 10^{15}$ y $N_d = 5 \cdot 10^{12}$ se obtiene para el silicio $W_1 = 0.4\mu m$ y $W_2 = 300\mu m$, cuando se aplica un V_b de 100 V. En este caso, el volumen activo lo proporciona la zona *N* y la zona *P* es necesaria para conseguir mantener la zona libre de carga.

Existe una corriente de generación de carga debido a la energía térmica que tiene el material. Esta energía genera constantemente pares electrón hueco que no se pueden recombinar debido a la presencia de campo eléctrico. Existen dos mecanismos de generación de carga en la zona, por una parte j_{gen} llamada corriente de generación, que es la corriente que se genera térmicamente en la zona de depleción, y j_{dif} , que es la corriente originada debido al número de portadores libres en la red. En la zona de depleción (libre de portadores) $j_{dif} < j_{gen}$, por tanto:

$$j_{gen} = \frac{1}{2}q \frac{n_i}{\tau_o} W \quad (2.19)$$

donde τ_o es la vida media efectiva de portadores minoritarios en la zona de depleción, que por efectos de campo eléctrico no es la misma que en la zona neutra.

Esta corriente es inversamente proporcional a $\sqrt{V_{bias}}$. La dependencia con la temperatura viene de n_i . Es posible calcular que un incremento de 8 K en la temperatura aumenta en un factor 2 la corriente de generación. Por tanto para una correcta operación es importante mantener la temperatura constante.

Para calcular la capacidad del la región de depleción, tomamos:

$$C = \frac{dQ}{dV_b} = \frac{dQ}{dW_1} \frac{dW_1}{dV_b} \quad (2.20)$$

El incremento de carga que aparece en la unión PN es resultado del incremento de la región de depleción dW , causado por un incremento de voltaje dV_s . Se sigue:

$$dQ = qN_d dW_2 \quad (2.21)$$

Diferenciando la ecuación (2.16), se tiene que:

$$\frac{dW_2}{dV_b} = \sqrt{\frac{\epsilon}{2qN_d(1 + N_d/N_a)V_b}} \quad (2.22)$$

substituyendo (2.23) y (2.22) en (2.20) se obtiene:

$$C = \sqrt{\frac{q\epsilon N_a N_d}{2(N_a + N_d)V_b}} \quad (2.23)$$

en el caso de que $N_a > N_d > n_i$ se tiene:

$$C = \sqrt{\frac{\epsilon}{2\mu\rho V_b}} \quad (2.24)$$

La variación de capacidad en la unión PN depende con el voltaje de depleción como $1/\sqrt{V_b}$ hasta el valor en que la zona de depleción ocupa todo el detector, pues en esta zona un incremento del voltaje no incrementa la carga.

2.4 Detectores de trazas.

El empleo de silicio nos proporciona como hemos visto un medio capaz de generar y recolectar carga al paso de una partícula cargada. Un detector de silicio ha de estar diseñado para que nos permita realizar medidas de precisión, ello implica:

- Segmentar el detector de forma que la generación de carga se recolecte en poco espacio para poder contar con una buena resolución espacial.
- Obtener una señal bastante mayor que el nivel de ruido, para poder obtener información acerca de la partícula.

En esta sección se explicará como se puede hacer frente a estos dos requerimientos.

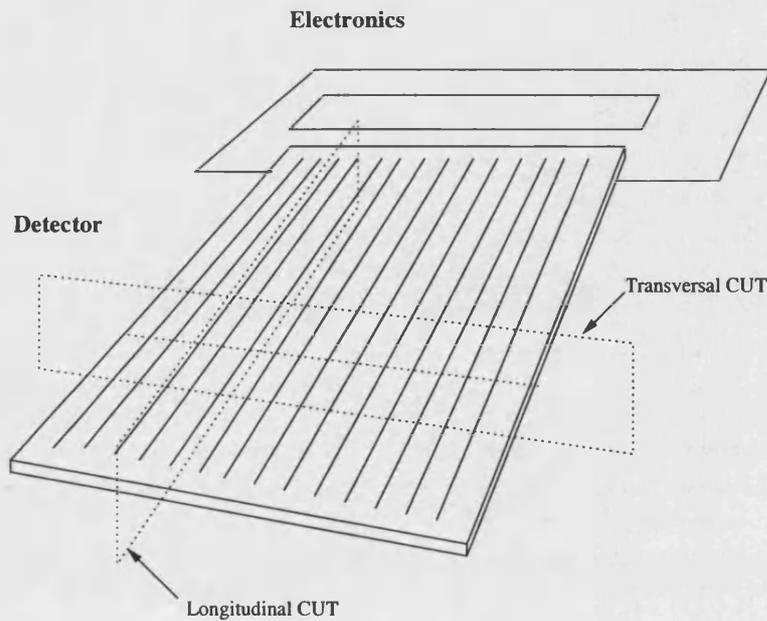


Figura 2.4: Esquema general de un detector de silicio. Se muestra el significado de los cortes transversales y longitudinales del detector con relación a la dirección de los *strips*.

2.4.1 Detectores de silicio de acoplamiento directo.

Vamos a empezar la descripción del funcionamiento de los detectores de silicio basándonos en el tipo de detectores más simples que podemos tener, es decir detectores de acoplamiento directo DC. Esta descripción acerca del funcionamiento básico de un detector de *microstrip* nos servirá de base para realizar una descripción de los parámetros que afectan a la respuesta.

La figura 2.5 muestra un corte transversal de un detector de silicio de tipo DC. Éste es un detector de tipo *N* con *strips* implantados en el sustrato de tipo *P*. Sobre cada *strip* se sitúa un elemento conductor generalmente aluminio. Éste tiene por misión conducir la carga producida en el detector tras el paso de una partícula a los amplificadores. Asimismo, al estar esta parte conectada al implante P^+ , produce el efecto de mantener toda esta región a un mismo potencial ($V=0$), consiguiendo la depleción entre la zona *P* y la zona *N* (V_{bias}) del detector.

Por convención cuando se haga referencia a la disposición de dopantes en el detector primero nos referiremos al tipo de dopante del *strip* y después al tipo de dopante del sustrato. En este caso el detector descrito es de tipo P^+N .

La carga es generada en la zona de depleción por el paso de una partícula. Debido al efecto del campo eléctrico creado entre el *strip* y la parte posterior del detector (*backplane*). La carga es recolectada en este caso por el *strip* o *strips* más próximos a la partícula, debido a la segmentación que produce el campo eléctrico en esta configuración.

2.4.2 Resolución espacial.

Uno de los parámetros principales que se buscan en un detector de silicio es la resolución espacial. Con el esquema del detector descrito en 2.4.1 vamos a establecer cuáles son los parámetros que afectan a dicha resolución (estos parámetros son los mismos que se pueden aplicar a detectores de tipo AC que se explicarán posteriormente).

Definiremos la resolución espacial del detector como la desviación típica entre la posición de la partícula predicha por el detector con la posición real de paso de la partícula, cuando ésta

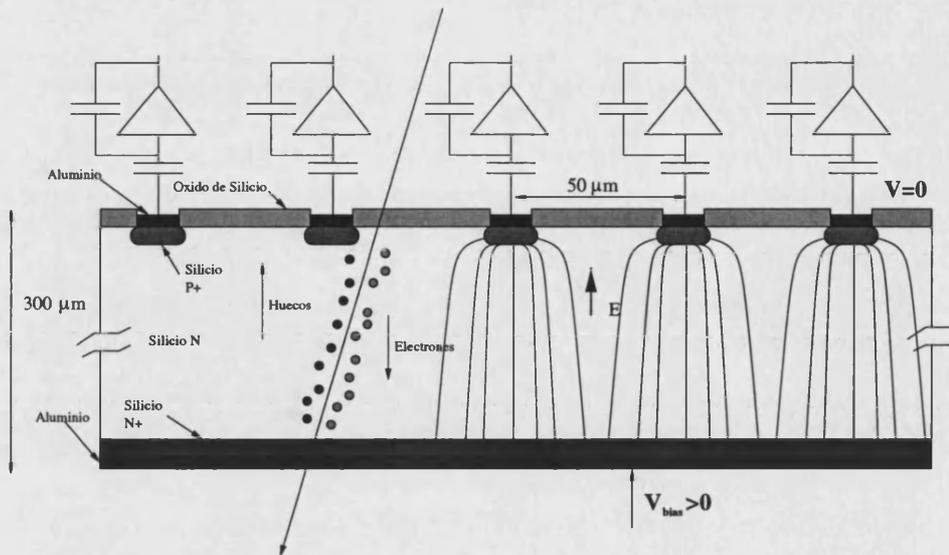


Figura 2.5: Esquema de transversal de un detector de microstrip de silicio de acoplo directo mostrando todos los elementos relevantes del detector.

incide normalmente a la superficie.

Los factores que influyen en esta resolución son múltiples, y van desde las propiedades eléctricas, mecánicas del detector hasta propiedades estadísticas intrínsecas y diseño del algoritmo de reconstrucción (errores sistemáticos).

2.4.2.1 Limitaciones independientes del diseño.

Existen dos parámetros que influyen más claramente en la resolución y que no es posible controlar debido a que forman parte del proceso físico del paso de la partícula en un medio:

Deposición de energía: Como ya se ha explicado, la energía que deposita una partícula al atrevesar un medio, sigue la distribución de Landau (ver figura 2.2). Las colas de alta deposición de energía corresponde a electrones energéticos arrancados de la red, llamados rayos delta. Estos electrones contribuyen a extender la señal $5 \mu\text{m}$, de forma aleatoria del centro del paso de la partícula. Al ser de electrones de baja energía (ver figura 2.1), la deposición de energía en el cristal es considerablemente mayor que la que deposita un mip.

La probabilidad de creación de rayos delta en un detector de $300 \mu\text{m}$ es del 10 %.

Difusión de la carga La deposición de carga producida por un mip, se distribuye sobre la trayectoria alrededor de un cilindro de $0.5 \mu\text{m}$ [58] de radio. Los electrones migrarán a la zona *N* del detector y los huecos se recolectarán en la zona *P*.

Para un voltaje típico de 100 V se tiene que la velocidad de deriva para electrones y huecos es respectivamente de $4.45 \mu\text{m/s}$ $1.6 \mu\text{m/s}$. La difusión producida al realizar la recolección de carga de estos electrones será pues:

$$\frac{dN}{N} = \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}} dt \quad (2.25)$$

Así la dispersión será:

$$\sigma = \sqrt{2Dt} \quad (2.26)$$

donde a una distancia x del punto de ionización $\frac{dN}{N}$ es la fracción de portadores encontrados en el elemento dx después de un tiempo t . D es el coeficiente de difusión que está relacionado con la movilidad del portador en Silicio μ . En ésta ecuación t depende de la distancia donde se generó la carga al strip y es una convolución de ésta con la carga.

Dado que v depende del voltaje V_{bias} aplicado, es clara la influencia de éste con la resolución. Sin embargo, a diferencia del proceso anterior éste presenta un comportamiento homogéneo en todos los sucesos. Si se realiza medida de la carga en los strips es posible interpolar la posición con mejor precisión al ponderar la carga entre dos strips. Incrementar el campo eléctrico en este caso al disminuir la dispersión de esta carga quiere decir reducir esta influencia, resultando una peor resolución.

Por debajo del voltaje de depleción la resolución se deteriora igualmente al no poder recogerse la carga por completo.

2.4.2.2 Limitaciones dependientes del diseño.

En el diseño de un detector de silicio uno de los factores que más influye en la resolución es la distancia entre strips. Dado que en los detectores de silicio no existe amplificación, la relación señal ruido que nos encontramos varía desde 15:1 (detector de DELPHI) a 70:1 en detectores con diseño y electrónica muy optimizados. Es por éste motivo por lo que no interesa la dispersión de esta señal en más de dos strips, dado que ello significaría llevar el valor de la señal a niveles similares al ruido.

En el caso de que un único strip recibiera señal, la resolución que obtendríamos vendría determinada por:

$$\sigma = \frac{\lambda}{\sqrt{12}} \quad (2.27)$$

donde λ es la distancia entre strips. Para un suceso con dos strips la resolución es siempre mejor que la predicha para un único strip, y puede ser interpolada usando la relación de señales entre ambos.

El algoritmo más simple que podemos emplear para calcular la resolución espacial es la media de las cargas. Definimos η :

$$\eta(x) = \frac{Q_A}{Q_A + Q_B} \quad (2.28)$$

donde Q_A y Q_B son las cargas recogidas entre ambos strips, es decir la carga de el primero de los strips afectados normalizado por la carga total recolectada.² Esta función depende de la posición de la partícula entre ambos strips, por tanto, si esta distribución no es lineal a la posición de esta entre los centros de los strips, y conocemos como varía dicha función podemos decir que:

$$x_{traza} = x_A + x(\eta) \quad (2.29)$$

²Para poder trabajar y medir resoluciones los *strips* se ordenan de acuerdo a la posición que tienen. La posición viene dada pues por una función que relaciona las coordenadas espaciales con el *strip* particular que tiene señal

Para detectores con distancias entre strips de $50 \mu\text{m}$ y asumiendo una distribución de cargas de $10 \mu\text{m}$, uno puede esperar que $2/5$ de la carga se va a distribuir entre dos strips. Añadiendo un strip intermedio sobre el que no se realice lectura, se puede esperar que $4/5$ de las trazas van a dar señal entre ambos strips. Este diodo intermedio añade un beneficio adicional al permitirnos un campo eléctrico más uniforme cerca de las inmediaciones del strip. En el caso de infinitos diodos intermedios seríamos capaces de obtener el campo eléctrico de un condensador ideal, en cuyo caso la aproximación lineal sería más válida, es decir $x(\eta) = \lambda \cdot \eta$.

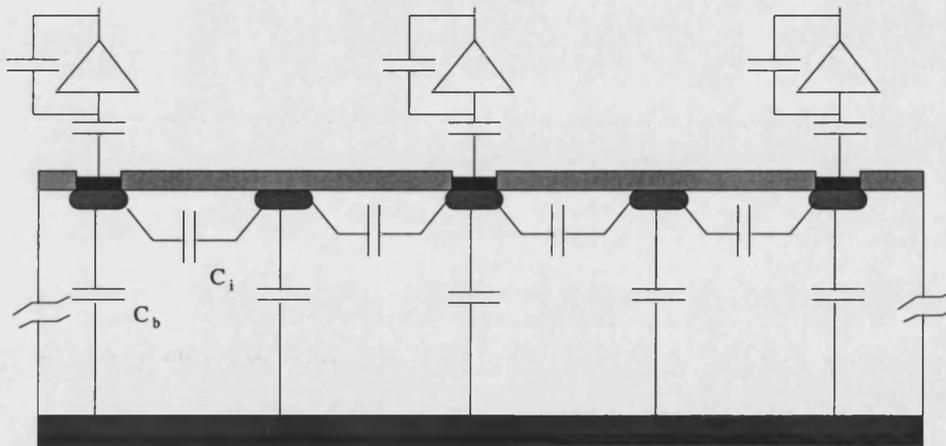


Figura 2.6: Circuito equivalente a primer orden de un detector de silicio con strip intermedio.

Parece pues que se mejoraría la resolución con el incremento de strips intermedios, sin embargo cada strip intermedio tiene un camino de vuelta al backplane (C_b), que forma un circuito por donde se pierde carga. Estas capacidades incrementan en paralelo mientras que como se ve en la figura 2.6.

Incrementando el número de strips intermedios produce el efecto de pérdida de carga. Así pues la capacidad del strip con el plano posterior ha de ser mucho menor que la capacidad entre strips para minimizar este efecto.

2.4.3 Factores externos.

Una de las aplicaciones fundamentales de los detectores de silicio en ATLAS además de la medida de vértices es la medida de momento de partículas. Éste se mide midiendo la curvatura de la traza en el seno de un campo magnético que está relacionado, utilizando la relación:

$$p = B \cdot q \cdot R \quad (2.30)$$

donde B es el campo magnético, q es la carga de la partícula y R es el radio de curvatura que en este caso es la medida que proporcionan los detectores de silicio.

Es obvio pues que para la realización de esta medida los detectores han de estar sometidos a campo magnético, que sirva de espectrómetro.

Vamos a suponer que existe un campo magnético \vec{B} incidiendo en la dirección del *strip* del detector, que está polarizado con un campo eléctrico \vec{E} tal como se representa en la figura 2.7.

El campo eléctrico proporciona un momento efectivo al portador p , el portador por efecto del campo eléctrico recibe una fuerza perpendicular a su desplazamiento, que hace que se quede en equilibrio con la fuerza del campo eléctrico proporcionando un ángulo θ con la superficie del detector durante todo el camino de la traza.

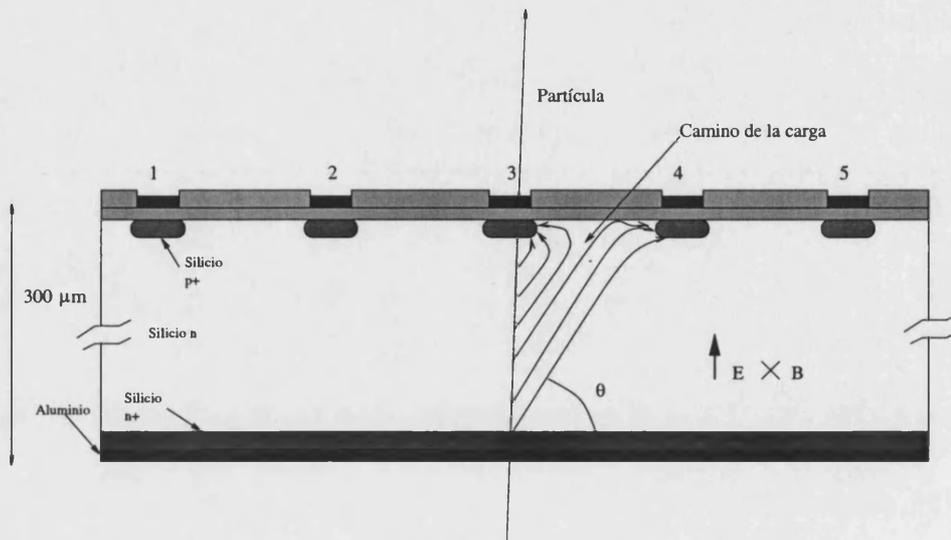


Figura 2.7: Explicación del efecto del ángulo de Lorentz θ . La traza de la partícula pasa por el *strip* numerada como 3, sin embargo el efecto del campo magnético B en la dirección del *strip* dispersa la carga de forma que el *strip* numerada como 4 recibe carga adicional.

Este efecto depende pues del campo eléctrico de polarización del detector así como campo magnético y de la masa efectiva del portador en la red (diferencias entre electrones/huecos). Se puede minimizar girando el detector en ángulo opuesto al ángulo de Lorentz.

2.4.3.1 Ruido.

Un factor adicional que influye en la resolución espacial del detector lo tenemos en el ruido que se produce en todos los elementos del detector. Las fuentes de ruido aparecen tanto en el detector como en los distintos elementos de la cadena electrónica. Las principales causas de ruido han de cuantificarse teniendo en cuenta que la cadena electrónica asociada a dichos dispositivos es sensible a la carga. Estas son:

Ruido de Johnson: Es el que proviene del ruido térmico. Es un *ruido blanco* es decir la potencia de ruido no está correlacionada. por que la potencia de ruido por Hertzio es constante. La rms del voltaje generado en un circuito abierto con una resistencia depende de la temperatura T como:

$$\sigma_V = \sqrt{4kTRB} \quad (2.31)$$

donde k es la constante de Boltzman R es la resistencia y B es el ancho del *strip* considerado. Se puede reducir esta contribución al ruido reduciendo la temperatura del detector siempre que sea posible.

Ruido esporádico: Proviene de la naturaleza discreta de los portadores en el semiconductor. Esta corriente se debe a un proceso estadístico asociado a la distribución de Poisson. La rms de una corriente I viene dada por:

$$\sigma_I = \sqrt{2qIB} \quad (2.32)$$

donde q es la carga del portador.

Ruido Flicker: Se debe a la calidad de los componentes así como las uniones entre estos. Su dependencia con la frecuencia ω sigue la ley de $1/\omega$. El origen se debe a variaciones poissonianas en la conductividad entre componentes. Este ruido se ve reducido manteniendo la limpieza de los componentes y la calidad en los procesos de unión durante la fase de montaje.

Interferencias: Estas fuentes externas de ruido se deben a la presencia de distintos elementos electrónicos que radían por inducción electromagnética. El efecto de estas fuentes se reduce a través de filtros, diseño y el diseño óptimo de las tierras del detector

Debido a que la electrónica de los detectores de silicio es sensible a la carga es conveniente expresar estas fuentes de ruido en magnitudes más adecuadas, es decir en número de portadores *cargas de ruido equivalente* (en adelante ENC).

Esta magnitud nos sirve para comparar con la carga producida por una partícula. A mínimo de ionización (*mip*) produce una media en silicio de 108 pares electrón hueco por micra de material atravesado. De esta forma para un espesor típico de $300 \mu\text{m}$ se espera que el pico de la distribución de Landau corresponda a aproximadamente 25.000 electrones. Manteniendo este señal esperada lo que tratamos es de calcular cual es entre la relación señal S y el ruido σ_{total} esperado. En modo de operación normal el el ruido total es una convolución del ruido que proviene de la electrónica con el ruido que proviene del detector:

$$\sigma_{total} = \sqrt{\sigma_{det}^2 + \sigma_{elec}^2} \quad (2.33)$$

La capacitancia del detector en un strip individual C_s , es una carga efectiva en el preamplificador. Esta contribuye al ruido para este canal de la siguiente forma:

$$ENC_{capacitancia} = A + B \cdot C_s \quad (2.34)$$

donde A y B son constantes propias de cada amplificador, en términos de ENC. Expresada en estos mismo términos, podemos reescribir las expresiones (2.31) y (2.32), en término de I_l o corriente de fugas:

$$ENC_R = \frac{e}{q_e} = \sqrt{\frac{kT}{R}} \quad (2.35)$$

$$ENC_I = \frac{e}{q_e} = \sqrt{\frac{q_e I_l T}{4}} \quad (2.36)$$

donde q_e es la carga del electrón, T es la temperatura absoluta, e es la base del logaritmo natural, y k es la constante de Boltzman.

2.4.4 Detectores de silicio de acoplo alterno.

Para poder recoger de forma eficiente la carga los detectores de tipo DC descritos anteriormente han de disponer de un condensador de entrada que permita la entrada de carga producida por el paso de una partícula de forma eficiente. Existen otro tipo de detectores donde en el diseño se

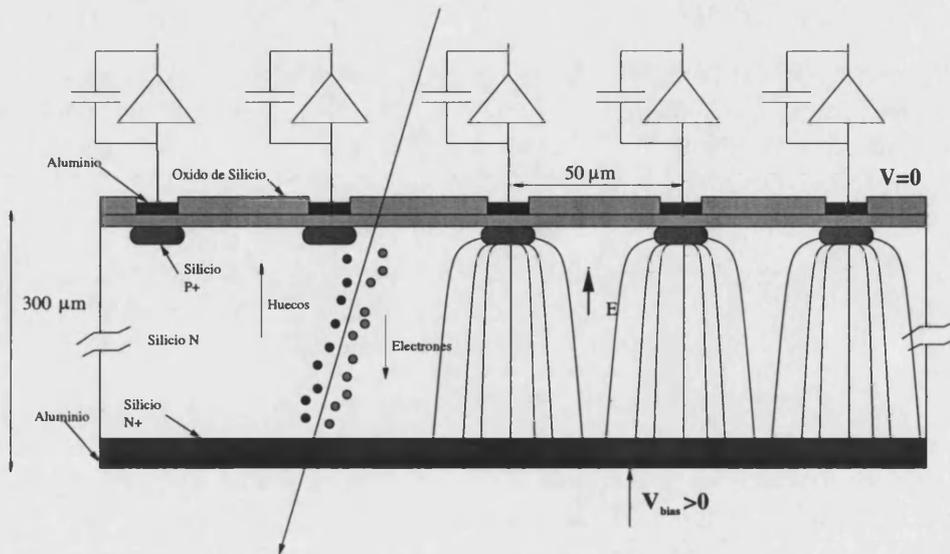


Figura 2.8: Esquema transversal de un detector de microstrip de silicio de acoplo alterno mostrando todos los elementos relevantes del detector.

incluye dentro del mismo detector este capacitor. Estos detectores son los que vamos a describir a continuación y que denominaremos de tipo AC.

En la figura 2.8 tenemos un corte transversal de un detector de silicio de tipo AC. La ventaja que presenta este diseño es que de esta forma se reduce el tamaño de la electrónica al no requerir volúmenes para los condensadores de entrada, y la capacidad de entrada es proporcional con el tamaño del detector. Si la permitividad electrostática del óxido de silicio es de 0.34 pF/cm , para un strip de anchura $10 \text{ } \mu\text{m}$ con un óxido de silicio de 200 nm , la capacidad que se tiene es de 17 pF por centímetro de longitud. Si la capacidad entre *strips* para un detector de $50 \text{ } \mu\text{m}$ entre *strips* es alrededor de 1.1 pF/cm , la capacidad de acoplo entre la electrónica es suficientemente mayor que la capacidad entre *strips*, para mejorar la recolección de carga.

A diferencia de los detectores DC, en estos se ha de implementar un sistema adicional de polarización del detector dado que los *strips* no están conectadas a la tierra de la electrónica. Existen dos formas más comunmente empleadas para realizar la polarización del detector:

Resistencias de Polisilicio: Es decir los implantes se conectan independientemente a un potencial común a través de resistencias de *polisilicio*. Este sistema presenta bastante estabilidad a la radiación pues ésta, no afecta de forma apreciable a sus propiedades. Sin embargo requiere de un incremento en el número de procesos para su realización, y con ello de coste.

Polarización FOXFET: Este proceso simplifica la construcción del detector sin embargo requiere durante su funcionamiento de un potencial extra aplicado en la base. Este potencial depende del número de portadores medio de cada detector, por tanto depende de la radiación a que haya sido sometido el detector, por tanto no es un método de polarizar el detector que sea estable en detectores sometidos a radiación.

Resistencias de polisilicio

El polisilicio es un estado amorfo de silicio. Este estado igual que el estado análogo del carbono presenta una característica IV conforme a la ley de Ohm. Durante el proceso se añaden

estructuras de polisilicio que conectan los implantes introducidos en el silicio con una tierra común.

Las figuras 2.9 y 2.9 muestran en dos ejes distintos como se efectúa dicha tecnología en estos detectores.

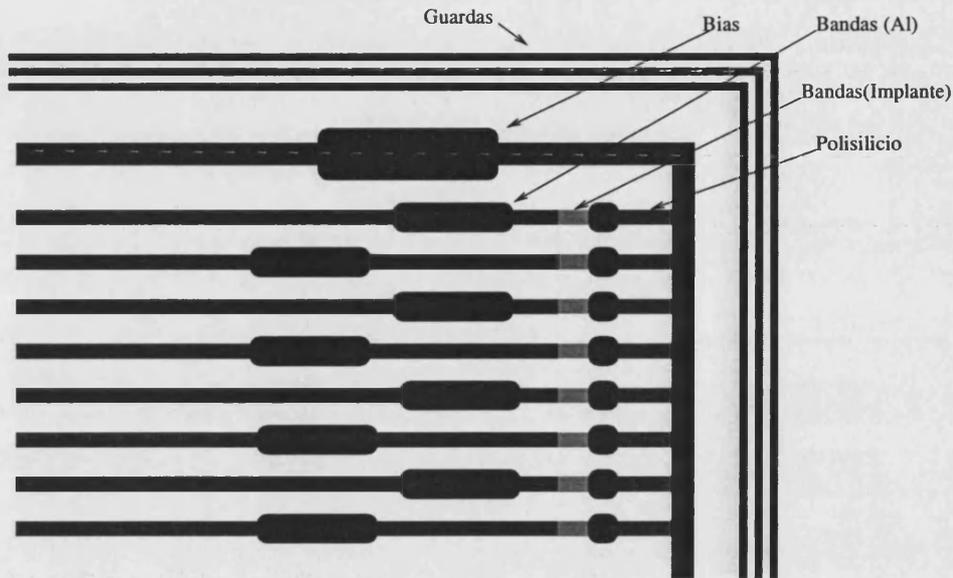


Figura 2.9: Vista superior de una esquina mostrando los elementos de un detector polarizado con implantes de polisilicio.

Polarización FOXFET.

Lo que trata de obtener es un efecto de transistor de forma que manteniendo un voltaje fijo en el emisor (figura 2.12) seamos capaces de hacer que en los *strips* aparezca un voltaje que viene modulado por la diferencia de potencial entre la base y el emisor de esta estructura de transistor.

Es de notar que en esta tecnología el voltaje que aparece en los *strips* depende de la diferencia de potencial que se introduzca en la base y del número de portadores de cada una de las estructuras $P - N - P$ del circuito. Debido a que los daños en la red causados por la radiación modifica el número de portadores para poder mantener el voltaje en los *strips* se tendría que modificar la diferencia de potencial aplicada en la base si queremos mantener los *strips* siempre al mismo voltaje. Debido a este efecto de la radiación este procedimiento no es óptimo para detectores que tengan que ser irradiados pues aumenta la complejidad de la electrónica de alimentación.

2.5 Nuevas tecnologías.

Hasta ahora se ha descrito los principios generales de funcionamiento de los detectores de silicio de tipo AC o de tipo DC, así como los factores fundamentales que se aplican en su funcionamiento. Vamos a pasar a describir algunas técnicas relacionadas con estos detectores de reciente incorporación.

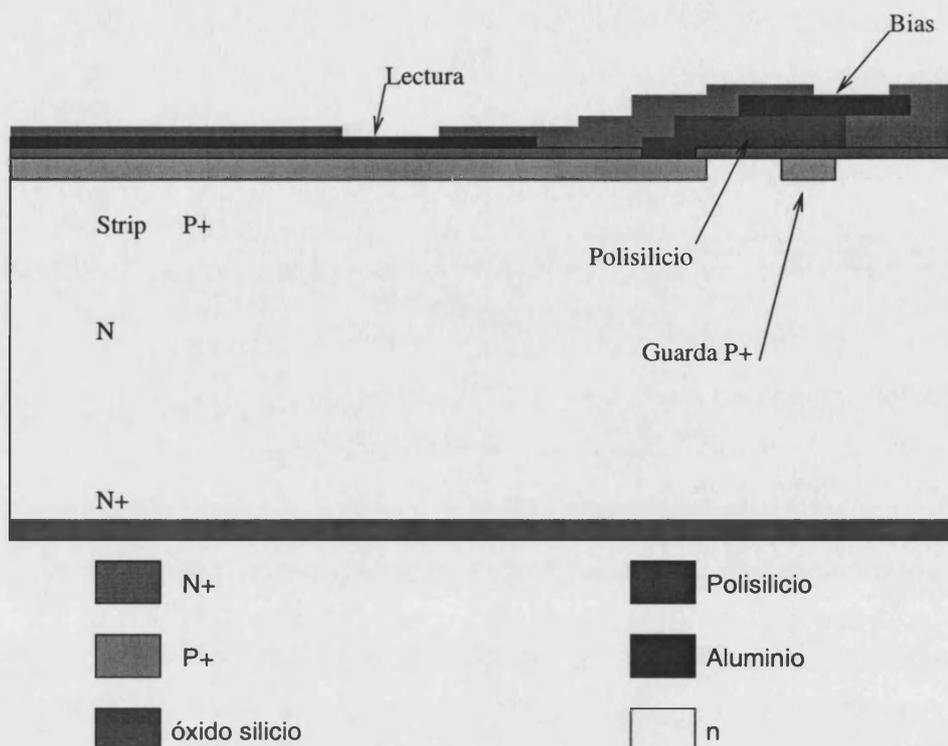


Figura 2.10: Corte de un detector mostrando la disposición de la alimentación del detector con estructuras de polisilicio en un detector de tipo p^+n .

2.5.1 Detectores de doble cara y detectores N^+N .

Hasta ahora nos hemos centrado básicamente en detectores de tipo P^+N el motivo por el que nos hemos centrado en este tipo de detectores consiste básicamente en que el sustrato en el que se crece el silicio es en general de tipo N pues es más fácil obtener cristales de silicio de tipo N con un número reducido de portadores (10^{11} portadores/cm³).

Para poder obtener detectores de lectura por las dos caras en los últimos años se han realizado enormes avances en la segmentación del campo en la N^+ del detector. El objetivo inicial ha sido encontrar un detector capaz de dar las dos coordenadas simultáneamente del paso de la partícula. Este tipo de detectores ha sido emplado con éxito en diversos detectores de LEP así como en TevaTrón [52, 59–87].

Los problemas que se plantean al tratar de leer strips de tipo N^+ en un sustrato N es que ambas zonas son conductoras del mismo tipo de portador de carga (electrones). Esto produce que los canales se conecten entre sí. Este problema se incrementa en los detectores de tipo AC puesto que el óxido de silicio, necesario para crear el capacitor, tiende a acumular cargas positivas. Estas cargas positivas atraen electrones de la red dentro del sustrato impidiendo la depleción al completo del detector y conectando entre sí los *strips*.

En la actualidad existen dos técnicas de separación de los *strips* N^+ con el sustrato N . Estas son:

Separación electrostática: Consiste en extender la anchura del *strip* metálica donde se realiza la lectura más allá de los límites del *strip* dopada en el sustrato. Aplicando un voltaje negativo, se produce el efecto de eliminar las cargas negativas que se acumulan en el sustrato de silicio desconectando los *strips* y permitiendo la depleción total del detector.

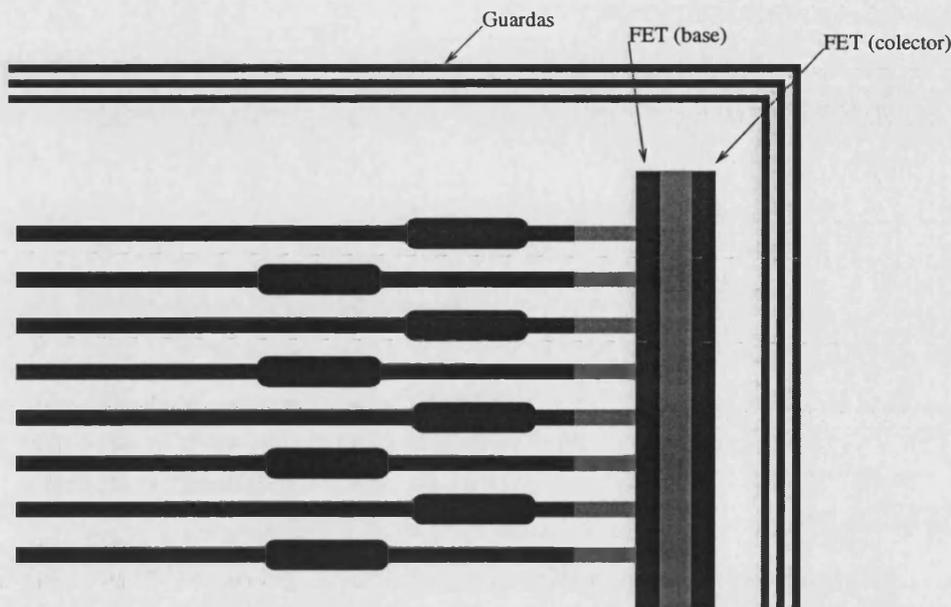


Figura 2.11: Vista de una esquina mostrando los elementos de un detector polarizado con el efecto foxfet.

Presenta el inconveniente de que el voltaje que hay que aplicar varía con el número de portadores presentes en la red y este número cambia con la dosis de radiación recibida siendo pues un método que no es resistente a la radiación.

Separación por dopantes: La idea de este sistema es separar los *strips* realizando la implantación entre los *strips* N^+ de *strips* P^+ , que cortan la comunicación de los electrones a través del sustrato N . Como requiere un implante de tipo P^+ adicional y por tanto de un procesamiento adicional, esta técnica resulta más cara que la separación electrostática.

Estas técnicas han permitido desarrollar detectores de una cara con *strips* N^+ en sustrato N [85, 88].

Las ventajas que pueden ofrecer estos detectores son:

- La recolección de electrones en vez de huecos (pulso más rápido debido a la mayor movilidad de los electrones en la red).
- Obtener detectores con una mayor resistencia a la radiación. En efecto, el daño producido por la radiación se traduce en un incremento en el número de portadores en la red, tanto huecos como electrones. Debido a la naturaleza de estos daños los defectos producidos en la red tienden a aumentar los portadores positivos respecto a los portadores negativos, esto lleva consigo el que el sustrato N acabe convirtiéndose en P .

El tener *strips* de tipo N^+ en esta situación produce que con el paso del tiempo se tengan detectores de tipo N^+P .

2.5.2 Detectores de anchura variable.

El funcionamiento óptimo de los detectores de *microstrips* se obtiene cuando la partícula que detectamos incide lo más perpendicular posible al detector. En la mayoría de las aplicaciones es posible encontrar una combinación utilizando una orientación paralela de los *strips* se obtenga la medida más directa de la coordenada que es relevante para la física.

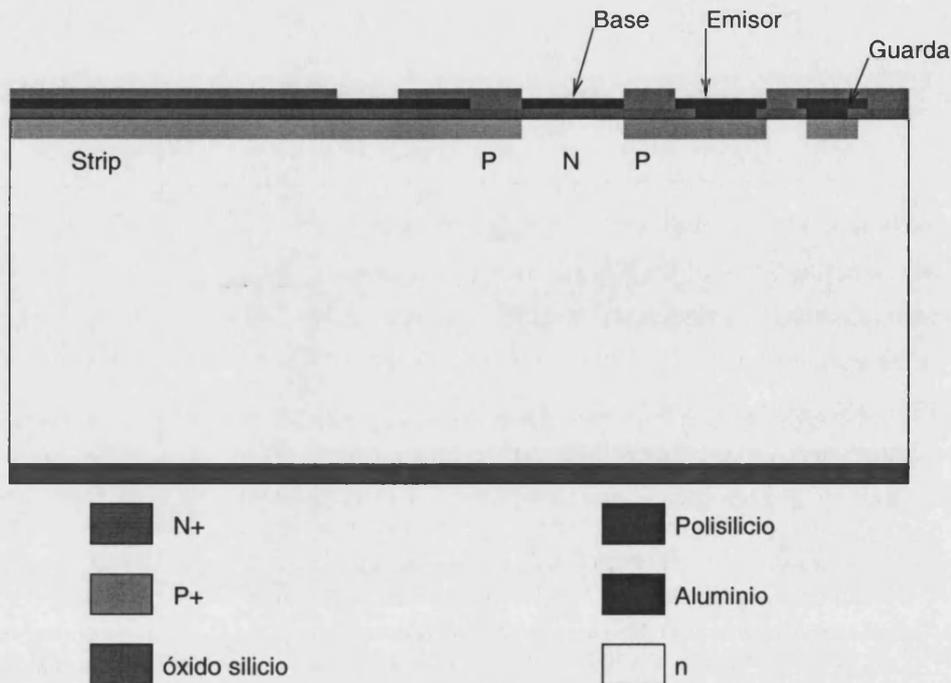


Figura 2.12: Corte de un detector mostrando la estructura de transistor PNP del detector cuando se alimenta a través de FOXFET.

En los últimos años el desarrollo de detectores de gran volumen en colisionadores, han planteado el problema de la gran dificultad de utilizando *strips* a lo largo de la dirección z , cubrir las regiones de interés requeridas. La solución encontrada ha sido modificar el diseño de los detectores para poder orientarlos perpendiculares a la dirección z de estos detectores y mantener la medida de la coordenada angular Φ . La orientación de los *strips* es radial por tanto.

Los problemas que pueden plantear estos detectores son:

- Sin un diseño adecuado del mismo es posible que la respuesta del detector dependa de la posición de paso de la partícula debido a las variaciones a lo largo del *strip* de la capacidad.
- Por otra parte si se desea mantener la capacidad lo que varía a lo largo del *strip* es el volumen de recolección, y por tanto también la respuesta. Este segundo efecto se ha medido y es mayor que la posible variación de la capacidad entre *strips* por lo que el diseño de estos detectores se centra en mantener una distancia entre *strips* variable, mientras que se trata de mantener la anchura del *strip* constante [89].
- La depleción puede ser distinta en la parte más ancha del detector comparado con la parte estrecha debido a las diferencias de campo eléctrico que se produce en las distintas zonas.

2.5.3 Detectores de *pixel*.

Los detectores de doble cara permiten leer cada una de las caras y obtener simultáneamente información acerca de dos coordenadas. Sin embargo presentan el problema de que cuando se tiene más de un suceso simultáneo se puede presentar ambigüedad en la identificación de la procedencia de cada suceso. Este hecho es mayor si las coordenadas son totalmente perpendiculares, donde dos sucesos en cada cara se pueden asociar de dos formas distintas, y cuando la multiplicidad aumenta la combinatoria aumenta también.

Para evitar este problema, se pueden emplear detectores de *pixel*. En este caso en una única cara se segmenta en forma de matriz obteniendo elementos de superficie mínima, ($60 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$).

- Al tener una superficie tan reducida, la capacidad que presenta cada celda es mínima, y por tanto el ruido por canal se reduce considerablemente.
- Se plantea el problema de que los canales de lectura requeridos aumentan de forma cuadrática, convirtiéndolos en muy caros cuando se trata de leer elementos grandes.

La densidad de canales de estos detectores complica también el diseño de la electrónica, pues es complicado separarla en un extremo como típicamente se realiza en los detectores de *strips*, y ha de estar integrada en la superficie del detector (con el consiguiente efecto negativo de añadir longitudes de radiación).

Existen otros detectores basados en *pixels* como son las CCD donde modificando el campo eléctrico de distintas capas del detector se puede extraer la carga de cada *pixel* de forma secuencial, sin embargo la elevada densidad de canales que presenta, requiere de tiempos de lectura elevados.

2.5.4 Detectores de lectura binaria.

Los detectores mencionados hasta ahora asumen que somos capaces de realizar una medida de la carga por cada *strip* (lectura analógica típicamente 6 a 8 bits de resolución).

La lectura de dicha carga permite entre otras cosas corregir por cada *strip* el pedestal así como el ruido común de todos los *strips* que se debe fundamentalmente al acople de todos los *strips* al plano de polarización, así como a efectos de alimentación de la electrónica [90, 91].

Mejorando las técnicas de puesta a tierra de todos los elementos del detector así como la calidad de amplificadores de entrada, estos efectos se pueden disminuir, de forma que la lectura se realiza sobre la elección de un umbral (común a todos los canales de un detector). Este umbral se escoge de acuerdo a una relación señal ruido de cada detector.

En los detectores optimizados para lectura analógica, se busca una mejora de resolución reduciendo la distancia entre *strips* o bien añadiendo *strips* intermedios que mejoren la compartición de carga, sin embargo en el diseño de detectores optimizados para lectura binaria se busca:

- Reducir la distancia entre *strips* para mejorar la resolución espacial.
- Además la distancia entre *strips* no se puede reducir demasiado (mayor de $60 \mu\text{m}$), pues supone una pérdida de eficiencia al aumentar la compartición de carga entre los *strips* de lectura.
- Para evitar el trasvase de carga entre *strips*, estos detectores no se deben equipar con *strips* intermedios.

La resolución de estos detectores es de forma muy aproximada:

$$\sigma = \frac{D}{\sqrt{12}} \quad (2.37)$$

donde D es la distancia entre *strips*.

Esta resolución es en la práctica algo mejor debido fundamentalmente a la contribución de las trazas que pasan en la zona intermedia de dos *strips*.

2.6 Caracterización de detectores de silicio.

Se entiende por caracterización todos aquellos test que nos permiten comprobar la calidad del detector, antes de conectarlo a la electrónica. En general se realizan medidas de dos tipos para poder comprobar dicha calidad:

Medidas pasivas: Son medidas de corriente y voltaje continuos en el detector.

Medidas activas: Son medidas realizadas al detector a través de un sistema de corriente alterna que nos permite comprobar la capacidad y respuesta en frecuencia del detector.

Las medidas pasivas nos permiten comprobar excesos de corrientes de fugas que pueden deberse fundamentalmente a dos causas, por una parte que el número de portadores de red no es mayor que el requerido (calidad de material) y por otra parte a que el detector puede tener defectos en la disposición de guardas o problemas durante el proceso de corte del detector. En general las corrientes de fugas elevadas hacen que se disminuya el voltaje efectivo que se le aplica a las zonas activas del detector convirtiendo los detectores en no usables. Para las características de los detectores de ATLAS (número de portadores del sustrato, voltaje de operación) se requiere que la corriente de fugas a 300 V no exceda el microamperio.

Otro tipo de medidas pasivas nos permite conocer cual es el potencial de distintas partes del detector al ser aplicado el voltaje de trabajo. La posibilidad de medir simultáneamente el voltaje en otras zonas del detector en modo de operación nos permite conocer si las características de los elementos entre dichas zonas son correctos o no.

Las medidas activas nos permiten conocer acerca de los procesos que llevan al detector a la depleción del detector. La capacidad del detector varía con el voltaje aplicado hasta un mínimo teórico. Por otra parte la capacidad que presenta un detector entre strips nos ayuda a conocer la señal que se va a dispersar a los canales vecinos por efecto de acoplo capacitivo.

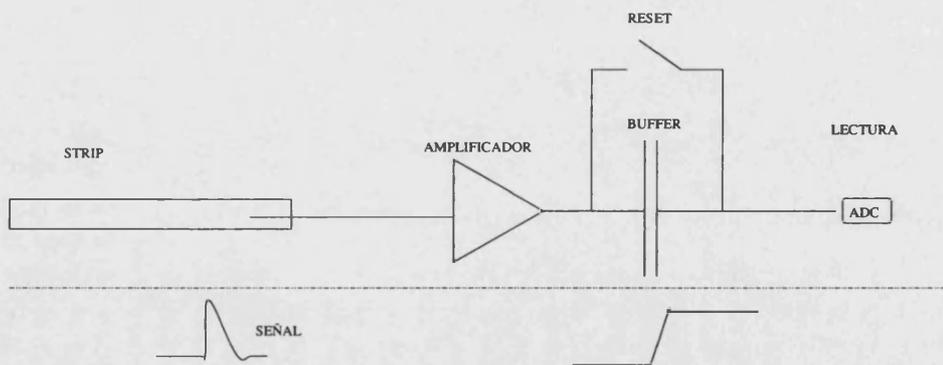


Figura 2.13: Esquema genérico de las etapas de lectura de un detector de silicio, la carga se lee y es amplificada en un buffer de salida. Si se produce un *trigger* se realiza una conversión con ADC posteriormente.

2.7 Electrónica de lectura.

Los detectores de silicio se leen canal por canal a través de amplificadores y ADC sensibles a la carga. La calidad de los componentes y diseño es la última responsable del ruido del detector. De forma genérica estos dispositivos trabajan amplificando la carga presente en los strips, y pasando dicha carga a un capacitor que hace las veces de buffer.

La lectura de dicha carga se realiza multiplexando todos los canales en una única línea analógica donde es leída a través de Flash ADC, esta lectura se sincroniza con la electrónica del detector.

La diferencia de la lectura analógica con detectores binarios es que estos últimos llevan incorporado un ADC de un bit de resolución. La señal capaz de leer dicho ADC es regulable de forma externa.

Las mejoras en la introducción de la microelectrónica han producido que se realicen incrementos en el tamaño de los buffers, así como una reducción en los tiempos de recolección de carga en las etapas posteriores. El objetivo es poder adaptar la velocidad de lectura a los tiempos impuestos (25 ns) por detectores de las características de LHC. Sin embargo en experimentos donde la velocidad de respuesta no es un factor determinante el empleo de dichas técnicas repercute en un deterioro de resolución espacial.

Otro factor que ha contribuido a una reducción substancial del ruido ha sido la mejora en el diseño de las tierras del detector [49] que ha permitido obtener detectores más rápidos al no tener que realizar operaciones de substracción de estas fuentes de ruido.

Capítulo 3

Test de los detectores en haz.

Una fase muy importante para el desarrollo de cualquier detector de partículas es la capacidad de realizar medidas en las condiciones más similares posibles a las reales. De esta forma se permite optimizar los elementos, detectar fallos y ganar experiencia.

Aunque muchos de los problemas se pueden detectar en estudios de laboratorio, existen determinadas condiciones que sólo se pueden estudiar disponiendo de partículas análogas a las que van a ser detectadas. Por ejemplo se puede estimular un detector empleando luz laser o bien fuentes radiactivas. El primer método dispersa la carga en el detector, de forma que la información obtenida con el mismo acerca de la resolución no es definitiva. La diferencia de deposición de carga del segundo método comparado con las partículas de un haz hace que las prestaciones así obtenidas no sean tampoco comparables.

En esta capítulo vamos a cubrir las características generales de los test realizados en haz, así como los procedimientos generales empleados para el estudio de los detectores de silicio de ATLAS. Posteriormente se detallará en cada capítulo las características propias de cada test.

3.1 La zona experimental de SPS.

Los test de la colaboración ATLAS se han realizado en diversas instalaciones situadas alrededor del mundo. Las instalaciones más empleadas han sido las de KEK (Japón), Berkeley (EEUU), RAL (Reino Unido) y el CERN (Ginebra). Cada una de estas instalaciones se caracteriza por un tipo de instalaciones asociadas así como periodos de operación diferentes a lo largo del año que posibilitan un estudio detallado de diversos aspectos de los detectores tales como envejecimiento debidos a la radiación, estudios de resolución espacial, estudios de respuesta temporal y más. Dado que este trabajo se realizó íntegramente en las instalaciones del CERN pasamos a describir estas instalaciones.

Actualmente el SPS tiene dos cometidos principalmente. Por una parte trabaja como inyector de $e^+ e^-$ para LEP. Por otra parte es capaz de operar como acelerador de protones para experimentos a blanco fijo o producción de secundarios para otras aplicaciones.

Otra de las características de las primeras etapas de SPS es la capacidad de realizar inyección de alta intensidad para experimentos de irradiación o de baja energía.

Dentro del programa de desarrollo de detectores para ATLAS el CERN dispuso de dos tipos de instalaciones:

Zona de irradiación: Este área funciona en una zona de baja energía con el inyector de protones PS del acelerador SPS en momentos en que no realiza ciclos de inyección.

Áreas de test: Estas instalaciones están después del SPS y obtienen las partículas de secundarias obtenidas por la colisión del haz del SPS sobre distintos blancos. En particular el

área experimental estaba situada en la línea de haz H8 (ver tabla 3.1)

ÁREA OESTE			
Haz	Momento Máx. (GeV/c)	Intensidad para 10^{12} incidentes protones a 450 GeV/c	Tipo de haz
H3	250	$2 \cdot 10^7$ secundarios	Haz padre para X5,X7
X5	250	10^2 - 10^4 terciarios/ 10^7 partículas incidentes < 10^6 secundarios	Haz de test e, π, μ
X7	250	10^2 - 10^4 terciarios/ 10^7 partículas incidentes < 10^6 secundarios	Haz de test e, π, μ
ÁREA NORTE			
H2	400	$9 \cdot 10^7 \pi^+$ a 200 GeV/c $3 \cdot 10^7 \pi^-$ a 200 GeV/c $4 \cdot 10^6 e^\pm$ a 150 GeV/c $1 \cdot 10^5 \text{Pb}$ a 400 GeV/Z	1) Haz de alta energía de electrones o hadrones. Haz de test 2) Haz de iones pesados
H4	450	π, e flujos similares a H2 10^7 protones a 450 10^7Pb	1) Haz de alta energía de electrones o hadrones 2) Haz primario atenuado 3) Haz de iones pesados
H6	205	$10^8 \pi^+$ 150 GeV/c $4 \cdot 10^7 \pi^-$ 150 GeV/c	Haz de media energía, también usado para haces terciarios
H8	450	10^7 protones a 450 GeV/c $2 \cdot 10^8 \pi^+$ a 200 GeV/c $7 \cdot 10^7 \pi^-$ a 200 GeV/c 10^6Pb a 400 GeV/Z	1) Haz de alta energía de electrones o hadrones. Haz de test 2) Haz de iones pesados
M2	225	$2 \cdot 10^7 \mu^+$ a 100 GeV/c $3 \cdot 10^6 \mu^-$ a 200 GeV/c	Haz de muones de alta intensidad polarizado
P41/P61	450	< 10^{11} protones a 450 GeV/c > $5 \cdot 10^7 \text{Pb}$ a 400 GeV/Z	Transporte primario de protones desde T4 o T6 a ECN3 (NAHIF)
K12	450	$10^7 K_L$ a 50 GeV/c $3 \cdot 10^2 K_S$ a 50 GeV/c	Haces simultáneos de K_S y K_L a ECN3

Tabla 3.1: Descripción de las diferentes líneas experimentales que dependen del SPS.

La figura 3.1 muestra la disposición geográfica de las distintas áreas experimentales de SPS. Mientras que la irradiación se llevó a cabo en la zona de inyección de SPS, las áreas de test de detectores de silicio se llevaron a cabo en el *área norte*.

Las pruebas de radiación de electrónica y de detectores consisten en un haz de alta intensidad de protones que incide sobre los detectores de silicio produciendo en poco tiempo la misma intensidad de daños que se espera tener en las condiciones de LHC. En este caso la intensidad de protones se monitoriza a través de una cámara de ionización.

3.2 La zona experimental de H8.

Tanto los detectores irradiados como los detectores sin irradiar pueden ser comprobados en el área experimental de H8.

En este área se dispone de un sistema formado por un trigger de dos centelleadores y un *telescopio* que consiste en cuatro planos de detectores de silicio que realizan medidas X-Y correspondiente al plano perpendicular del paso de las partículas, con una anchura entre bandas

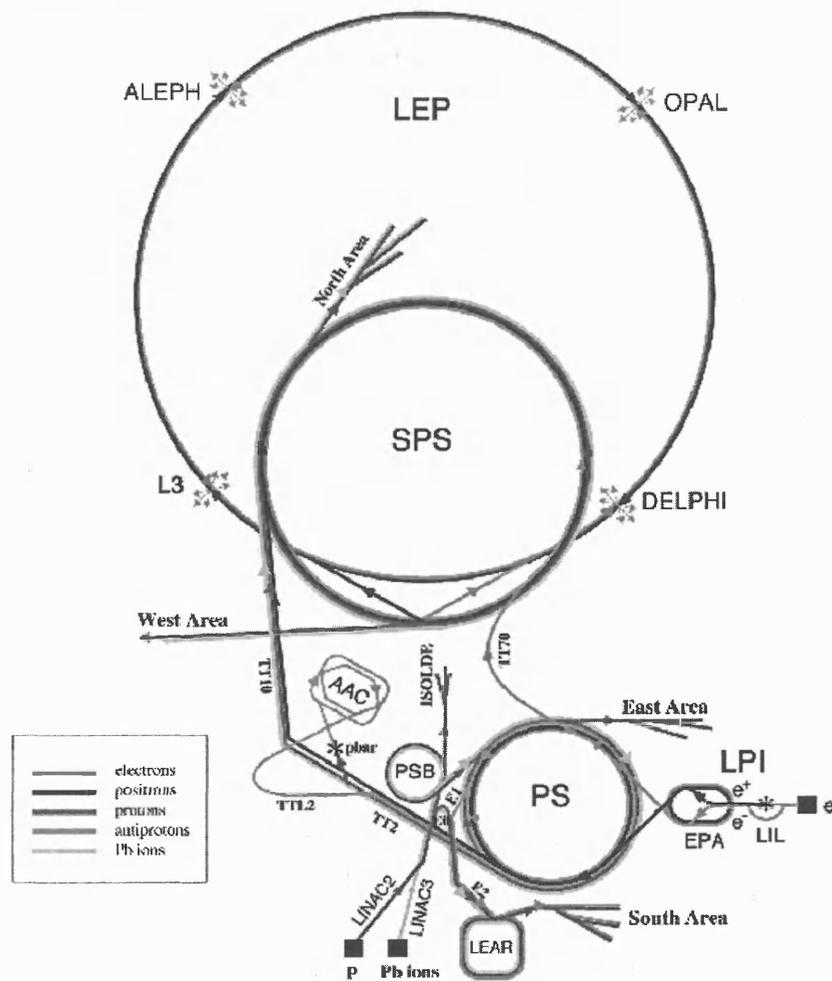


Figura 3.1: Disposición de los aceleradores mostrando las distintas áreas experimentales, respecto a los aceleradores en particular el área Norte y el área Oeste

de $50 \mu\text{m}$ y leídos por electrónica analógica de bajo ruido VIKING [92]. Este sistema proporciona medidas de trazas de partículas con una resolución por plano de $6 \mu\text{m}$.

Las partículas que atraviesan este sistema depositan señal en los centelleadores, que son leídos por un sistema de coincidencias simple basado en NIM. Se genera entonces un *trigger* que pone en marcha la lectura de los telescopios y demás detectores en prueba.

Debido a que los detectores en condiciones reales, van a estar sometidos a campo magnético se dispone opcionalmente de un campo magnético de hasta 4 Teslas donde se puede introducir todo el sistema de test. Por otra parte en condiciones reales de ATLAS los detectores tendrán un reloj común sincronizado con el cruce de haces cada 25 ns. Debido a las condiciones de la toma de datos, las partículas no llegan sincronizadas a un reloj, si no que llegan desfasadas durante un intervalo de 25 ns. Para poder estudiar la eficiencia en función de esta fase se dispone de un sistema de TDC que mide el retraso respecto a la señal del centelleador con el reloj del sistema.

La lectura se adquiere en forma online en un sistema VME con UNIX tiempo real. Durante la toma de datos se realiza un seguimiento de la toma de datos que consiste en dos niveles de control *online* y *offline*:

Online: Consiste en un análisis rápido donde se controla con los datos que se están produciendo

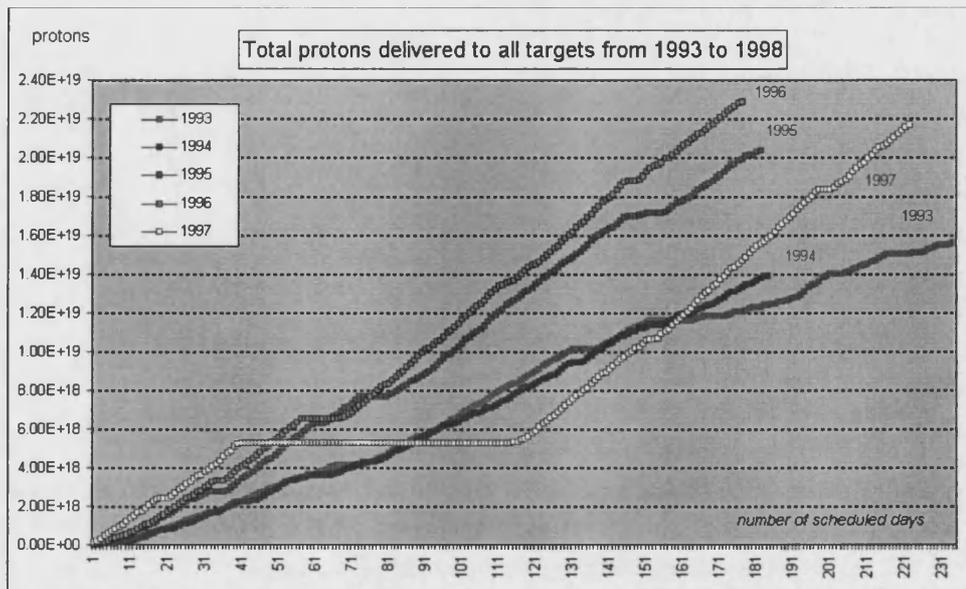


Figura 3.2: Número de protones acumulados por SPS desde 1993 a 1997. Se observa a partir de 1994 un incremento por año debido a las mejoras introducidas en SPS. En 1997 se observa un largo periodo de inactividad debido a un incendio producido en la sala de control de la máquina.

el número de sucesos por segundo, comprobar que todos los detectores están viendo el haz, monitorizar el ruido de los detectores, que exista correlación entre la señal de los distintos detectores etcétera. De esta forma se garantiza que la adquisición de datos es correcta.

Offline: Consiste en un análisis más detallado donde se pueden realizar estudios más detallados, que consiman más tiempo de proceso, tales como eficiencias de los detectores, resoluciones, substracción de ruido ...

Durante una toma de datos normal, la información obtenida a través del análisis del *offline* se utiliza para permitir centrar y corregir posiciones y problemas que no son detectados con el análisis *online*.

3.3 Descripción del offline.

El análisis *offline* consiste en leer suceso a suceso información de cada uno de los detectores que participan en el test, los telescopios y los TDC. Los telescopios son planos de detectores que nos dan con muy buena resolución (de 2 a 8 μ m) la trayectoria de las partículas. Mientras que son detectores cuya respuesta se conoce, forman parte en el test para poder analizar la respuesta de los detectores de ATLAS. Durante este periodo se comprobaron dos tipos de detectores: detectores de lectura analógica y detectores de lectura binarias, correspondientes a cada una de las opciones por defecto de la colaboración ATLAS.

3.3.1 Telescopios.

Los telescopios son detectores que se encargan de leer las trazas, y poder realizar una reconstrucción de estas independientemente de los detectores en test. Están equipados con electrónica de bajo ruido VIKING [92]. Esta electrónica se caracteriza por tener una relación señal / ruido entre 40 y 80 que proviene de un ruido típico de $ENC=135 e^- + 12e^- / pF$). Sin embargo a

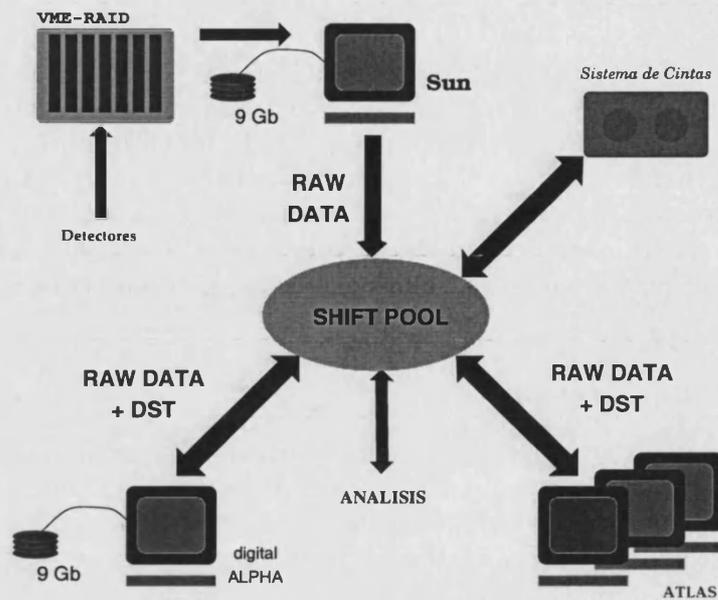


Figura 3.3: Flujo de datos durante la toma de adquisición en el área experimental de H8: Los datos se leen de los detectores a través de un sistema VME, que comparte datos con una máquina SUN donde se realiza el procesamiento *online*. Automáticamente estos datos se trasladan al sistema central de ATLAS (*shift pool*) y posteriormente a cinta. Estas cintas pueden accederse por medio del sistema de análisis *offline* de ATLAS, o bien a través de una estación de trabajo ALPHA más potente destinada a tal fin.

diferencia de los detectores de ATLAS que han de tener un tiempo de respuesta de 25 ns, éstos detectores tienen un tiempo de respuesta entre 1.5 μ s y 2 μ s.

Si bien durante el test-beam de 1995 la lectura de la electrónica se tenía que procesar posteriormente en el offline realizando un análisis parecido al que se describirá en la sección 3.3.2, durante los años siguientes se equipó el sistema con un procesador digital de señal (DSP), que realizaba de forma automática dicho análisis permitiendo almacenar sólo la información correspondiente a la señal. De esta forma se redujo la cantidad de información a procesar así como simplificar el proceso de análisis.

El objetivo es obtener con la mayor precisión posible la traza de las partículas incidentes para extrapolarlas a los planos de los detectores. La traza de una partícula viene definida por la ecuación:

$$\begin{aligned} x &= x_0 + \frac{dx}{dz} \cdot t \\ y &= y_0 + \frac{dy}{dz} \cdot t \\ z &= t \end{aligned} \quad (3.1)$$

donde t es un parámetro x_0 e y_0 son la posición de la partícula en el primer plano del telescopio y dx/dz dy/dz son la variación de las coordenadas x e y respecto al eje z . Utilizando posteriormente esta información se alinearán el resto de los detectores del test.

Antes de poder tener la información de las trazas, se procede a alinear el telescopio. Esta operación consiste en minimizar una función que representa la distancia de una traza a la señal determinada con el telescopio. Esta función se define como la suma de las distancias a una recta (banda inicial) desplazada del origen en z que es la dirección de las partículas incidentes y en x (ó en y según el plano de detector que se esté tratando) y orientada en el espacio en la dirección θ Φ . La distancia se define en un plano con una orientación alrededor de esta recta Ψ .

Dado que en una primera fase no se dispone de trazas con las que realizar las operaciones descritas, y gracias a que el haz de partículas es prácticamente paralelo, para alinear el telescopio se procede con el primer plano como origen fijo. Se realiza la minimización con el segundo plano detector tal como se ha descrito anteriormente, pero fijando la distancia z , y asumiendo que las trazas tal como, y suponiendo que las trazas son completamente perpendiculares (debido a que no se tiene información acerca de las trazas. Una vez se ha realizado el alineamiento de dos planos se dispone de información para generar trazas. De esta forma con las trazas más perpendiculares a los planos alineados, se dispone de información para alinear el resto de los planos.

3.3.2 Detectores analógicos.

La característica de estos detectores es que en cada suceso tenemos información (de 8 a 16 bits) de la carga depositada por la partícula en cada strip. Antes de obtener dicha información debido hay que proceder a minimizar el ruido de cada uno de los elementos. Así los pasos que se tienen que seguir para obtener información de estos detectores son los siguientes:

Obtención de pedestales: Es decir la señal que se observa en cada canal cuando no ha pasado ninguna partícula. Estos pedestales se obtiene después de procesar un número significativo de sucesos (típicamente 1000).

Obtención del ruido: Por canal es decir la fluctuación de señal que se observa (RMS) cuando no ha pasado ninguna partícula por dicho canal ninguna partícula.

Obtención de la señal/ruido: Debido a que ruidos mayores se asocian a variaciones en la amplificación del canal, esta normalización es más interesante que la señal. Esta magnitud se obtiene por suceso y por canal.

Obtención del ruido común: o *Common Mode*. Este ruido es un ruido común a todos los canales del detector debido a que todos los canales están acoplados a través de un plano común de alimentación. Es independiente al ruido por canal, y esta magnitud se obtiene por suceso. Otra fuente de ruido común es la propia alimentación de la electrónica, que puede producir diferencias de amplificación en el todo el detector, los relojes de sincronización, difíciles de evaluar, y que hacen que el modelo óptimo para calcular el ruido común del mismo se describa mejor como un polinomio de segundo grado.

Con las magnitudes anteriormente descritas se procede por suceso a realizar la substracción de pedestales así como el ruido común. Canal por canal se realiza la normalización de la señal que presenta con el ruido. Previamente a la obtención del corte que se le da a la señal se representa un histograma con la señal de todos los canales cuyo valor absoluto de la señal-ruido sea mayor que dos, con esto se espera eliminar un 98 %, y así obtener una distribución con la que obtener nuevos cortes para la señal y poder alinear confortablemente el detector con las trazas obtenidas del telescopio.

Obtenidas las trazas y alineado el detector se realiza un estudio del detector. Los parámetros más importantes en estos detectores son:

Ocupación de ruido: Definido como el número de strips no asociadas a la traza que a un corte determinado de señal ruido dan señal sobre el número de strips no asociadas a la traza.

Eficiencia: Definida como número de veces que se asocia una banda a la extrapolación de la traza sobre el número de trazas consideradas.

$\eta(x)$: Definido para dos bandas como el cociente entre la señal de la banda numerada como menor sobre la suma de la señal de esta banda y la siguiente para cada posición de la traza (ecuación 2.28).

Resolución: Del detector definida como la RMS de la distribución de residuos o distancias de la traza obtenidas por el telescopio a las obtenidas por el detector en test.

3.3.3 Detectores binarios.

En estos detectores la única información que se tiene es si la señal de la banda ha sobrepasado un determinado umbral, este umbral viene determinado por un discriminador, previamente seleccionado.

En estos detectores no se es capaz de medir ni el ruido común ni el pedestal, pues la única operación que podemos realizar es saber si la carga de cada strip pasa o no de cierto umbral.

Para poder determinar el modo de operación de estos detectores se realizan barridos de umbral (*threshold scan*), donde se mantiene el detector en una misma posición espacial, y se adquieren sucesos a distintos niveles del discriminador para obtener las siguientes magnitudes:

$\eta(x)$: Definida en este caso como la eficiencia del detector en función de la coordenada entre bandas de paso de la partícula.

Resolución: Del detector definida como la RMS de la distribución de residuos o distancias de la traza obtenidas por el telescopio a las obtenidas por el detector en test.

En estos detectores la ocupación de ruido y eficiencia se definen como para los detectores analógicos.

De esta forma la toma de datos para cada valor de polarización del detector, ángulo de incidencia etcétera, se realiza variando las condiciones del detector y realizando un barrido de umbrales en cada condición.

A continuación se representan dichas cantidades en función de los niveles del discriminador. El análisis no requiere pues de cálculos de pedestales ni de ruido común lo que simplifica el proceso aunque si que es necesario emplear sucesos para poder discriminar que canales no están funcionando correctamente (canales calientes o que poseen un nivel de ruido mucho mayor a la media, y canales muertos que poseen una ineficiencia mayor a la media), de esta forma los cálculos de ruido y de eficiencia no se ven afectados por estos.

Por otra parte la necesidad de realizar un barrido de umbrales para cada cambio de condiciones del sistema experimental hace que la toma de datos requiera de muchos más sucesos (típicamente entre 10k y 20k sucesos por umbral, y típicamente entre 6 y 9 umbrales, frente a los 20k sucesos requeridos para detectores analógicos)

Capítulo 4

Tecnología de silicio en la parte forward.

El *technical proposal* de ATLAS contiene en la descripción inicial, detectores gaseosos destinados a la parte forward y detectores de silicio en la parte central del detector.

El primer estudio que se realizó en el contexto de este trabajo consistió en comparar las prestaciones para la región hacia adelante (*forward*) de la tecnología MSGC (Micro Strips Gas Chambers) respecto a la de silicio, y que acabó demostrando a favor del silicio ser una mejor solución para ATLAS.

4.1 Detectores de Micro Strip Gas Chamber.

Aunque no es el contenido de esta tesis, para poder realizar comparaciones con los estudios realizados para decidir entre los detectores de gas y los detectores de silicio, es interesante comentar antes en que consiste esta tecnología para entender los resultados que se obtuvieron para la elección del tipo de detector destinado a la parte *forward* de ATLAS.

Como hemos comentado el detector ATLAS estaba diseñado originalmente de forma que en la parte del barril existieran detectores de silicio y en la parte forward (en principio más irradiada) unos detectores gaseosos llamados MSGC. Las ventajas que se les otorgaba, eran una mayor tolerancia a la radiación así como una reducción del precio total del detector.

El principio de funcionamiento de estos detectores es el mismo que el de cámaras de hilos; la ionización producida por una partícula cargada en un gas produce pares de electrones-iones. Los electrones al ser atraídos al ánodo por el intenso campo eléctrico que proporcionaban los hilos, producen una amplificación al ionizar los átomos cercanos al hilo.

En las cámaras de hilos las separaciones entre hilos habían llegado al límite que no se podían reducir debido a problemas mecánicos. Por una parte se requiere un soporte rígido capaz de soportar las tensiones de todos los hilos de las cámaras y por otra parte los voltajes aplicados entre hilos hacía que estos se juntasen provocando cortocircuitos al someterlos a altos voltajes.

Estos detectores, en vez de emplear hilos suspendidos por tensión mecánica, se emplea un sustrato dieléctrico [93–97] (silicio pasivado, cristales, cuarzos, deposiciones de diamante...), en que se imprimen fotográficamente los hilos que además pueden adoptar la forma más conveniente¹. Los requerimientos iniciales son que no emanen impurezas (óxidos de silicio, o materiales químicamente inertes), sean resistentes a la radiación (tras su irradiación no cambien sus propiedades mecánicas químicas o eléctricas) y tengan una elevada resistencia eléctrica ($10^{10} \omega/\text{cm}$).

¹Siempre teniendo en cuenta que el campo eléctrico por centímetro alrededor del ánodo sea elevado para producir amplificación. En general esto se consigue reduciendo las dimensiones del ánodo.

La figura 4.1(b) muestra la disposición sobre el substrato de los ánodos, donde se recolectan los electrones. Entre ánodos para reducir la capacidad entre estos e incrementar el campo eléctrico por centímetro se sitúan cátodos que por tanto mejoran también la amplificación.

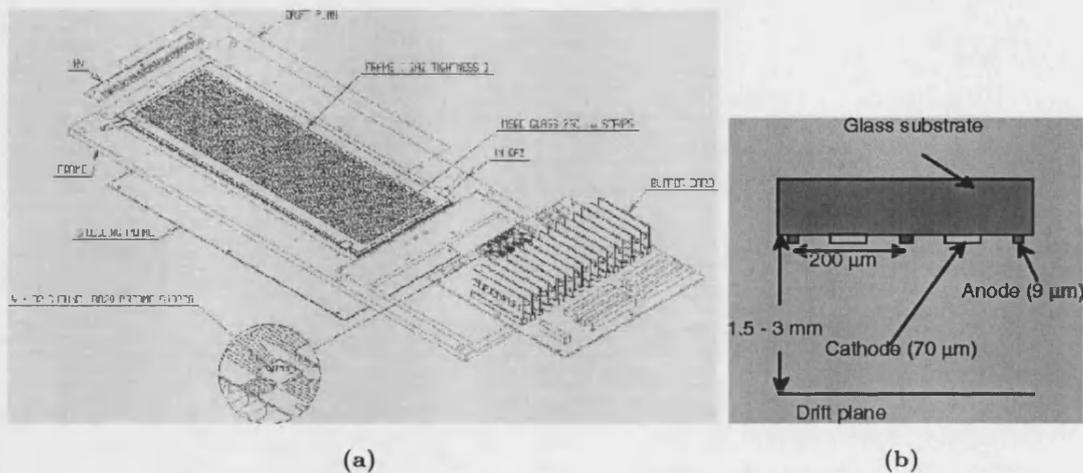


Figura 4.1: La figura (a) muestra todos los elementos de un detector MSGC. La figura (b) muestra un corte transversal de un detector MSGC mostrando las dimensiones típicas de estos detectores.

El último de los elementos básicos que se requieren para hacer funcionar éstos detectores son los gases. Estos se eligen de forma que tengan buenas propiedades eléctricas, es decir que no se produzcan descargas en continuo, que se auto extingan con el paso de una partícula, y que produzcan una buena amplificación, típicamente del orden de $2 \cdot 10^3$.

En la zona activa del detector se aplican voltajes de operación (entre ánodo y cátodo de típicamente 0.5 KV), y entre el ánodo y el plano de deriva *drift plane* con voltajes entre 1 KV y 10 KV. A los ánodos se les acopla la electrónica de lectura. La figura 4.1 muestra seccionado un detector completo, así como un corte perpendicular mostrando las dimensiones típicas del detector.

Durante las fases de diseño iniciales a estos detectores se les atribuía las siguientes ventajas frente a los detectores de silicio.

Amplificación: aunque la cantidad de pares formados por el paso de una partícula sea sensiblemente inferior, del orden de 1000 pares frente a los 22000 que se producen en el silicio, debido por una parte a una menor densidad (un gas en vez de un sólido) y por otra a la energía mínima de creación de un par, del orden de 22 eV frente a los 3.6 eV del silicio en los MSGC se produce amplificación del orden de 10^3 frente a la nula amplificación del silicio. Esto facilita el diseño de la electrónica *front-end*.

Precio: éste es considerablemente menor debido a que no requiere técnicas de dopaje ni de implantación de iones.

Resistencia a la radiación: bastante superior a la del silicio pues el deterioro más evidente que produce la radiación consiste en daños en la red de sólido, y esto no es un problema para los MSGC puesto que el soporte de detección es gaseoso. Donde se debe tener especial control es en las mezclas de gases pues la radiación puede generar compuestos corrosivos dentro de las cámaras de detectores, y degenerar de forma permanente los detectores.

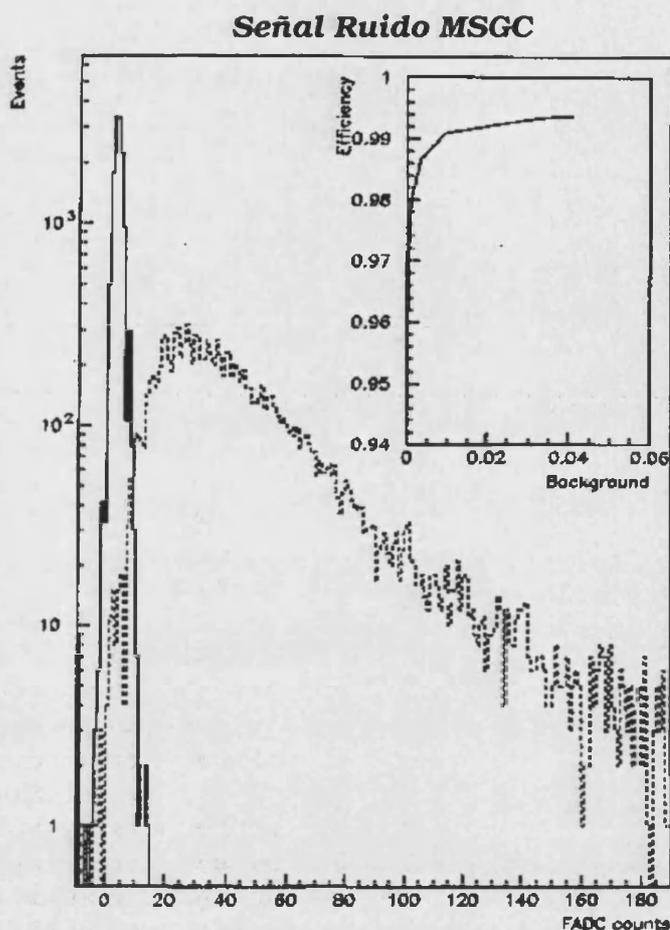


Figura 4.2: Resultados mostrando por una parte el ruido de un detector de MSGC y la señal con el paso de un mip. El máximo de la señal está alrededor de 30 lo que equivale a una relación señal ruido para el máximo de 10 a 1.

La figura 4.2 muestra los resultados [98] obtenidos para cámaras de MSGC con $200 \mu\text{m}$ de distancia entre hilos. Las resoluciones obtenidas fueron de $40 \mu\text{m}$ con lectura analógica y $50 \mu\text{m}$ con lectura binaria.

4.2 Detectores de silicio.

El funcionamiento general de los detectores de silicio ha sido descrito en el capítulo 2 vamos a tratar de exponer los aspectos relevantes que compiten directamente con la tecnología MSGC.

Una de las características más atractivas de los detectores de silicio como detectores de trazas es el empleo en altas energías con excelentes resultados desde 1980. El reducido tiempo de respuesta así como la excelente segmentación espacial han contribuido a este hecho.

A pesar de que inicialmente las técnicas de producción de detectores no permitían construir elementos resistentes a la radiación, los avances en la electrónica y en la construcción de los mismos han permitido:

- Obtener detectores que tras un elevado flujo de radiación mantengan una relación señal/ruido aceptable. Estas mejoras se han incluido entendiendo correctamente las condiciones de operación de los detectores: temperatura, polarización, etcétera.

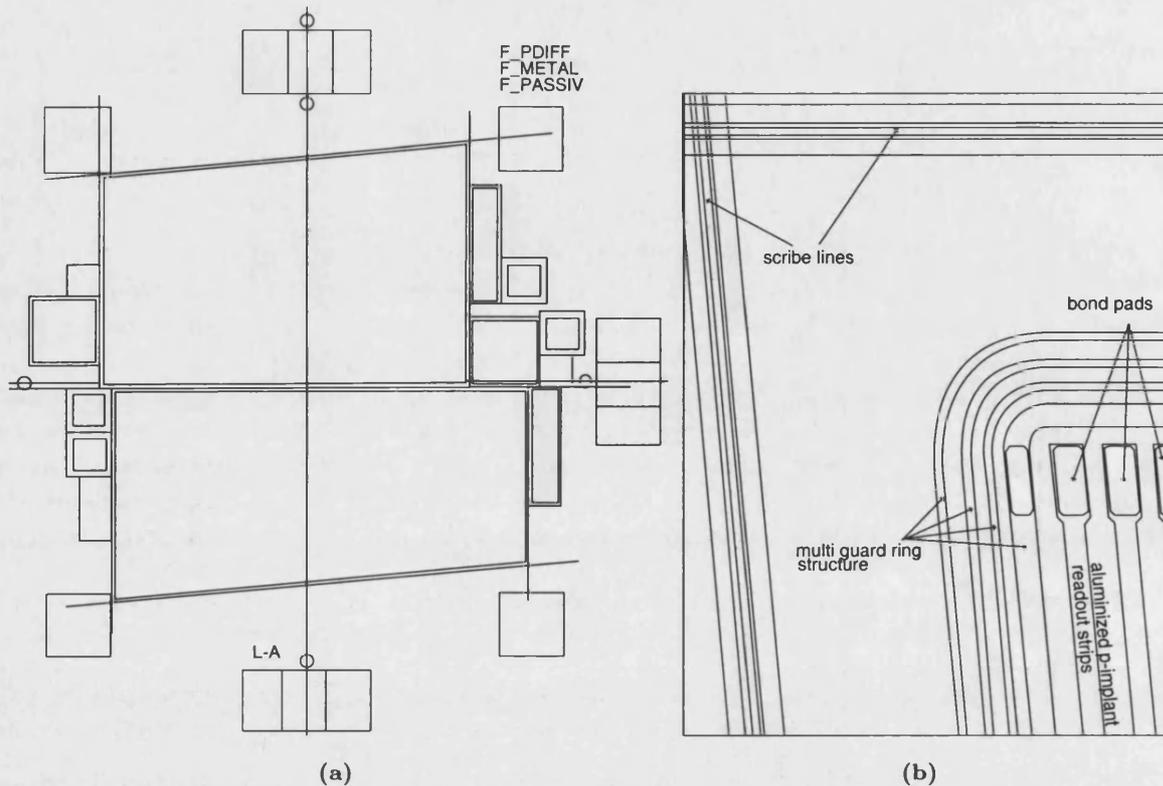


Figura 4.3: La figura (a) muestra todos los elementos del modulo del test dispuestos en la oblea, la figura (b) muestra un detalle de la esquina del detector, con las guardas para operar a alto voltaje.

- Desarrollo de electrónica de bajo ruido, rápida y de reducido consumo, optimizada con tecnología procesada para la radiación.
- Mejoras en la velocidad de proceso de señal, e inclusión de microelectrónica que permiten separar señales de sucesivos cruces de haces y evitar apilamientos cuando se trabaja con gran tasa de sucesos.

A diferencia de los detectores gaseosos el empleo de tecnología de silicio puede proporcionar:

Homogeneidad: Respecto al barril, tanto por la tecnología como por el empleo de gases. El empleo de la misma tecnología en la parte barril y en la parte *forward* permitiría aplicar las mismas soluciones a idénticos problemas.

Probada: La tecnología de silicio está bien establecida y probada en sucesivos experimentos a diferencia de los MSGC, que aunque son herederos de toda la experiencia que se tiene sobre cámaras de gases, esta tecnología nunca antes ha operado de forma continua en un experimento de altas energías.

Resolución: Típicamente las mejores resoluciones que se pueden obtener con los MSGC son de alrededor de $40 \mu\text{m}$ (para un detector con pitch de $200 \mu\text{m}$). Con silicio fácilmente se pueden obtener resoluciones del orden de $5 \mu\text{m}$. Para trazas no perpendiculares hay que tener en cuenta también el mayor espesor del detector de unos pocos milímetros en lugar de las $300 \mu\text{m}$ que típicamente tiene un detector de silicio.

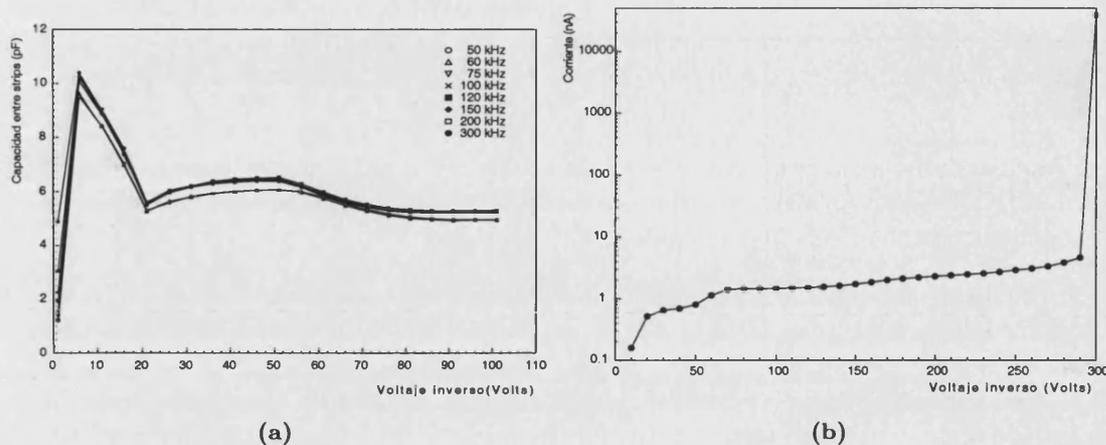


Figura 4.4: La figura (a) muestra la capacidad entre strips medida en varias frecuencias. La figura (b) muestra la corriente de fugas del detector, se observa que esta produce avalancha alrededor de los 300V.

Longitud de radiación: Este es un argumento crítico en detectores destinados al tracking de partículas. Mientras que el material requerido en un detector de silicio son $300 \mu\text{m}$ de silicio por cada plano de lectura, los detectores MSGC al tener que mantener una estructura para gases, requieren como mínimo el doble de material que los detectores de silicio.

Eficiencia volumétrica: Mientras que en un detector de silicio la eficiencia por volumen de detector es casi del 100% los MSGC al tener que disponer de los servicios de gases y sellados del detector reducen esta eficiencia a un 90%. Requieren más detectores para cubrir la misma área y por tanto aumentan longitudes de radiación.

Eficiencia intrínseca: Operando en máxima eficiencia, los detectores gaseosos tienen una eficiencia del 95% frente al 99% que se espera de los detectores de silicio.

Uniformidad de respuesta: En la parte *forward* es deseable que los detectores tengan geometría $R - \Phi$. Los detectores de silicio no requieren amplificación para funcionar, mientras que ésta sí que se requiere para poder obtener señal de los MSGC. La amplificación depende del campo eléctrico por centímetro, y el campo se cambia al variar la distancia entre strips, por tanto los detectores MSGC presentan una variación con la señal dependiendo de por donde pase la traza.

4.3 Geometría del detector.

Para poder comprobar si los detectores de silicio eran competitivos frente a la tecnología MSGC se construyó un detector de silicio de 12 cm de longitud con distancia entre strips variable. El objetivo era preparar un test-beam con un detector de silicio con una geometría nueva para comprobar:

1. Si existe uniformidad en la respuesta a lo largo del detector. Los detectores gaseosos producen una amplificación que está muy relacionada con el campo eléctrico. Al variar la distancia entre strips, el campo y por tanto la amplificación varían también. Los detectores de silicio no presentan amplificación, sin embargo comparten carga con los strips vecinos conforme la capacidad entre strips aumenta, y ésta depende de la distancia entre strips.

2. Medir resolución espacial en el eje del mismo, para comprobar que tiene una respuesta uniforme. Se puede esperar que se se comparte la carga de forma diferente en la parte ancha del detector, respecto a como lo hace la parte estrecha, la resolución espacial dependa de Φ .
3. Calcular la ocupación de ruido, frente a la eficiencia del detector con electrónica rápida de LHC. De esta forma comparar estos resultados con los detectores MSGC que en aquel momento estaban siendo diseñados en LHC.

Para realizar dichos tests se construyó un detector simple con acoplo *DC*, (*strips* de tipo P en sustrato de tipo N), capaz de operar a alto voltaje (300 V) (figura 4.3). Este detector se equipó con la electrónica analógica disponible APV5 [99].

Para reducir costes se optó por construir en una misma oblea de 4 pulgadas dos mitades del detector (de 6 cm cada una figura 4.3(a)), las distancias entre *strips* variaban entre $103.4 \mu\text{m}$ a $144.9 \mu\text{m}$ que da una variación de la dimensión de 3.71 cm en la parte superior hasta 2.64 cm en la parte inferior (256 canales). El diseño fue elegido para poder obtener las mismas prestaciones (de resolución espacial) que los detectores MSGC de ATLAS.

Para poder operar a 300 V se adoptó la solución de rodear el detector de tres guardas de tipo P, tal como estaba diseñado en los detectores de la parte barril (figura 4.3(b)).

Un detector con una distancia variable entre strips, se puede realizar o bien variando la distancia entre strips y manteniendo el tamaño del strip constante o variando el tamaño de la strip y manteniendo la distancia entre estas constante o variando los dos simultáneamente. La necesidad de mantener una recolección de carga constante en todo el detector es un argumento que sugiere que es la distancia entre strips la que debería mantenerse constante.

Por otra parte se debe tener como consideración el reducir la capacidad entre strips, para reducir el ruido en serie con la electrónica [100]. De este modo se adoptó el compromiso de que para la capa interna la distancia entre strips es constante y de $68 \mu\text{m}$ mientras que el implante P varía de $35 \mu\text{m}$ a $56 \mu\text{m}$, en la capa externa se mantiene una distancia de $80 \mu\text{m}$ mientras que el implante varía de $44 \mu\text{m}$ a $65 \mu\text{m}$.

4.3.1 Caracterización del módulo.

Previos al test en haz, se requiere medir las corrientes de fuga así como las capacidades entre strips. La figura 4.4 muestra los resultados de la caracterización.

- La capacidad entre strips es aproximadamente de 5 pF a 6 pF para una parte del detector de 6 cm cuando está en completa depleción.
- Cuando se tienen las dos partes unidas se tiene una capacidad acorde con los 15 pF que requiere la electrónica *front end* por consideraciones de ruido.
- La corriente en inversa del detector presenta un comportamiento normal con una corriente menor de 10 nA. Sin embargo cuando está completamente deplecionado, (figura 4.4) se observa que alrededor de 300 V el detector sufre avalancha y por tanto no puede operar a partir de dicho voltaje.

Como el detector es tipo *DC*, podemos polarizar a través de un *strip* cualquiera. Se observa en este caso que la avalancha se produce antes si los *strips* elegidos son cercanos a la parte exterior y se retrasa si son intermedios (diferencias de más de 10 V). Este argumento justifica el empleo de las guardas alrededor del detector.²

²El proceso de avalancha se produce cuando del campo eléctrico por centímetro [57] alcanza un determinado valor en el semiconductor (en el silicio es de $2 \cdot 10^5 \text{ V/cm}$ a $8 \cdot 10^5 \text{ V/cm}$). Al polarizar a través de un strip el campo

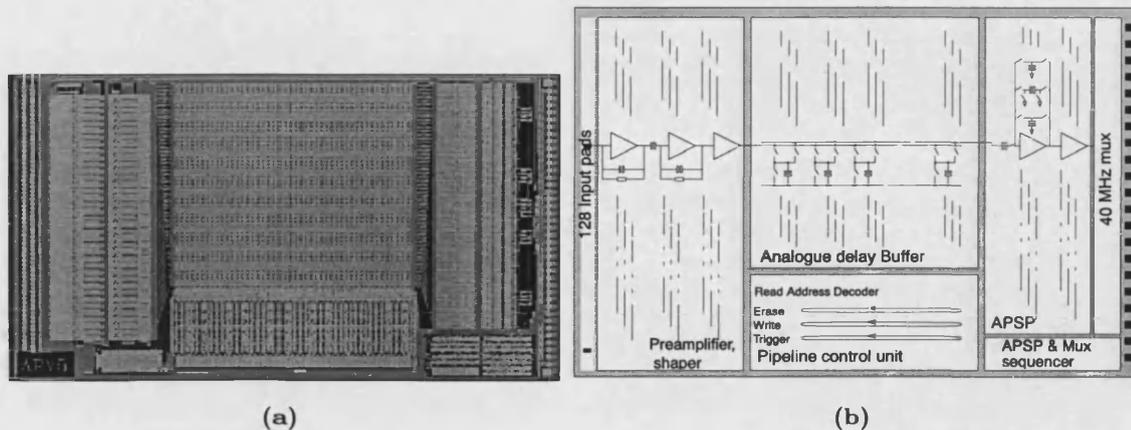


Figura 4.5: Fotografía del chip APV5 (a). La figura (b) muestra la disposición geométrica de cada componente del mismo.

4.4 La electrónica de lectura.

Para este detector el chip de lectura elegido fué el APV5. Este chip es un prototipo de 128 canales desarrollado en la colaboración RD20 para la lectura analógica de los detectores de silicio, como solución base para el tracking de CMS y ATLAS. El chip contiene del orden de los $140 \cdot 10^3$ transistores y ocupa un área de 11,2 mm por 6,4 mm. Seguidamente cometaremos cuales son las características del chip con especial énfasis en aquellas relacionadas con el test del detector.

4.4.1 Diseño del chip.

El chip APV5 es un chip totalmente construido en tecnología CMOS, para la lectura de detectores de silicio. Es el **primer** chip de 128 canales que para su construcción empleó exclusivamente **tecnología resistente a la radiación**.

Está pensado para ser unido a un detector de tipo *AC* con un mínimo de $50 \mu\text{m}$ de separación entre strips. El objetivo del chip es el de leer y almacenar muestras a la tasa de cruce de haces de LHC (25 ns). Dado que no todos los sucesos cumplen los requerimientos del primer nivel de *trigger* (LVL1), el chip contiene una lógica que acepta señales de un sistema externo para comunicarle que sucesos son relevantes. Este proceso (es ajustable) puede tardar $3.2 \mu\text{s}$. El chip ha de ser capaz de almacenar todos los sucesos ocurridos durante este periodo.

Otra característica del chip es que es capaz de funcionar en dos modos definidos también por control externo, conocidos como:

Modo integración donde la carga que se recoge de cada canal es enviada al sistema externo de ADC directamente.

Modo deconvolución donde el ADC lee la señal pesada con tres sucesos consecutivos [101], de esta forma se realiza el mismo proceso que un filtrado digital de paso alto con una tasa de muestreo de 25 ns.

eléctrico es mayor alrededor de dicho strip, los strips más externos generarán dichos campos en las partes externas del detector. Las partes externas han sido manipuladas durante el proceso de corte, las aristas e irregularidades incrementan de forma no controlada el campo por centímetro llegando a producir valores muy elevados. Un buen diseño de guardas evita de esta forma que el campo eléctrico llegue a esta zona donde se produce fácilmente la avalancha.

$$S_{ADC} = \omega_1 \cdot S_{c1} + \omega_2 \cdot S_{c2} + \omega_3 \cdot S_{c3} \quad (4.1)$$

donde S_{ADC} es la señal que ve externamente el ADC, S_{c1} , S_{c2} y S_{c3} son la carga medida en tres celdas consecutivas, y ω_1 , ω_2 y ω_3 son valores que maximizan el valor de S_{ADC} cuando la partícula ha pasado en el intervalo de tiempo adecuado, y hacen que S_{ADC} adquiera un valor nulo cuando no es así.

El *modo deconvolución* debería ser el modo normal de operación, debido principalmente a que la señal tiene un tiempo de respuesta de 25 ns. Sin embargo el *modo integración* es el que es recomendable emplear cuando la tasa de sucesos no es elevada al tener un tiempo de respuesta de 125 ns, pues mejora sensiblemente relación de señal/ruido.

El diagrama de bloques de la figura 4.5 muestra como está construido, a la izquierda del mismo se tienen los 128 *pads* de conexión al detector en un espacio de $44 \mu\text{m}$, mientras que a la derecha del mismo están las entradas y salidas del chip.

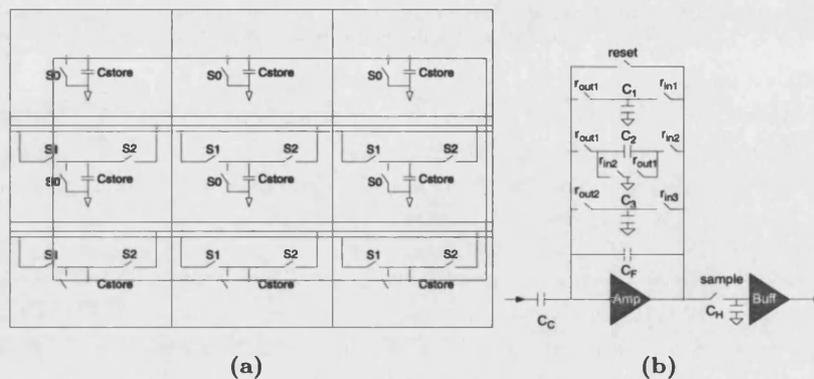


Figura 4.6: Esquema de una celda individual de memoria del chip APV5 (a) S1, S2 y S0, donde son conmutadores controlados externamente. En (b) se muestra la última etapa del APV5, donde se gestiona el *modo deconvolución* o *modo integración*.

4.4.2 Preamplificador y shaper.

En este bloque (figura 4.7) se tienen tres etapas de amplificador: Un amplificador sensible a la carga, un conformador (*shaper*) y por último un amplificador de buffer.

Preamplificador: La primera etapa contiene una capacidad de entrada de 0.6 pF lo que define una sensibilidad a la carga del orden de 6.7 mV/mip . La alimentación se realiza con $+2 \text{ V}$ y -2 V , y la corriente que consume por canal es de $500 \mu\text{A}$. Es la etapa que más contribuye a la disipación de potencia de $4 \text{ V} \cdot 500 \mu\text{A} = 2 \mu\text{W/Canal}$.

Shaper: Este es el segundo elemento de la cascada de amplificadores, está diseñado para dar una forma de pulso de tipo CR-RC, con pico en 50 ns (figura 4.7) equivalente a dos cruces de haz. La ganancia de esta etapa es aproximadamente de 4 y la magnitud de la señal después de esta etapa es de 27 mV/mip .

Amplificador de buffer: Este último elemento es un amplificador con una resistencia de entrada de $1.5 \text{ K}\Omega$. Este elemento tiene una respuesta lineal sólo en la zona correspondiente a 1 mip. Al final de esta etapa se tiene una ganancia de 36 mV/mip .

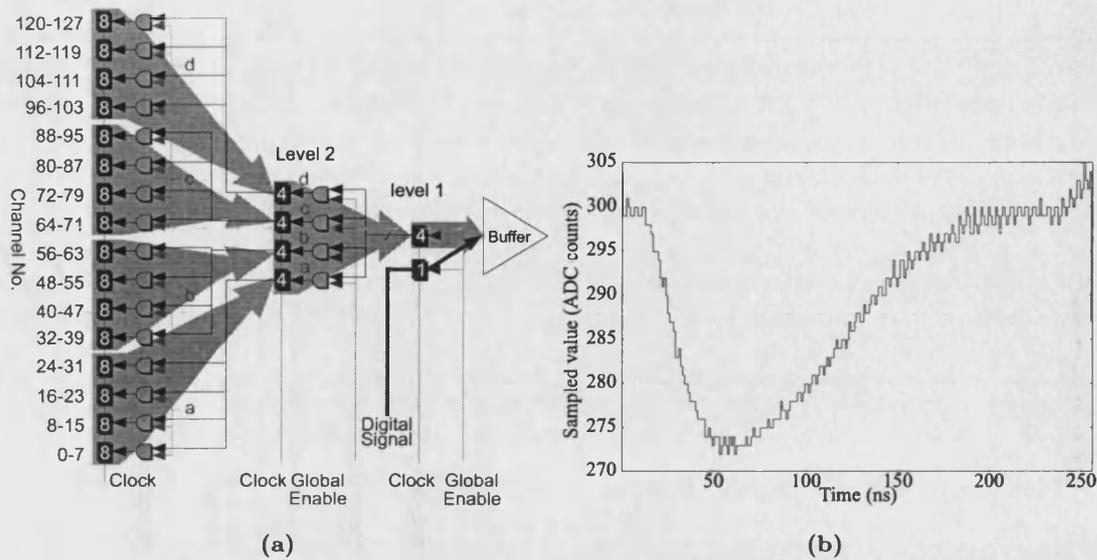


Figura 4.7: En (a) se muestra un esquema de la salida del multiplexor del APV5. La figura (b) muestra la forma del pulso una vez se ha pasado por todo el chip medida a intervalos de 1 ns

4.4.3 Buffer de retraso.

Este elemento analógico es necesario para proporcionar la memoria analógica para retrasar la salida el tiempo que LVL1 realice la toma de decisión. Por tanto requiere proporcionar celdas de memoria para cada canal, y para cada celda de tiempo. Para adaptarse a los requerimientos de tiempo, cada canal contiene 160 posiciones, de esta forma el *buffer* de retraso contiene 20480 ($128 \cdot 160$) celdas. Cada celda consiste básicamente en un capacitor cuya carga y descarga se puede controlar.

El control de las celdas (en la figura 4.6 aparece una descripción de los conmutadores) se realiza a través de tres conmutadores para proporcionar la lectura de la entrada, la salida y la descarga del condensador de memoria. Así, las celdas temporales de cada canal comparten una misma línea de entrada y otra misma línea de salida, cada ciclo de lectura requiere que el conmutador S0 descargue la celda de memoria Cstore. Una vez realizada esta operación S1 permite que la celda de memoria se cargue. En general esta celda de memoria se irá actualizando con el tiempo siguiendo este proceso. Si se produce un *trigger*, el chip dispone de una lógica que marca el suceso y permite descargar la señal almacenada a través de S1.

Como la señal de voltaje almacenada en el condensador depende de el valor de la capacidad del mismo es especialmente importante mantener un tamaño constante (de 30 por $31 \mu\text{m}^2$). Así mismo cuanto mayor sea la capacidad de dicho condensador mayor va a ser la ganancia en el buffer. El tamaño del condensador viene determinado por el tamaño que debe tener en el chip, y esta limitado a 115 fF. Esto significa una carga de 4.1 fC para un mip (para los 36 mV de entrada).

Es importante notar que variaciones en un mismo canal de la capacidad de la celda de almacenamiento para dos posiciones distintas producen una variación de la ganancia que no es deseable. En el modo integración se traduce en un pedestal por celda temporal que se puede eliminar posteriormente, mientras que en modo deconvolución es un ruido que no se puede eliminar posteriormente.

4.4.4 Amplificador de lectura.

El amplificador de salida es un dispositivo sensible a la carga. El control de este amplificador (conmutadores, lógica...) es efectuado por el bloque *APSP sequencer* (figura 4.5).

Antes de volcar la carga al exterior ésta se almacena en tres condensadores (C_1 , C_2 y C_3 de la figura 4.6) antes de ser leída y almacenada en el *buffer* de salida. En esta etapa es donde se distinguen los dos modos de operación: *modo integración* donde sólo uno de los condensadores se carga y vuelca al *buffer* de salida, o *modo deconvolución* donde tres muestras van a los distintos condensadores y luego son pesados por el condensador de muestreo³ Los pesos están calculados para una señal como la que aparece en la figura 4.7 a una tasa de muestreo de 25 ns. Posteriormente la salida una vez procesada se almacena en el multiplexor de salida.

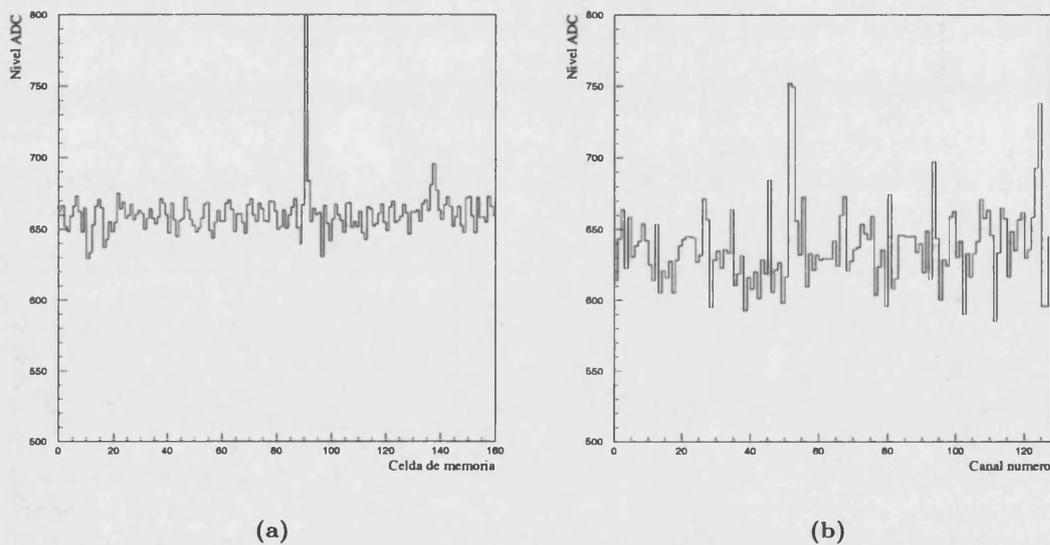


Figura 4.8: La gráfica (a) muestra las diferencias de carga en todas las celdas de memoria para un único canal, igual amplificación de entrada pero distinta capacidad en celdas de memoria, la gráfica (b) muestra el efecto para todos los canales en una única celda de memoria, distintas amplificaciones de entrada para cada canal.

4.4.5 Multiplexor de salida.

En esta etapa se realiza el multiplexado de 128:1 canal. Para poder llegar a los requerimientos de 40 MHz de salida se optó por una arquitectura distinta en éste chip que consiste en que sólo una de las etapas trabaja a 40 MHz mientras que cada uno de los niveles siguientes trabaja a la cuarta parte de la frecuencia: 10 MHz y 2.5 MHz.

En este esquema pues la salida del APV5 no sale *ordenada* en cuanto al orden espacial de los strips. La salida del chip se completa con una cabecera de control de 32 bits que se encarga de decir que celda temporal es la que ha sido afectada por el *trigger*.

La relevancia de que la salida venga multiplexada de esta forma está en que si existe un desfase entre los ADC de lectura y la salida analógica del chip éste no tiene que afectar al strip

³Esta técnica es equivalente a un filtrado paso alto digital, como ya hemos comentado, pero realizado de forma analógica, pues no se realiza digitalización en todo el chip y si en la cadena de lectura.

adyacente. Es decir no se espera diafonía (*cross-talk*) entre strips adyacentes por efectos de la lectura de la electrónica.

El tiempo total de volcado de un suceso es de:

$$T_{total} = T_{head} + T_{out} = 32 \cdot 25ns + 128 \cdot 25ns = 4 \mu s \quad (4.2)$$

que corresponde a 32 ciclos de la cabecera a 40 MHz (T_{head}) y 128 ciclos de cada uno de los canales leídos del detector (T_{out}).

4.4.6 Prestaciones del chip.

Por último vamos a describir cuales son las prestaciones medidas del chip haciendo énfasis en aquellas que nos afecten para los tests sobre el detector.

Forma del pulso: La forma del pulso es crucial para el filtrado de ruido y la efectividad de la deconvolución. Dado que los chips que se utilizaron en el test-beam no pudieron funcionar a los 40 MHz, quedándose en 20 MHz el *modo deconvolución* carece de sentido pues éste sólo lo tiene cuando el muestreo se realiza a la frecuencia adecuada.

Las medidas han sido realizadas en laboratorio inyectando una carga en la primera etapa del detector y variándola a intervalos de nanosegundos relativas a la señal de *trigger* del chip, obteniendo una buena forma correspondiente al filtro CR-RC de la entrada (figura 4.7).

Ruido: Los límites más importantes de señal ruido de la cadena son los que proporcionan los chips de lectura. Para poder cuantificar el ruido, en el proceso de fabricación del detector se generaron chips con elementos separados del APV5 y así poder analizar sus contribuciones. En particular se contaba con el sistema de amplificador y de la etapa de *buffer-multiplexor* (figura 4.5).

La primera etapa proporciona unos niveles de ruido de 450 el+45 el/pF (el último término corresponde a la capacidad del dispositivo de entrada). Las medidas de ruido completas muestran valores más altos que los observados en los amplificadores por sí solos. En total el ruido que se tiene con todas las etapas es de 1230 el+50 el/pF.

Uniformidad de respuesta: Una respuesta ideal requiere que cuando no se tiene ninguna señal en la entrada todos los canales y posiciones de memoria tengan el mismo nivel. Debido fundamentalmente a las diferencias de acoplos en las distintas cadena. Eliminar este tipo de problemas en *offline* puede ser complicado especialmente cuando se trabaja en modo deconvolución puesto que en este momento están afectados más de un canal de memoria. Al no ser posible operar en *modo deconvolución* la corrección *offline* fue posible.

Mientras que como veremos la diferencia de nivel en cada canal es debida a la diferente amplificación (debido a la fuerte correlación encontrada entre la ganancia y el pedestal), la variación en las distintas celdas de memoria es fundamentalmente debida a las diferencias entre las capacidades de las memorias analógicas, observándose variaciones menores (figura 4.8).

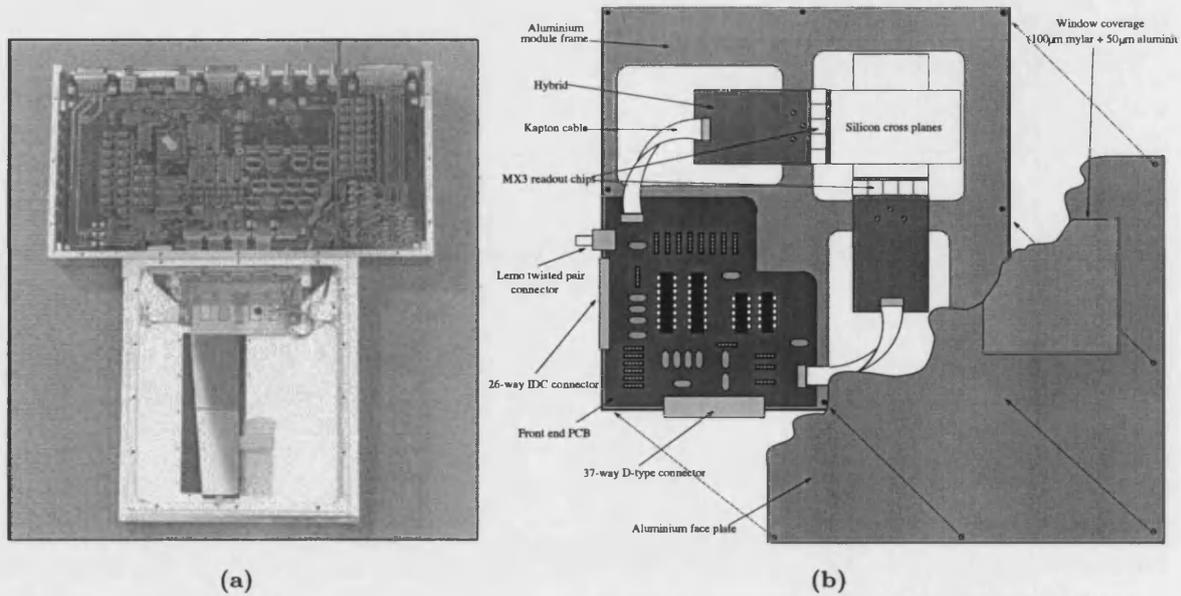


Figura 4.9: La fotografía (a) muestra el detector preparado para ser insertado en el Test-Beam, la figura (b) muestra la disposición de uno de los módulos X – Y del telescopio.

Tabla 4.1: Posición relativa de cada uno de los detectores que formaban el sistema en el eje Z DUT se refiere a la posición del detector objeto de nuestro test.

Módulo	T_1		T_2		T_3		DUT
Coordenada	x	y	x	y	x	y	-
Posición Z(cm)	0.0	0.1	73.9	74.0	76.5	76.6	68.2

4.5 Módulo en el *test-beam*

Para testear el detector en el haz, se unieron los dos detectores entre ellos en un soporte de fibra de carbono. El híbrido se conectó por medio de un adaptador denominado *fan-in* que pasaba de las 145 μ m de la parte superior a las 40 μ m del chip de lectura. Para controlar el chip la electrónica se conectó aparte tal como se aprecia en la figura 4.9. Para reducir la longitud de atenuación del detector la cobertura de aluminio presentaba una ventana de *mylar* (plástico aluminizado) para evitar al máximo el múltiple scattering.

Se montó un telescopio que consistía en un bloque de precisión de granito donde se montaban varios detectores. El telescopio lo formaban 6 planos de silicio montados en tres pares XY para poder definir la dirección del haz según la figura 4.10.

El detector empleado para el microscopio es el mismo que el empleado para el microvértice del detector *OPAL*. La lectura y funcionamiento de este detector ha sido descrita en el capítulo 3. Debido a que este era el detector con más canales, 640 por plano a una frecuencia, y una tasa de 8 bits por canal, la tasa de datos estaba prácticamente copada⁴ por la tasa de datos del telescopio. En los años siguientes para evitar este problema se empleó un DSP que realizaba la substracción del ruido común y pedestales durante la toma de datos permitiendo reducir el ancho de banda hasta un 300%, y mejorando la toma de datos.

⁴esto representaba en algunos casos cerca del 90% de información empleada en detectores cuya respuesta se conoce.

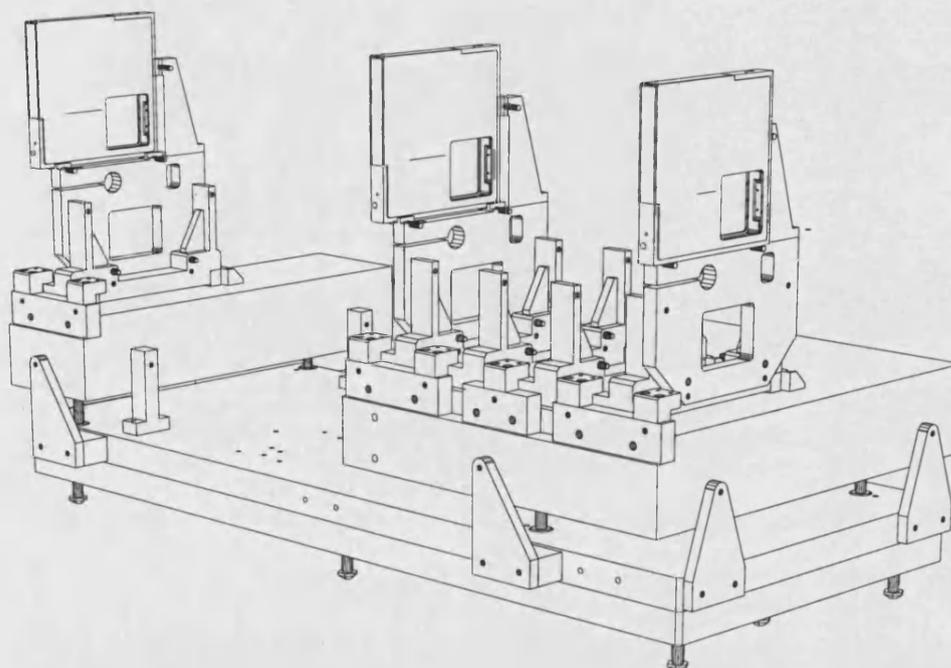


Figura 4.10: Esquema del telescopio de granito utilizado por al colaboración RD20 para el test de detectores

El detector testeado admitía en el soporte 12 posiciones para ser *iluminado* por partículas (piones fundamentalmente) en un haz con una sección de 1 cm (horizontal) por 2 cm (vertical), definidos por la aceptación del telescopio.

4.5.1 Mejora de la señal/ruido

Debido a los procesos de construcción de capacitores en tecnología CMOS y por tanto en el chip APV5 existen diferencias de capacidad en las celdas de memoria, que ocasionan una variación en los pedestales dependiendo de la celda ocupada. Como los sucesos se almacenan de forma aleatoria en todas las celdas del chip, existen variaciones de pedestales para un mismo canal de lectura. Esto si no es corregido introduce un ruido adicional que afecta a los dos modos de funcionamiento del chip.

La corrección de pedestales se realizó en dos dimensiones, celdas temporales y canales del detector. Gracias a la cabecera que proporciona el chip con información acerca de la celda temporal⁵ (ver sección 4.4.5), se obtiene el pedestal para todas las celdas de memoria (una vez el *common mode* ha sido substraído).

Las figuras 4.11 muestran el efecto que tiene dicha corrección en las eficiencias y distribución de señal del detector con y sin corrección en dos dimensiones de los pedestales.

Las distribuciones de ocupación de ruido con y sin corrección son idénticas puesto que la señal en ambos casos está normalizada con el ruido.

Como las variaciones de capacidad implican también variaciones de la ganancia de cada canal, estas variaciones inciden en el ruido que medimos con el detector. De esta forma cada celda temporal lleva asociada por canal un ruido (definido en el análisis como la desviación

⁵Otros chips analógicos que se emplearon durante el mismo periodo como el FELIX [102] no disponían de esta información aunque presentaban mejor amplificación de entrada y menor ruido, no siendo crítica esta cualidad.

cuadrática media de la señal cuando no hay traza presente), que es calculado también en dos dimensiones.

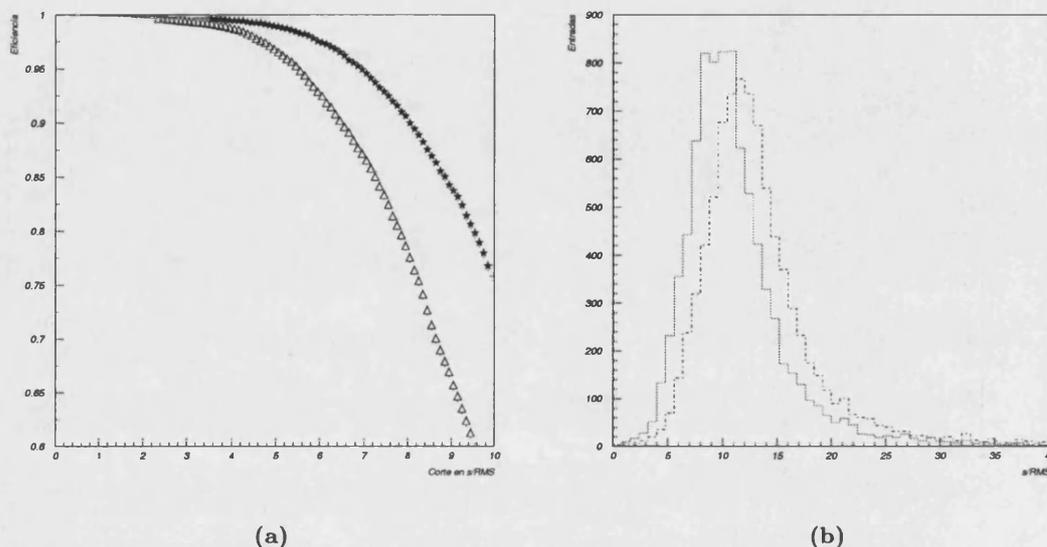


Figura 4.11: La figura (a) muestra la mejora en la eficiencia al aplicar o no la corrección de pedestales 2D, la figura (b) muestra como cambia la distribución de la señal a efectuar dichas correcciones.

4.5.2 Eficiencia y ruido del detector.

Antes de calcular las eficiencias y ocupación de ruido del detector, se realizaron los siguientes cortes para selección de sucesos.

- Se realizó el cálculo de pedestales como se describe en 4.5.1, estos pedestales se substraen por suceso a cada canal así como el ruido común calculado como un polinomio de orden 2.
- Para eliminar al máximo las posibles dependencias con el prototipo del chip de lectura se eliminaron todos los sucesos correspondientes a canales temporales con pedestales elevados tal como se puede ver en la figura 4.8. Debido a problemas en la conexión del chip con el detector o intrínsecos del chip 25 de los 128 canales no funcionaron. Estos estaban juntos en tres bloques de 4, 13 y 8 canales. Los canales adyacentes a estos bloques se eliminaron del test para eliminar las posibles dependencias con la electrónica.
- Para poder detectar los canales ruidosos, se representan por *strip* en una dimensión el valor de la relación S/N. Así se eliminan todos aquellos canales que tienen una densidad de señal 6 veces superior a los vecinos. La figura 4.15) muestra la correlación de señales entre un plano del detector y el detector en test. Muestra el mapa de canales muy ruidosos, e introduce una reducción adicional de 6 strips.

los canales que han pasado cierto umbral de S/N de nuestro detector con los que pasan de ese umbral del telescopio. Como puede verse existe un número de canales que no funcionan correctamente. Estos canales presentan además un nivel constante de ADC (no tienen señal) por lo que pasan el threshold al efectuar la corrección de *common mode*.

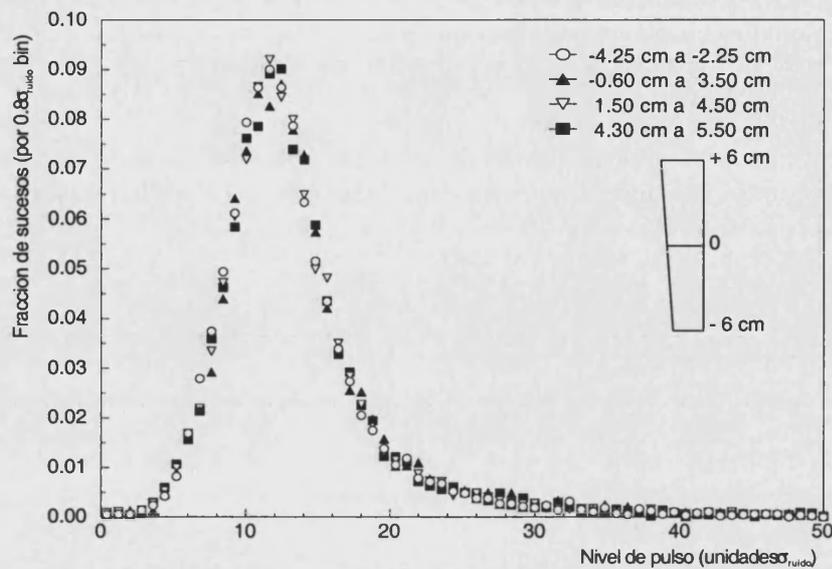


Figura 4.12: Relación S/N obtenida en el detector sobre distintas posiciones del detector.

- Debido a problemas con la conexión del detector al chip o problemas intrínsecos al chip, 25 de los 128 canales no proporcionaban ninguna señal (ni ruido común). Estos estaban juntos en tres bloques de 4, 13 y 8. Para eliminar dependencias del análisis con problemas debidos al carácter experimental de los chips, estos canales así como los canales adyacentes (31 canales en total) fueron eliminados del análisis.
- Con el telescopio y el detector alineados, se seleccionan sucesos donde se exige una única traza predicha por el telescopio, que es extrapolada al plano del detector. Este corte permite que la eficiencia sea calculada sin que se produzca apilamiento de sucesos en el telescopio no vistos por el APV5 con un tiempo de respuesta 100 veces más rápido que el Vicking.
- Se calculó por canal la relación entre la señal que mide el ADC una vez substraído el ruido común y el ruido asociado a dicho canal. Este cociente lo denominaremos relación S/N de cada canal. Permite tener una medida de la carga con independencia de la amplificación de cada canal.

Todos estos cortes producen una reducción de 43 canales sobre 128 originales, y de 8 sobre 160 celdas temporales.

Con estos cortes se procedió a realizar el análisis, para ello se consideraron las siguientes definiciones de ruido y de señal:

- Se cuentan los canales que sobrepasan un determinado valor de relación S/N para todos los sucesos.
- Todos los canales que están a una distancia 4 veces la anchura de un *strip* que sobrepasen un determinado valor de relación S/N son considerados como ruido a éste valor.
- A cada corte de relación S/N, se examina el *strip* donde se ha extrapolado la traza y se cuenta el número de veces que dicho canal ha sobrepasado este valor.

- El cociente entre el número de veces que un canal ha sobrepasado un determinado umbral de S/N y todos los sucesos analizados, es lo que definimos como eficiencia del detector a un valor de S/N.
- El cociente entre el número de canales que han sobrepasado un determinado umbral de S/N, sobre todos los canales que no se consideran afectados por la traza, es lo que definimos como ocupación de ruido.

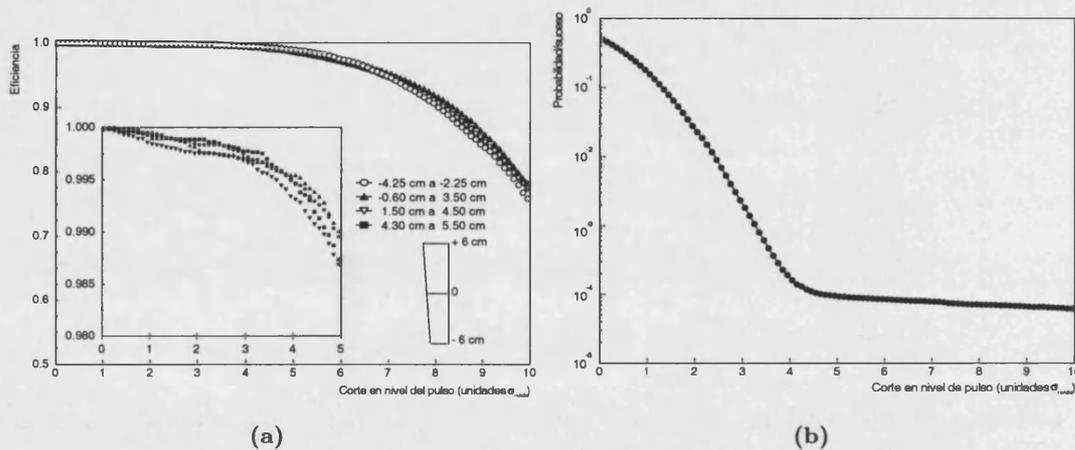


Figura 4.13: La figura (a) muestra la eficiencia del detector a distintos cortes de señal/ruido, la figura (b) muestra la ocupación de ruido del detector en las mismas unidades.

En la figura 4.12 se tiene la distribución de señales obtenidas en strips donde se realizaba una extrapolación de la traza reconstruida con el detector, expresado en unidades de señal ruido. Esta distribución sigue una forma típica de *Landau*, no mostrando dependencia con la posición a que se ilumine el detector. Con esta electrónica la relación S/N más probable corresponde a 11 : 1. La no dependencia de la señal obtenida con la posición de paso de la partícula es una mejora en cuanto a las prestaciones del detector *forward* de silicio respecto a los MSGC.

Las figuras 4.12 muestran que para un corte en S/N se mantiene una eficiencia mejor que un 95 por ciento mientras que la ocupación de ruido es de $2 \cdot 10^{-4}$ lo cual es adecuado con el requerimiento de ser menor de $5 \cdot 10^{-4}$ [33].

Por último vamos a comparar las distintas salidas de ADC entre los detectores que pertenecen al telescopio, y el equipado con el chip APV5 4.14 una vez substraidos pedestales. Mientras que los detectores del telescopio tenían S/N del orden de 50 (electrónica lenta con muy poco ruido, capaz de trabajar a 0.5 MHz), el detector objeto de este análisis equipado con el APV5 mostraba una S/N del orden de 11 (electrónica capaz de trabajar a 40 MHz).

4.5.3 Estudios de resolución.

La resolución del detector es el parámetro que finalmente nos va a dar las prestaciones del detector para poder realizar medidas de trazas con precisión. Dado que la electrónica empleada para este detector es de tipo analógico, es posible realizar técnicas de pesado y promediado de carga para mejorar la resolución.

Dado que el detector ha de servir para comparar resultados con la elección de electrónica de ATLAS, y esta es binaria, es necesario poder establecer una comparación real con este tipo de detectores. Para ello, el algoritmo de resolución empleado es el siguiente:

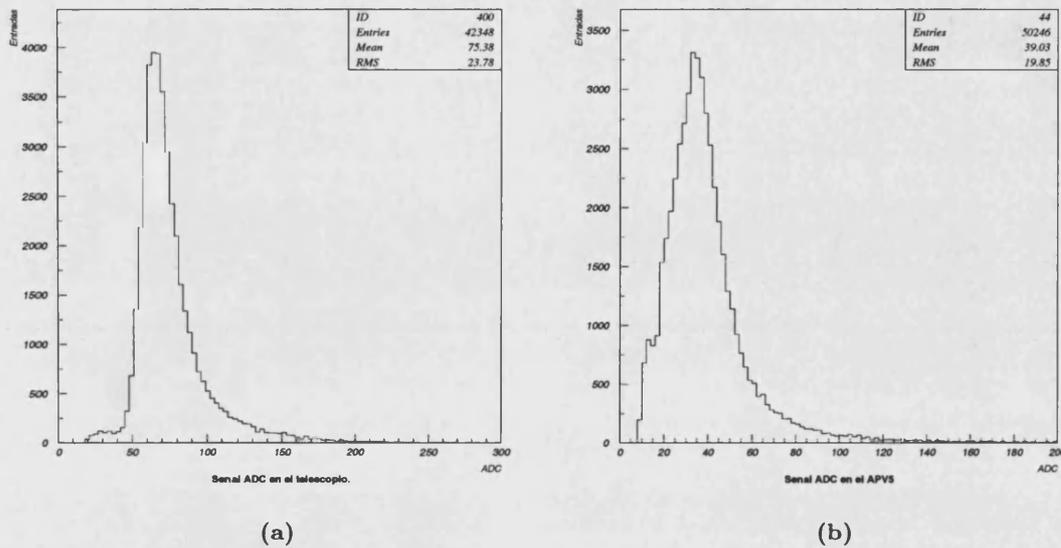


Figura 4.14: La figura (a) muestra la salida típica de ADC (señal/ruido) de detectores equipados con electrónica convencional, mientras que la figura (b) muestra la salida de ADC (señal/ruido) de un detector equipado con electrónica rápida capaz de trabajar en las condiciones de LHC.

- La coordenada X_{local} define la posición de los canales en el centro del detector. Al ser un detector de anchura variable es necesario para corregir este valor y hacer uso de la información ortogonal a dicha coordenada dada por los telescopios. Combinando estas dos informaciones tenemos:

$$X_{local} = \Delta(Y) \cdot C_i \quad (4.3)$$

donde C_i es el canal donde consideramos que hay señal y $\Delta(Y)$ es la variación de anchura entre *strips* definida como:

$$\Delta(Y) = dp/dy \cdot Y + \Delta_0 \quad (4.4)$$

siendo Y la traza predicha por el telescopio, dp/dy es la variación de anchura por unidad de longitud, y Δ_0 es la anchura entre *strips* en la parte central del detector.

- La posición se obtiene de la media sin pesar por la carga de todos los canales que en un cluster han sobrepasado un nivel de S/N determinado.

Para completar el estudio se agrupan los hits en categorías, es decir grupos de hits que afectan a un *strip*, a dos *strips* y más de dos. El porcentaje que se obtuvo de cada categoría con la eficiencia al 97%, es de 90% para el caso de que se afecte un sólo canal y del 10% restante afectando a dos *strips*. Se concluye que el detector es apto para realizar lectura binaria, y que la división de carga es apenas inexistente.

Así se observa una distribución prácticamente uniforme de hits en el intervalo alrededor del *strip*, esto es debido a la gran distancia entre *strips* así como la eliminación de *strips* intermedios,

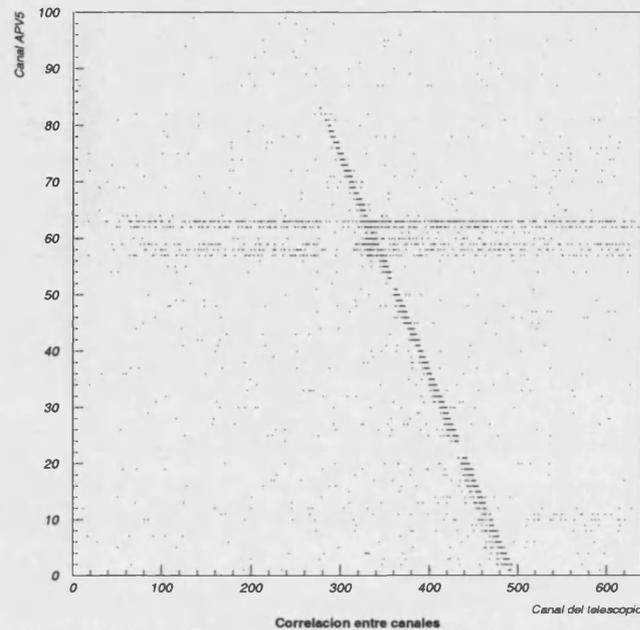


Figura 4.15: Strip con señal del APV5 frente a strip con señal de uno de los detectores del telescopio que han pasado un determinado umbral.

los mecanismos de acoplo de cargas entre estos se ven muy reducidos. La distribución de la figura 4.16(a) contiene por separado los hits producidos en un solo strip y en negro los hits que afectan a dos strips (dos strips adyacentes cuya σ_{ruido} es mayor que 3).

Por último la figura 4.16(b) muestra los resultados finales para las distintas posiciones donde se *iluminó el detector* así como dicha resolución dividida por el tamaño medio del strip comparado con la resolución mínima esperada ($1/\sqrt{12}$). Se puede comprobar que la resolución espacial obtenida es ligeramente mejor a dicha cantidad debido a los sucesos que afectan a más de un strip.

Este efecto de mejora sobre el valor teórico lo produce el hecho de que en la zona que está entre dos *strips*, la carga se reparte entre los strips vecinos segmentando la distancia entre *strips* en tres zonas.

4.6 Conclusiones.

Como hemos mencionado al comienzo del capítulo el objeto de este estudio era comprobar que la tecnología de silicio fuera competitiva con la tecnología de lo MSGC. Hemos comprobado que:

1. Incluso con una electrónica front-end que no esté diseñada específicamente para el detector⁶, los resultados son competitivos con los resultados de MSGC obteniendo 99.5 % de eficiencia frente al 97 % de eficiencia, para la misma ocupación electrónica de ruido.
2. La ocupación de ruido por unidad de superficie que presentan los detectores de silicio es menor si tenemos en cuenta que los detectores MSGC requieren una separación entre

⁶Nuestro detector es de tipo DC y la electrónica está optimizada para detectores de tipo AC

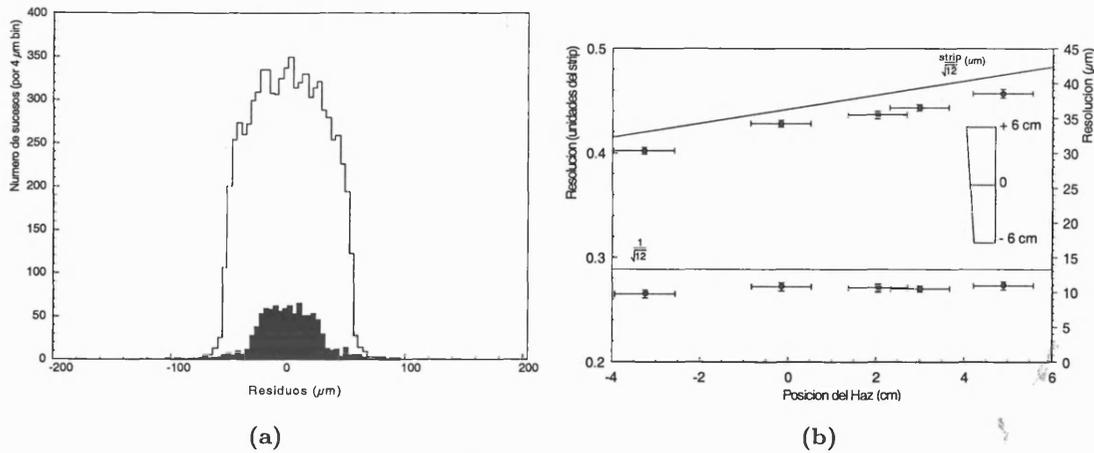


Figura 4.16: La figura (a) muestra los residuos para hits de un único canal (en blanco) y para hits de dos canales (en negro). La figura (b) muestra la resolución espacial del detector en distintas regiones del mismo, la línea muestra el caso teórico de que la resolución fuera ideal.

canales mayor para poder funcionar, frente a los detectores de silicio, que se ha de reducir más la separación entre canales. En contra, los detectores de silicio presentan más canales electrónicos de lectura.

3. Existe uniformidad de respuesta en todo el detector, a pesar de la variación de anchura entre *strips*.
4. Los resultados acerca de la resolución son competitivos incluso con un detector que no esté especialmente optimizado para acoplar carga entre strips realizando medidas analógicas sugiriendo que es posible llegar a los objetivos de ATLAS con detectores equipados para lectura binaria.

El prototipo testado cumple las especificaciones del technical proposal de ATLAS [33] con unas prestaciones incluso superiores respecto a los MSGC propuestos. La eficiencia de detección que se tiene es mejor del 99.5 % a un corte de $4 \cdot \sigma_{ruido}$ con una ocupación de ruido alrededor de 10^{-4} . La resolución espacial es consistente con $\Delta x / \sqrt{12}$.

Capítulo 5

Elección de la electrónica de lectura.

El *technical proposal* [33] contiene los requerimientos mínimos que ha de tener la electrónica de lectura para poder proporcionar los servicios mínimos de resolución y reconstrucción de trazas. Estos implican una eficiencia mayor o igual al 95 % y una tasa de ruido inferior a $5 \cdot 10^{-4}$, funcionando a frecuencia de reloj de 40 MHz.

El planteamiento para llegar a estos objetivos se centraba en base a dos posibles soluciones:

Electrónica analógica: Consiste en obtener información de la carga depositada en los strips. La información de la carga se traduce en una palabra de 6 bits.

Electrónica binaria: La única información disponible es si la señal producida ha sobrepasado un umbral preestablecido. La información acerca de la carga se reduce a 1 bit.

La elección de cada una de las tecnologías lleva consigo la elección de un sistema diferente de detectores, tal como se ha descrito en el capítulo 2 mientras los detectores optimizados para la lectura analógica, con una resolución de $20 \mu\text{m}$ tienen una separación mayor entre strips, y optimizan la resolución espacial empleando strips intermedias y elementos que favorecen la división de carga, los detectores optimizados para lectura binaria tienen una distancia entre strips menor ($75 \mu\text{m}$ frente a $120 \mu\text{m}$), y tratan de evitar la división de carga.

De esta forma mientras que con los detectores analógicos pueden llegarse a obtener resoluciones de $12 \mu\text{m}$, en modo deconvolución [102], la resolución mejor que se puede llegar con los detectores binarios está limitada por el valor de $75 \mu\text{m} / \sqrt{12} = 21 \mu\text{m}$.

La electrónica binaria tiene a su favor los siguientes aspectos:

- La lectura es considerablemente más rápida en estos detectores, además la información generada por detectores binarios es al menos 6 veces menor que la que producen los detectores binarios.
- La lectura binaria es más sencilla de incorporarse a segundo nivel de *trigger*.
- Es más sencillo incorporar en el propio chip algoritmos de compresión de datos, que reduzcan por tanto el ancho de banda requerido.
- La electrónica tiene un precio menor, al no necesitar de ADC adicional para procesar la información.
- Tienen una mayor granularidad, o número de canales por centímetro.

Por otra parte, la electrónica analógica tiene a su favor:

- Es una tecnología muy probada en multitud de experimentos de física de partículas, la tecnología se conoce muy bien. Es una solución pues conservadora.
- Se dispone de información para poder corregir problemas a posteriori. Al disponer de la información correcta de la carga depositada es posible corregir efectos tales como el ruido común [103].
- Es posible emplearla de igual forma en un detector de simple cara que en un detector de doble cara. Los detectores binarios son muy sensibles al ruido común, y éste es elevado en la cara que esta a alto voltaje¹.
- Se puede mejorar la resolución espacial, conforme los algoritmos de reconstrucción de la carga se mejoren.

El objetivo de este test-beam era analizar las características de detectores binarios en haz, antes y después de una radiación equivalente a 10 años de funcionamiento de LHC. El estudio acerca del comportamiento de la electrónica en campo magnético así como el funcionamiento de los detectores y electrónica en haces de alta intensidad, simulando las tasas esperadas cuando opere a las luminosidades $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ de ATLAS.

5.1 Electrónica binaria

En el capítulo 4 se realizó una discusión acerca del funcionamiento de un chip diseñado para las especificaciones ATLAS de lectura analógica. En éste se realiza un análisis de un sistema diseñado para las especificaciones ATLAS con lectura binaria.

La electrónica binaria presentada en esta sección consiste en tres chips basados en dos tecnologías diferentes (ver figura 5.1):

Parte analógica: Basado en tecnología bipolar, consiste en un chip que compara la carga de entrada con una referencia externa, y a la salida da una señal digital correspondiente a dicha comparación. El chip empleado en este test fue el CAFE [104].

Parte digital: Es un chip basado en tecnología CMOS que contiene una pila digital que almacena hasta 128 sucesos consecutivos (uno cada 25 ns), leídos directamente desde el chip con la parte analógica. El chip utilizado fué el CDP [105].

Parte de control: Este chip en tecnología CMOS se encarga de recoger las tramas generadas por la parte digital, y enviarlas al exterior. El chip encargado de dicha tarea fué el HAC [106].

La carga recogida, es contrastada con la señal de referencia del CAFE, esta si sobrepasa de un umbral se convierte en un 1 lógico que es enviada a el buffer digital CDP, en caso de producirse un trigger éste se almacena en un registro posterior y es procesado y enviado fuera a través del HAC.

5.2 Dispositivo experimental.

El montaje experimental se muestra en la figura 5.2. Consiste en los siguientes detectores:

¹La cara que está a alto voltaje es más complicada de aplicar técnicas de tierras que reduzcan el ruido. Generalmente se elige que la electrónica esté al nivel de potencial de tierra para facilitar dicha tarea.

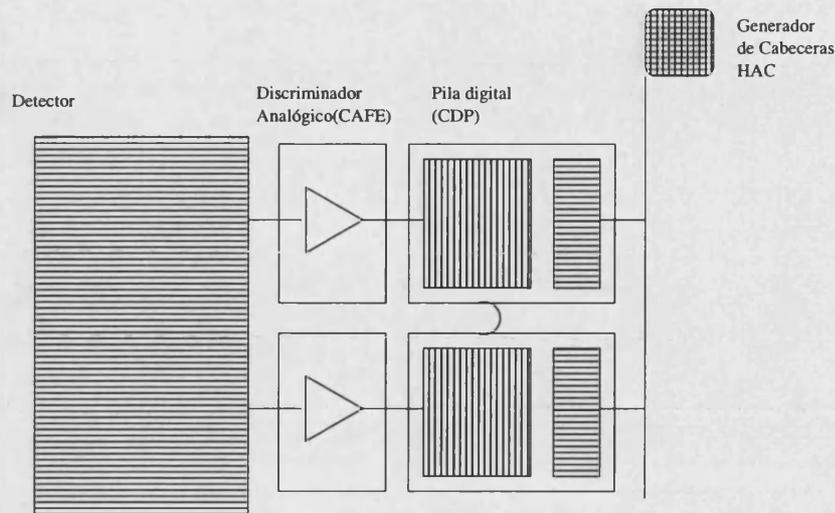


Figura 5.1: Esquema general de cada uno de los componentes de electrónica del sistema binario. El detector se une a los chips analógicos (CAFE) que discriminan la señal. El CDP contiene una pila digital que vuelca en un registro de salida cada vez que se produce un *trigger*. El HAC se encarga de gestionar las cabeceras necesarias para que los comandos se envíen adecuadamente.

Planos telescopio: Con una resolución mejor de $8 \mu\text{m}$ son detectores analógicos leídos cada $50 \mu\text{m}$ con electrónica VICKING.

ATT7: Electrónica irradiada con una dosis de $2 \cdot 10^{14}$ mips/cm², y detector N^+N irradiado con dosis de 10^{14} mips/cm², con inversión de sustrato [107]. La irradiación se llevó a cabo en Berkeley [108] equipado con 256 canales, y una separación entre canales de $75 \mu\text{m}$. Es uno de los detectores que se analizarán.

ATT8: Detector idéntico al anterior pero sin irradiar. Es el otro detector que se analizará, para comprobar el funcionamiento antes de la inversión de la zona N .

LBIC1 y LBIC2: Dos detectores binarios que trabajan en el mismo reloj que ATT7 y ATT8 se utilizan para calibrar en tiempo estos detectores, así como tomar medidas rápidas de trazas. Juegan un papel análogo al de los telescopios. Con peor resolución espacial ($20 \mu\text{m}$ frente a las $8 \mu\text{m}$ del telescopio) pero con bastante mejor resolución temporal (25 ns de respuesta frente a los $2 \mu\text{s}$ de los telescopios).

La inclusión de los detectores equipados con LBIC [109] (otro chip con la misma funcionalidad que el CAFE), tiene por objeto poder hacer una localización temporal de la traza, sobre todo en test de alta intensidad de partículas.

Este montaje experimental permite predecir la posición de la traza con resoluciones del orden de $8 \mu\text{m}$ en el plano de detección.

El diseño de los detectores binarios corresponde a la opción de detectores de tipo barril con la electrónica dispuesta en el centro del mismo. Los detectores equipados con LBIC son módulos de doble cara completos, la figura 5.3 muestra un módulo de características similares al ATT7 y ATT8.

La tabla 5.1 muestra los distintos test realizados con cada uno de los detectores llevados al test-beam y cuyos resultados se presentan a continuación.

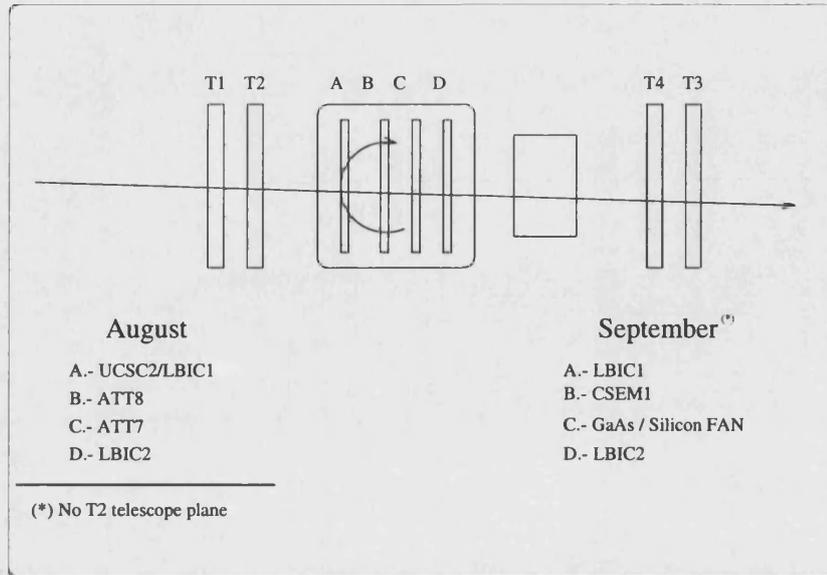


Figura 5.2: Disposición de cada uno de los detectores en el haz.

Tabla 5.1: Características de los detectores del test-beam de agosto de 1996, así como los estudios realizados

Tipo	FEE/Irr	Det. Irrad.	Pitch	Fabricante	Tests	Canales en uso
Test de Agosto						
att7	$2 \cdot 10^{14} \text{ mips/cm}^2$	$10^{14} \text{ mips/cm}^2$	$75 \mu\text{m}$	Hamamatsu	r,v,B,n,hi	256
att8	-	-	$75 \mu\text{m}$	Hamamatsu	r,v,B,n,hi	256
lbic	-	-	-		r,v,B,n,hi	2x768
		Test	Descripción			
		r	Rotación sin campo magnético.			
		B	Rotación con campo magnético.			
		v	Variación de voltaje de depleción.			
		n	Barrido de ruido.			
		h	Barrido de alta intensidad.			

5.3 Análisis de resultados.

El análisis de resultados se realizó conjuntamente a la toma de datos, obteniéndose información de alineamiento con detectores del telescopio así como con los planos de referencia internos. Este análisis conjunto permitía centrar los detectores en áreas distintas o chips concretos para obtener información específica de éstos.

Para poder obtener efectos de detector, se realizaron los siguientes cortes:

- Sucesos con más de una traza predicha por los telescopios.
- Las prestaciones de ruido se realizaron con datos de test-beam. Aunque de esta forma se puede introducir una ocupación de ruido mayor de la que se obtiene en el laboratorio, debido a la falta de control de trazas mal asociadas, se calcula la eficiencia y ruido en análogas condiciones de funcionamiento.
- El ruido se calcula con el conjunto de canales que están a una distancia mayor de $500 \mu\text{m}$ de la traza extrapolada.

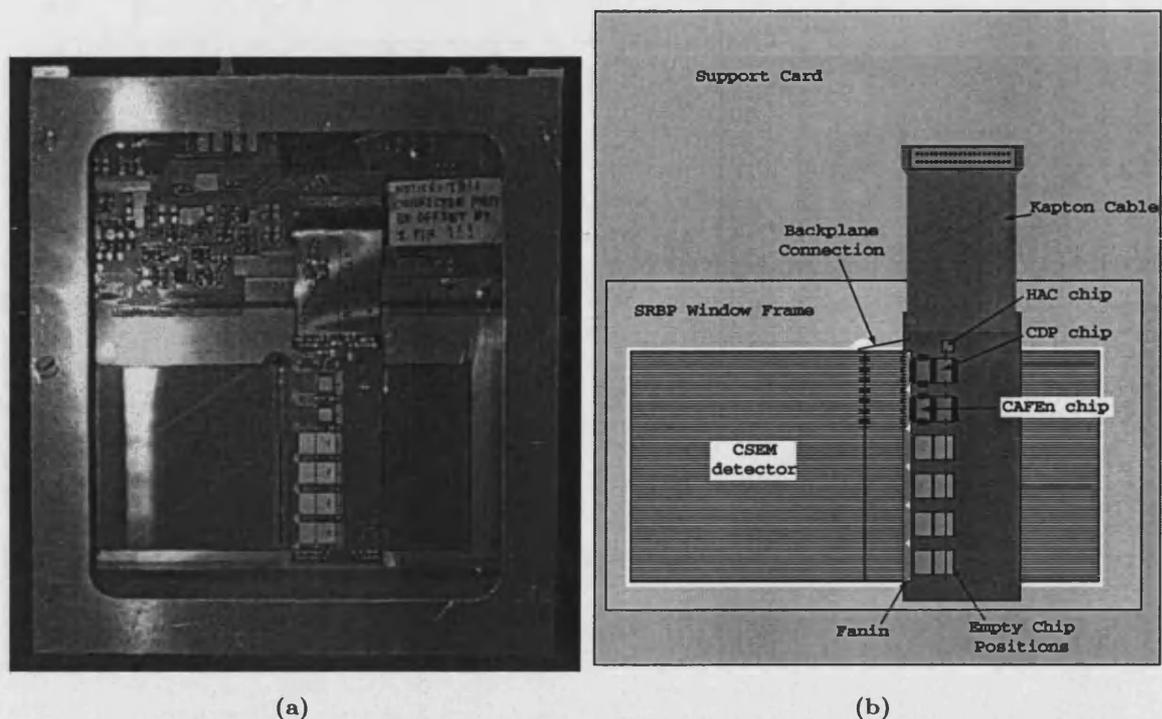


Figura 5.3: Fotografía de un módulo ensamblado en la caja de test (a). En (b) se muestra un esquema mostrando cada parte de la figura.

El análisis consiste en cuantificar las siguientes cantidades:

Multiplicidad: Se define como la media de número de strips que sobrepasan el umbral de detección, en el punto de impacto de la traza. Por diseño esta magnitud debería ser 1 (no existe compartición de carga), sin embargo el incremento de esta magnitud (en presencia de campo magnético) nos indica que existe una dispersión de la carga recolectada.

$\eta(x)$: A diferencia de los detectores analógicos, en detectores binarios se define así como la eficiencia media de detección de la traza en función de la distancia a uno de estos. Esta magnitud, nos muestra las zonas del detector donde existe mayor compartición de carga.

Eficiencia: Se define así a la probabilidad de encontrar un grupo de canales con señal (cluster) en la zona predicha por los telescopios, en un corte de carga determinado.

Valor medio: Es el valor de carga donde la eficiencia es un 50% de la máxima. Da información del máximo de la distribución de landau (ver capítulo 2). Por tanto si se gira el detector la partícula al atravesar más cantidad de material deposita más carga y por tanto esta cantidad aumenta. Si se produce dispersión de carga entre canales (p.ej al introducir campo magnético) el valor máximo de la carga recolectada por canal también disminuye.

Ocupación de ruido: Se define así al número de canales que presentan *señal* en un corte de carga determinado, sobre el resto de los canales, cuando se eliminan los canales predichos por el telescopio. Es una medida de la calidad de la señal del detector a un corte de carga determinado.

Residuos: Distancia predicha por el telescopio menos la posición predicha por el detector (o media aritmética de la posición del cluster). La desviación cuadrática de esta distribución nos da la **resolución espacial** del detector.

5.3.1 Respuesta del detector con el voltaje de depleción.

Para conocer las condiciones de trabajo de cada detector, se realizaron barridos a varios voltajes, sin campo magnético. Variando el nivel de carga del CAFE, se determinó la eficiencia y el valor medio. Debido a que los detectores son de tipo N^+N [91] han de operar a valores mayores del voltaje de depleción (alrededor de 40 V) para operar con eficiencia plena, alcanzando ésta alrededor de 150 V tal como muestra la figura 5.4.

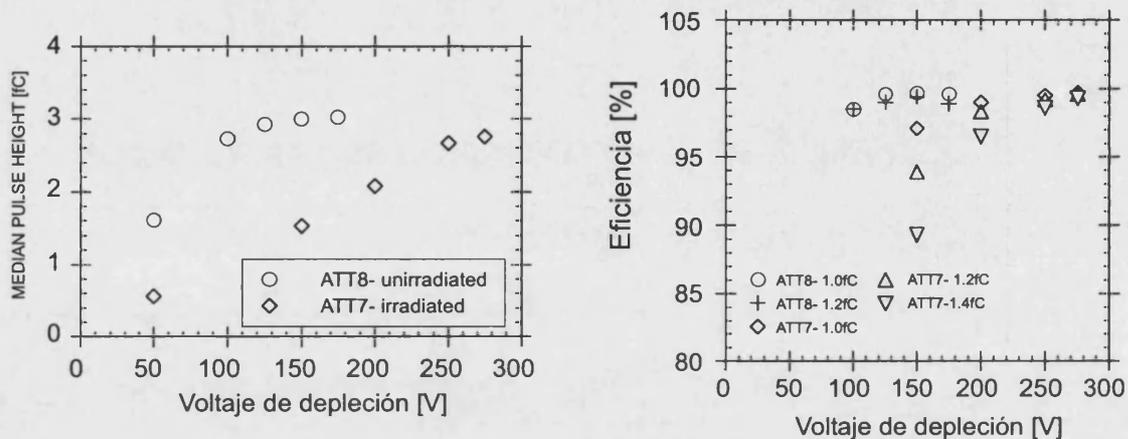


Figura 5.4: Valor medio y eficiencia de los detectores ATT8 (sin irradiar) y ATT7 (irradiado) en función del voltaje de depleción.

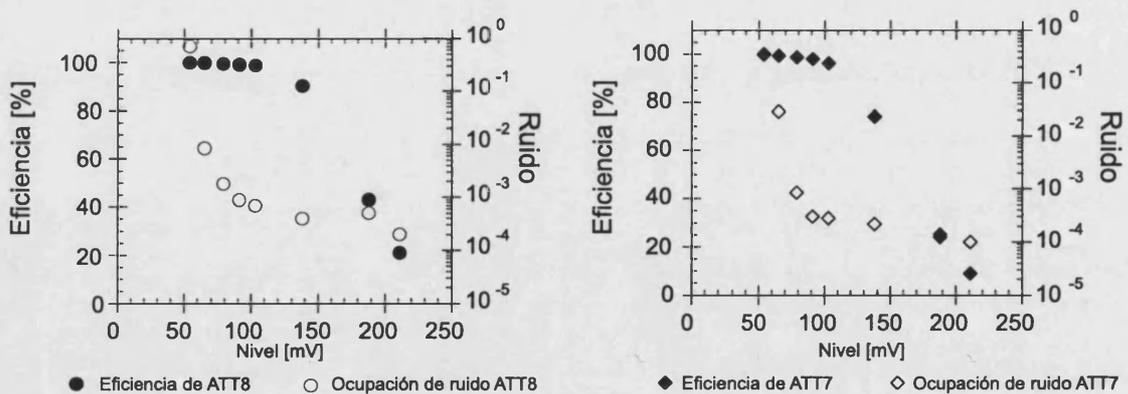


Figura 5.5: Eficiencia de los detectores junto a la ocupación de ruido.

Durante el test-beam no se pudo determinar el voltaje de depleción del detector ATT7. Este valor fue infraestimado [108]. Se alcanza un valor comparable a ATT8 a 275 V, por debajo del voltaje de operación de 300 V.

El valor medio se alcanza en el detector no irradiado a 150 V, se observa sin embargo que para el detector irradiado, dicha magnitud es creciente incluso a 275 V. Un análisis posterior de

CV del detector 10 semanas después del test-beam mostró que el voltaje de depleción en este detector se encontraba a 290 V, resultado de acuerdo con el que se muestra en la figura 5.4.

Los parámetros que afectan directamente a los programas de reconstrucción son la eficiencia del detector, la resolución espacial y la ocupación de ruido. Estos parámetros se calculan realizando barridos de nivel de carga para los diferentes módulos.

La figura 5.5 muestra para los detectores ATT7 y ATT8, funcionando a 12° del haz y con el campo magnético.

Mientras que para el ATT8 1 fC corresponde a 90 mV para el ATT7 este 1 fC de señal está en 80 mV esta diferencia la produce el empleo de dos chips que no están en idénticas condiciones (ATT7 está irradiado), así como al hecho de que cada chip está producido en distintos periodos de fabricación. Las eficiencias y ruido mostradas en la figura 5.5 sugieren que los detectores pueden operar entre 0.8 fC y 1.2 fC

El ruido que se mide sin haz es un factor 10 menor al que se mide en presencia de haz.

5.3.2 Efectos de campo magnético y rotación.

Para comprobar los efectos del campo magnético se insertó todo el sistema de detectores 5.2 dentro de un campo magnético de 1.56 T en la dirección del strip, para simular los efectos de dicho campo en los detectores de la zona barril² tal como operarán en ATLAS.

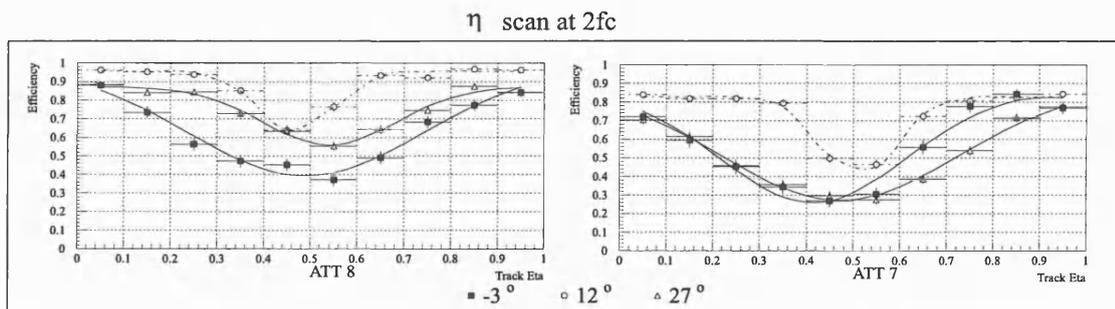


Figura 5.6: Eficiencia de los detectores junto a la ocupación de ruido.

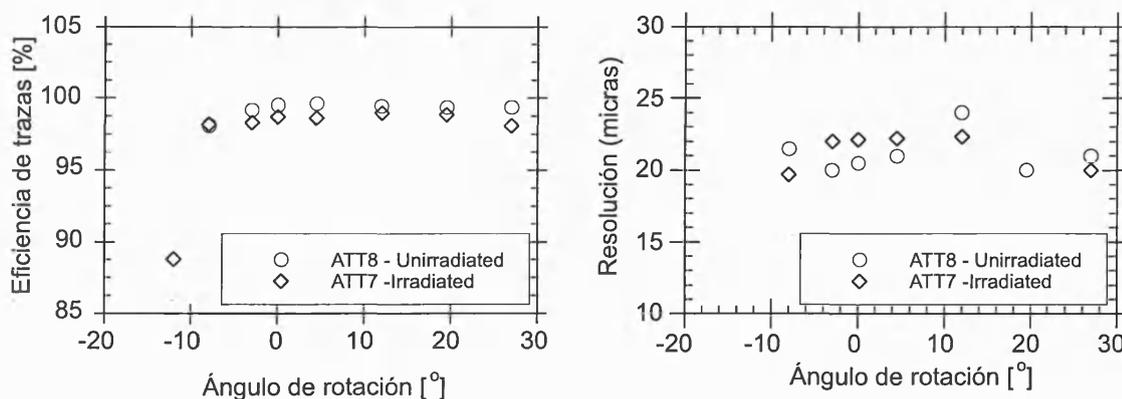


Figura 5.7: Eficiencia angular y resolución de los detectores ATT7 y ATT8 con un umbral de 1fC.

²Aunque los detectores de la parte forward estén también en un campo magnético la orientación del campo magnético en la parte forward es en la dirección del campo eléctrico, por tanto no afecta a su funcionamiento.

De medidas realizadas en anteriores test-beams se espera que el ángulo de Lorentz esté en torno a los 12° [87], compatibles con la expresión teórica introducida en el capítulo 2.

Para poder medir la eficiencia en función de la posición se empleó la elevada resolución de los telescopios. Para tener cierta sensibilidad a la variación de señal en esta región se realiza dichas medidas a 2 fC. Se observa en la figura 5.6 que la pérdida de carga es más estrecha a los 12° , y más ancha en ángulos que alejados del ángulo de Lorentz, que muestran que a 12° , la dispersión de carga es menor.

La figura 5.7 muestra cual es la eficiencia frente al ángulo así como la resolución del detector con un umbral de 1 fC, mientras que para la eficiencia no se muestra dependencia angular, se obtiene un deterioro de la resolución espacial para el ángulo de Lorentz en ambos detectores, la mejora de resolución, se debe al incremento de multiplicidad de hits que se tiene fuera de dicha región como muestra la figura 5.8.

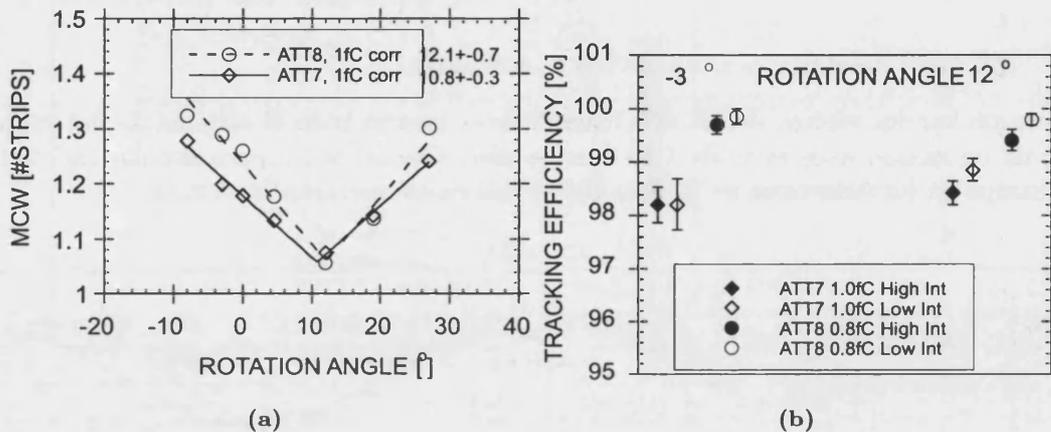


Figura 5.8: La figura (a) muestra la variación de la multiplicidad en función del ángulo de rotación. La figura (b) muestra que la eficiencia de recolección es independiente con la tasa de partículas.

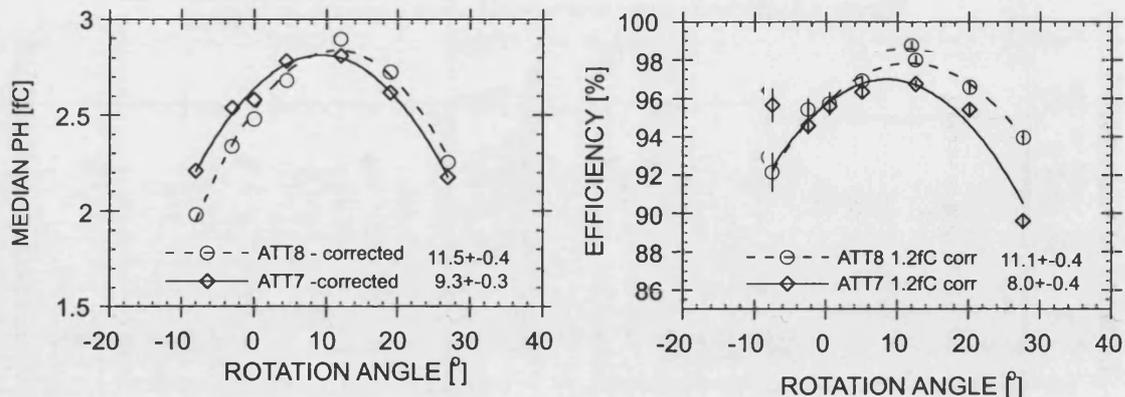


Figura 5.9: Variación del valor medio de eficiencia con la corrección de trazas y de la eficiencia de recolección a 1.2fC.

Para la determinación del ángulo de Lorentz, se procede a calcular el valor medio de eficiencia corrigiendo por el coseno del ángulo para tener en cuenta la mayor deposición de carga (ver figura 5.9). Así mismo se realiza la medida de la eficiencia de recolección a 1.2 fC. Esto muestra que el valor medio para el detector irradiado ATT7 es de $(9.5 \pm 0.5^\circ)$ mientras que para el detector no

irradiado (ATT8) es de $(11.6 \pm 0.5^\circ)$, esta medida está sujeta a errores sistemáticos, por ejemplo el error de rotación del bloque de detectores es de 1.5° , común a ambos detectores, existe pues una diferencia de 2° entre el ángulo de Lorentz de cada detector, hecho que podría explicarse por una disminución de la movilidad del electrón en detectores irradiados.

El ángulo de Lorentz efectivo de 2 T (equivalente al campo magnético de ATLAS) se ha determinado de 12° para detectores irradiados y de 15° para detectores no irradiados, escalando linealmente los resultados anteriores, empleando el factor $2 \text{ T}/1.56 \text{ T}=1.28$

5.3.3 Respuesta a la tasa nominal de LHC.

En los periodos de alta intensidad, el detector interno de ATLAS puede llegar a recibir una tasa de partículas instantánea del orden de 10^6 partículas/cm²·seg. Para poder comprobar en condiciones realistas, la línea de H8 permite incrementar la tasa de partículas de $3 \cdot 10^4$ hasta $2.6 \cdot 10^6$ lo cual está próximo a la tasa esperada en ATLAS. Tanto los detectores ATT7 ATT8 como los planos de Anchor usaban electrónica rápida, encontrando las trazas entre los dos planos de anchor y extrapolándola a los detectores ATT7 ATT8.

Para comparar esta técnica de extrapolación se realizaron las medidas de eficiencia empleando el mismo método. Tal como muestra la figura 5.8, la eficiencia en alta intensidad y baja intensidad es la misma, dentro del error estadístico, mostrando que ésta no depende de la tasa de partículas.

5.4 Conclusiones.

Los resultados de este test-beam muestran que la opción de electrónica binaria es viable y funciona correctamente tanto con detectores irradiados como en detectores no irradiados, y en campo magnético. La resolución encontrada es prácticamente independiente del ángulo sobre $20 \mu\text{m}$, por otra parte el empleo de electrónica analógica rápida, permite hacer funcionar correctamente estos detectores a la tasa nominal de LHC.

La eficiencia de los detectores operando a 275 V es mejor del 96% con una ocupación de ruido del orden de 10^{-4} calculada con haz y del orden de 10^{-5} calculada sin haz.

El ángulo de Lorentz para detectores de tipo *N*, está entre 9° y 11° con un campo magnético de 1.5 T. En ATLAS con un campo magnético de 2 T, se espera que éste ángulo esté entre los 12° y 15° .

Esta electrónica es viable por tanto, y cumple las especificaciones ATLAS durante toda la vida del detector.

Capítulo 6

Laboratorio de Valencia.

Durante el año 1997 en Valencia se equipó el laboratorio de silicio para dar servicios al detector interno de ATLAS. En este capítulo se describe el instrumental e instalaciones del laboratorio de silicio.

En el momento objeto de esta tesis, el laboratorio de silicio de Valencia contaba con el equipamiento y la infraestructura para permitir los siguientes tests y operaciones sobre detectores:

Zona de caracterización : Consistente en dos fuentes de medida IV, un sistema de caracterización CV, una estación de pruebas en una caja de Faraday. Este sistema permite acceder a los pads de los detectores para poder realizar medidas de caracterización de distintas características del detector, analizar híbridos de electrónica, estudiar estructuras de test.

Área de electrónica : Se disponía de un sistema de adquisición VME-Linux así como toda la electrónica de lectura y procesado de los híbridos y chips binarios CDP, CAFE, LBIC, generadores de señal, electrónica de apoyo CAMAC/NIM, un generador de señales y un osciloscopio de 1 Gb de ancho de banda.

Área de microsoldadura : Se dispone una máquina semiautomática de microsoldar elementos de silicio, basada en hilo de aluminio sobre pads de aluminio.

Todo el laboratorio está provisto de un sistema de gases y vacío que permiten tanto la manipulación como el almacén de detectores en las distintas etapas de trabajo. Las salas están sometidas a una ligera sobrepresión, el aire se hace circular a través de filtros para atrapar el polvo y mejorar la calidad de las operaciones realizadas sobre los detectores y electrónica.

Actualmente el laboratorio dispone de un área más donde realizar automáticamente el pegado y alineamiento de los detectores. Sin embargo durante la construcción del módulo objeto de esta tesis, VAL1, que se describirá en capítulos posteriores, todas estas operaciones se realizaron de forma manual alineando visualmente todos los componentes.

6.1 Zona de caracterización.

La zona de caracterización contiene todos los elementos para poder realizar un estudio eléctrico de los detectores o de un conjunto de detectores. Por una parte están los servicios de soporte para las medidas tales como: estación de pruebas, manipuladores y servicios de vacío. Para realizar la caracterización eléctrica, se dispone de electrónica que permite medidas en continua y en alterna de estos dispositivos.

6.1.1 Estación de pruebas.

La caracterización se realiza en una estación de pruebas semi-automática. Ésta permite el movimiento del soporte del detector en 3 ejes: movimiento vertical y en el plano horizontal. Estos movimientos se controlan a través de 3 motores paso-paso que permiten la automatización de las medidas a todo el detector. Estos motores pueden controlarse a través de un puerto serie o a través del bus GPIB. La estación dispone de servicios de vacío que permite la sujeción todos elementos de test.

Los manipuladores son unos dispositivos mecánicos de alta precisión ($3 \mu\text{m}$) que permiten el movimiento de una punta de test en tres direcciones. Esta punta es de tungsteno y tiene un diámetro $5 \mu\text{m}$, permite acceder a todo el detector para realizar los test eléctricos. La fijación a la estación de pruebas se realiza a través de un sistema de vacío.

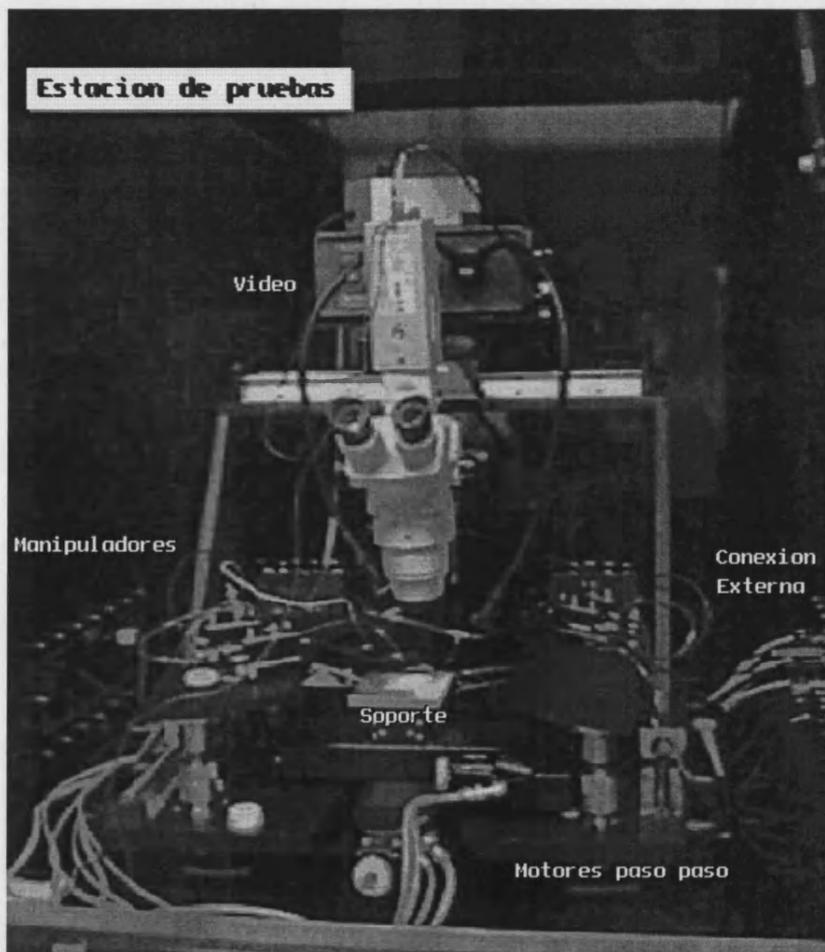


Figura 6.1: Estación de pruebas con los equipos de caracterización.

Para poder controlar la posición de las puntas se dispone de un microscópio con zoom, que permite la inclusión de una videocámara para automatizar el posicionamiento de los distintos elementos sobre el detector.

Para evitar interferencias, todo el sistema está en el interior de una caja de faraday realizada en hierro soldado en las juntas. La puerta frontal tiene una junta metálica en la puerta que evita la entrada de interferencias electromagnéticas. En el lateral se encuentra un panel de

conexiones. Estos permiten introducir las señales desde los equipos de medida situados en un rack externo a los dispositivos que se están comprobando. Para reducir los efectos de la posible entrada de luz por alguna de las juntas, la superficie interna de ésta caja de faraday está pintada de color negro. Estas precauciones son de especial importancia si tenemos en cuenta que para algunas medidas tenemos que ser sensibles a variaciones de corrientes de 300 pA, y las medidas de capacidad requieren resoluciones de 5 pF.

El conjunto está en un banco de granito de 250 Kg de peso, Este bloque de granito proporciona masa y absorbe las vibraciones del suelo evitando trasladarlas a la zona de test. Por otra parte las patas están sobre unos elementos de goma absorbente de vibraciones que mejoran la estabilidad de la misma, y amortiguan previamente las vibraciones.

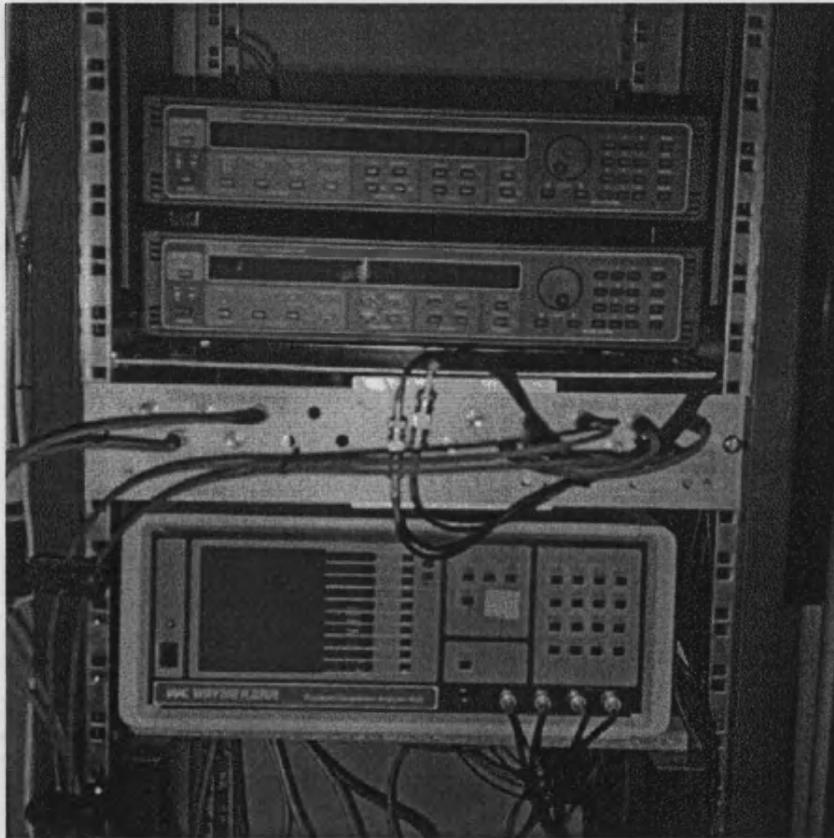


Figura 6.2: Electrónica asociada a la caracterización de los detectores de silicio.

Para realizar las medidas se dispone de un rack auxiliar donde están ubicados los equipos de caracterización eléctrica. Estos equipos pueden controlarse a través del bus GPIB para permitir la automatización de la adquisición de curvas IV, y curvas CV (figura 6.2).

En el momento de la realización de estos tests, el software basado en LabView, permite el uso combinado de las fuentes, tanto para las medidas de IV como las medidas de CV. La figura 6.2 muestra la disposición de los elementos de la electrónica

6.1.2 Fuentes de medida.

Los equipos de medida IV, consisten en dos estaciones de la casa Keithley, bastante similares en cuanto a funcionamiento pero con prestaciones distintas, el Keithley 236 y el Keithley 237.

Mientras que el primer equipo permite la medida entre ± 110 V con un máximo de corriente de 100 mA, el equipo 237 trabaja entre ± 1100 V.

Para la polarización del detector la fuente más relevante es la 237, puesto que éstos trabajan a partir de 100 V hasta 300 V cuando son irradiados. Sin embargo es importante disponer del equipo 236 para realizar medidas combinadas con la fuente 237 con la misma sensibilidad. Medidas tales como la como la resistencia del polisilicio requiere de dos fuentes.

Estos equipos disponen de dos sistemas de filtros para mejorar la reproducibilidad de las medidas así como la calidad de las mismas, tal como se describen:

Linecycle: Permite que la integración del ADC se realice en 1/50 segundos en 1/60 segundos, o se realice de forma rápida. Este filtro elimina los problemas de la red eléctrica integrando en un ciclo entero. Al aplicar este filtro, la desviación típica de las medias mejora en un 20%.

Measurements: Permite realizar en cada medida un muestreo de 1, 2, 4, 8, 16 ó 32 medidas, dando un valor medio de dicha medidas. La mejora obtenida en la desviación típica es la que se obtiene estadísticamente de realizar dichos promedios. El incremento de promedios trae consigo un incremento en el tiempo para la realización de cada medida.

Cuando se le suministra tensión o corriente a un dispositivo, ha de pasar un tiempo (determinado por una constante RC característica de cada dispositivo), que permita la estabilización del mismo. Estas fuentes permiten controlar dicho tiempo de forma manual o bien de forma automática estimando de forma automática dicho valor RC, y prolongando este tiempo 4 veces. Debido al régimen de funcionamiento de estos detectores, en general los efectos transitorios no son interesantes por lo que ha de elejirse de forma automática tiempos elevados para permitir la estabilización de todo el detector. El tiempo que se requiere adicionalmente por medida oscila entre 1 s y 4 s.

Si las medidas que se realizan requieren corrientes elevadas, se tendría una caída de potencial en los propios cables que llevan el voltaje al dispositivo de test, y por tanto una pérdida de la calidad de la medida. Para evitar esto, las fuentes disponen de un sistema auxiliar llamado *sense*, que consisten en un voltímetro que no transporta corriente (por tanto no hay caída de potencial) y que se sitúan en la zona de medida para hacer que la fuente compense esta caída de potencial de los cables.

Cuando los voltajes son elevados y las corrientes pequeñas, es muy importante el aislamiento entre la zona que lleva el alto potencial (generalmente *output high* y *sense high*, y la masa de la fuente. Para evitar campos eléctricos intensos entre dichos puntos y la masa, estos cables se apantallan con una guarda metálica situada a potencial flotante. Esta guarda tiene el efecto adicional de aumentar 8 órdenes de magnitud la resistencia entre la masa y las conexiones de alto voltaje.

6.1.3 Analizador de componentes.

Para las realizar las medidas de la respuesta en frecuencia del los detectores se emplea el analizador de componentes de Wayne-Kerr 6425. El principio de operación de este dispositivo consiste en introducir una señal periódica de frecuencia, fase y amplitud conocida y medir la diferencia de fase y amplitud de la intensidad. Para poder realizar estas medidas se dispone de 42 frecuencias entre 20 Hz y 300 KHz.

El resultado de esta medida básicamente es una impedancia Z y una fase Φ . Depende del modelo que se elija esta impedancia/fase se muestra como un circuito equivalente Resistencia Capacidad, en serie o en paralelo. Análogamente se puede seleccionar que el circuito activo sea un solenoide con una resistencia.

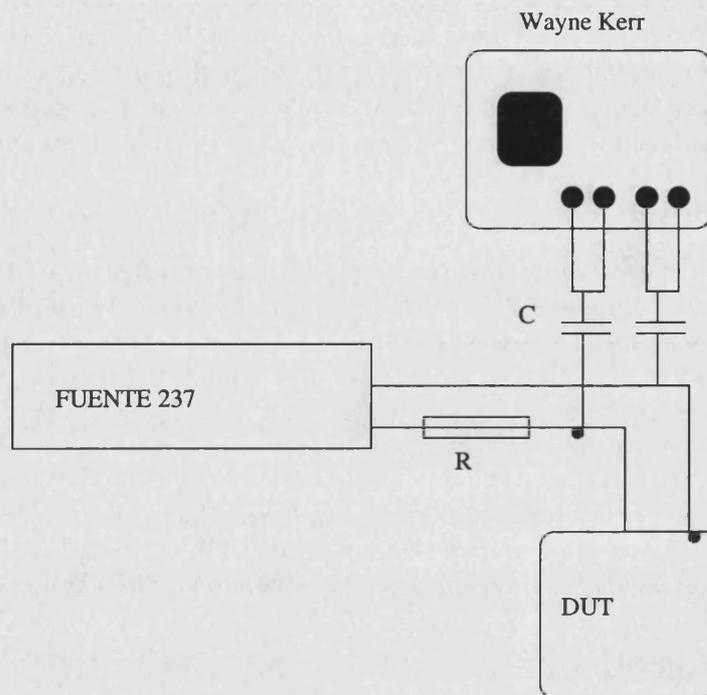


Figura 6.3: Esquema eléctrico mostrando la conexión combinada de la fuente de tensión (237) con el analizador de componentes.

Dado que todos los cables que intervienen en la medida tienen una capacidad, cuando se quieren medir capacidades del orden de 0.02 pF se han de corregir todos los efectos que éstos cables introducen: capacidades parásitas, inductancias. Para ello la fuente dispone de un modo (*Trimmer*), que tiene en cuenta las correcciones a la medida. Asimismo la fuente dispone de dos salidas adicionales que tratan de corregir estos efectos de la misma forma que las salidas *sense* de la fuente Keithley.

El analizador de componentes es capaz de realizar por si mismo medidas de CV en un rango de 0 V a 20 V. Sin embargo para poder aprovechar las características de la fuente Keithley que llega hasta 1100 V (300 V se requieren en los detectores de ATLAS) se tiene que realizar un montaje tal como muestra la figura 6.3.

Este montaje ha de cumplir ciertas características respecto a los valores de C y R elegidos:

- Por una parte R ha de ser mayor que la impedancia que tenga el dispositivo en test, puesto que la fuente de medida está en paralelo con el detector respecto al analizador de componentes. De esta forma se evita que el analizador de componentes realice una medida de la impedancia de la fuente de medida.

$$Z = \frac{Z_{dut} \cdot Z_{smu}}{Z_{dut} + Z_{smu}} \quad (6.1)$$

donde Z_{dut} es la impedancia del dispositivo en test, Z_{smu} es la impedancia total de la fuente de medida con la resistencia en serie. En el caso de que $Z_{dut} \ll Z_{smu}$, se cumple:

$$Z = \frac{Z_{dut} \cdot Z_{smu}}{Z_{smu}} = Z_{dut} \quad (6.2)$$

- Respecto a los condensadores, su misión es aislar el analizador de componentes del voltaje en continua que suministra la fuente de medida y se disponen en serie con el dispositivo en test. De esta forma, C ha de ser mucho mayor que la capacidad del dispositivo para reducir la impedancia en serie con el dispositivo que se está comprobando.

6.1.4 Sistema de adquisición.

Todos los elementos del sistema de caracterización de detectores funcionan de forma que pueden ser controlados a través del bus GPIB, este bus numera cada uno de los dispositivos y permite enviarles comandos concretos así como lectura de su estado o valores. En el momento de la construcción del módulo VAL1, este sistema trabajaba en Windows NT, y un interfaz a los dispositivos creados en el programa LabView.

Estos programas controlaban tanto el analizador de componentes como las fuentes de medida. En el momento actual se está procediendo a integrar el movimiento de la estación de pruebas y la adquisición a través de un sistema funcionando en Linux. Entre otras ventajas está la integración de este sistema para control remoto del estado de la adquisición, y la integración con el software empleado con la electrónica también basado en este sistema operativo.

6.2 Área de electrónica.

En el momento de la realización del primer módulo se contaba solo con un sistema de lectura binario de ATLAS completo. En esta sección trataremos de explicar cuales son los componentes básicos de esta parte del sistema así como los test necesarios para la puesta a punto de esta parte del detector.

La electrónica binaria que se empleó para la construcción del módulo consta de tres chips que realizan funciones diferentes, el funcionamiento de éstos se ha explicado ya en el capítulo 5.



Figura 6.4: Dispositivo experimental empleado para la caracterización y análisis de la electrónica binaria basada en LBIC+CDP y CAFE+CDP.

Para poder enviar los comandos a los chips y realizar la lectura de los mismos se requiere una electrónica adicional. En este caso la electrónica se compone de los siguientes elementos:

DSP: Esta tarjeta VME es una tarjeta generérica que contiene un DSP [110]. Está pensada como elemento genérico para su utilización tanto en los pixels como el detector de silicio.

Tabla 6.1: Señales programables que se requieren ajustar para poner en marcha el sistema binario

Señal	Descripción
<i>CAL</i>	Esta señal es la que se le inyecta al chip para comprobar la calibración del treshold
<i>Thr</i>	Es el valor (en mV) de carga de entrada que ha de tener el detector para que se produzca un 1 lógico.
<i>V_{ref}</i>	Es el voltaje de referencia entre el CDP y el CAFE o LBIC
<i>V_{bus}</i>	Es el voltaje de referencia entre CDP y HAC.
<i>Clock</i>	Es la señal que sincroniza todos los chips.

El sistema puede cargar un programa específico a través del BUS, y puede almacenar distintos sucesos o procesarlos.

Low Level Card: Esta tarjeta está entre la DSP y el detector, se encarga de generar las tramas particulares de cada sistema de detectores. En este caso contiene lógica programable así como varios retrasos que permiten ajustar los niveles de la electrónica. En esta tarjeta se insertan adicionalmente las señales de trigger a través de una tarjeta y el reloj del detector (40 MHz).

Bias card: Esta tarjeta se encarga de llevar todas las señales al detector así como ajustar los niveles de voltaje que requiere para funcionar. Entre otras la polarización del detector [111].

Support board: Esta última tarjeta es la que se encarga de llevar todas las señales de la bias card al híbrido a través del cable de captón. Esta tarjeta acondiciona las señales que le llegan al detector después de 20 mts de cable, da servicios a la electrónica de calibración, y sirve de soporte físico del módulo.

Adicionalmente se requiere de una fuente que genere un reloj variable (tanto en frecuencia como en forma de la señal o ciclo de trabajo), y de un osciloscopio para comprobar que los patrones son enviados y recibidos correctamente.

Para poder controlar la electrónica, se dispone de una tarjeta BIT3 conectada al bus PCI un PC con Linux o a una estación UNIX ALPHA, y conectada a través de un cable al bus VME. Esta tarjeta actúa como master de VME.

Inicialmente la calibración consiste en ajustar los niveles de V_{ref} clock V_{bus} , que se ajustan para cada combinación de híbridos y chips (ver tabla 6.1), se realiza adicionalmente un ajuste de tiempos (*time bucket*) para saber cuantos ciclos de espera (intervalos de 25 ns) tiene la señal y posteriormente se realiza un ajuste más fino para saber cuantos ns de espera tiene la señal (*Delay*).

Una vez estos valores han sido ajustados, y el detector puede operar correctamente se procede a sacar la relación entre *Thr* y carga de entrada. Para obtener dichos valores se procede a inyectar a través de la línea *CAL* después del amplificador que va a la entrada del chip LBIC, una señal conocida, variando el valor de *Thr* desde 0 hasta el punto donde dicho valor tiene un 50% de ocupación obtendremos la relación entre *Thr* (en mV) (propio de cada CHIP) y *CAL*, que es una señal conocida.

De la relación anterior se extrae la relación entre carga de entrada (fC) con el nivel en mV de la línea *CAL*. En Valencia se disponía de un híbrido con un CAFE, donde se dispone de una línea adicional para controlar la ganancia del amplificador, y de otro híbrido con 2 CDP de 128 canales y 4 chips LBIC de 64 canales cada uno, éste último es el híbrido que se empleó para el montaje del módulo VAL1.

6.2.1 Área de microsoldadura.

Para poder unir todos los elementos eléctricamente se dispone de un sistema de *bonding* o microsoldadura. En este área se trata de tener la mayor limpieza posible, pues todos los residuos que aparezcan sobre el detector son fuente de posteriores problemas en la calidad de los contactos. Para ello es la sala que está ubicada al inicio de la zona de sobrepresión con un flujo de aire mayor. Esto permite expulsar más eficientemente las partículas de polvo que están en suspensión.

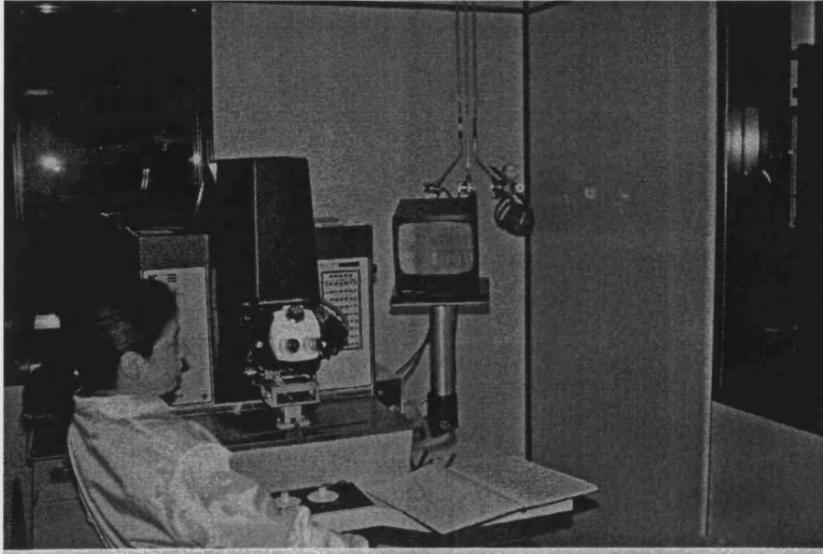


Figura 6.5: Estación de pruebas con los equipos de caracterización.

La microsoldadura se realiza por medio de una máquina que dispone de un cabezal que está orientado a 30° sobre la perpendicular. Cuenta con ciertos automatismos que permiten la repetición automática de operaciones similares de microsoldadura. Esto se realiza previo alineamiento óptico del sistema. Para poder obtener los parámetros de trabajo del sistema se realizaron una serie de test que posteriormente eran visualizados en el microscopio electrónico de la Universidad de Valencia.

Dadas las características de los detectores de silicio en ATLAS, la máquina se equipa con hilo de $25 \mu\text{m}$ de diámetro. El material empleado para el mismo es Aluminio al 99 % y Silicio al 1 %. Otra aleación empleada es el Oro al 99 % y Silicio al 1 %.

Las microsoldaduras se realizan enviando energía a la zona que se quiere unir (hilo y pad) por medio de un generador de ultrasonidos a una frecuencia de 59.6 kHz. La potencia empleada varía según el grosor de hilo o tipo de material. Para las soldaduras que se utilizan en éstos detectores la potencia se ha determinado por el fabricante que está en torno a los 0.3 vatios. En el capítulo 7 se describirá el proceso llevado a cabo para la selección del parámetro óptimo. El tiempo de aplicación varía, dependiendo del tipo de materiales. En el caso de pads de aluminio con hilos de aluminio, el tiempo estimado por el fabricante es del orden de 40 ms a 45 ms.

Otro elemento que influye en la calidad de las microsoldaduras es la presión de la aguja sobre el sustrato. Depende de las características del mismo, materiales empleados y potencia suministrada. Con las características anteriores para los detectores de ATLAS la presión ejercida por la aguja sobre el sustrato están comprendida entre 25 y 35 gramos.

6.2.2 Conclusiones.

Durante el año 1997 se ha equipado un laboratorio de semiconductores en Valencia que es capaz de realizar las siguientes operaciones:

- Caracterización de detectores (IV y CV) de forma automática. Medidas simultáneas de todos los equipos.
- Caracterización de electrónica de ATLAS.
- Montaje de chips sobre híbridos, microsoldaduras y pegado de los mismos.
- Test en estación de pruebas tanto de híbridos (continuidad), como de chips.

Durante los años siguientes se ha continuado equipando de forma constante el laboratorio para introducir equipamiento capaz de realizar el pegado y alineamiento de todas las partes del detector de forma automática y reproducible. Este equipamiento se ha adquirido con el objetivo de participar en la construcción de módulos para el detector interno de ATLAS, y ha permitido iniciarse en las técnicas y estudio de detectores de semiconductores.

En los próximos capítulos se describirá el uso de estas infraestructuras para la construcción y test del primer módulo detector construido íntegramente en Valencia para ATLAS

Capítulo 7

Construcción de un módulo binario.

Durante el año 1997 se inició el acondicionamiento del laboratorio de silicio de Valencia. El objetivo comprobar dicho acondicionamiento fue la construcción de un módulo detector, que en adelante llamaremos VAL1, empleando los detectores y la electrónica que para ATLAS estaban disponibles en aquel momento.

El módulo consistió en un detector de silicio de simple cara de opción N^+N , equipado con electrónica binaria. Adicionalmente se llevó el módulo al CERN y se realizó un test en la línea H8 del CERN para comprobar y comparar las características básicas así como la calidad en el ensamblaje de los componentes y de la respuesta del mismo.

En este capítulo se describen las fases del montaje del mismo y los test llevados a cabo para la construcción del detector en el laboratorio. En el siguiente capítulo se describirán los resultados obtenidos en test-beam.

7.1 Descripción de los componentes.

Como se explica en el capítulo 2, un módulo tiene tres tipos de elementos:

Detectores: Son los elementos de silicio destinados a la detección de la partícula.

Electrónica: Contiene todos los dispositivos necesarios para leer la carga que deposita una partícula en el detector (amplificadores, híbrido, buffers.)

Soportes: Se refiere a todos los elementos adicionales necesarios para proporcionar rigidez mecánica al sistema, servicios de refrigeración

En ATLAS los módulos del detector interno tendrán una longitud de alrededor de 12 cm (ver capítulo 1) . Para poder construir un detector de esta longitud se requieren dos piezas de detector de una longitud de 6 cm cada una. Estas piezas han de alinearse en un soporte para luego ser leídas por la electrónica. En nuestro caso se disponía de la misma electrónica que en la descrita en el capítulo 5 pero se contaba con cuatro LBICS, en vez de CAFE que corresponden únicamente 256 canales.

Los elementos que se ensamblaron en éste módulo (VAL1) fueron los siguientes:

Detectores: Dos de tipo N^+N , las dimensiones se muestran en la figura 7.2. Éstos detectores de tipo AC estaban alimentados a través de resistencias de polisilicio, y presentaban una estructura de tipo P alrededor de los *strips* de tipo N para aislar los canales tal como se explicó en el capítulo 2.

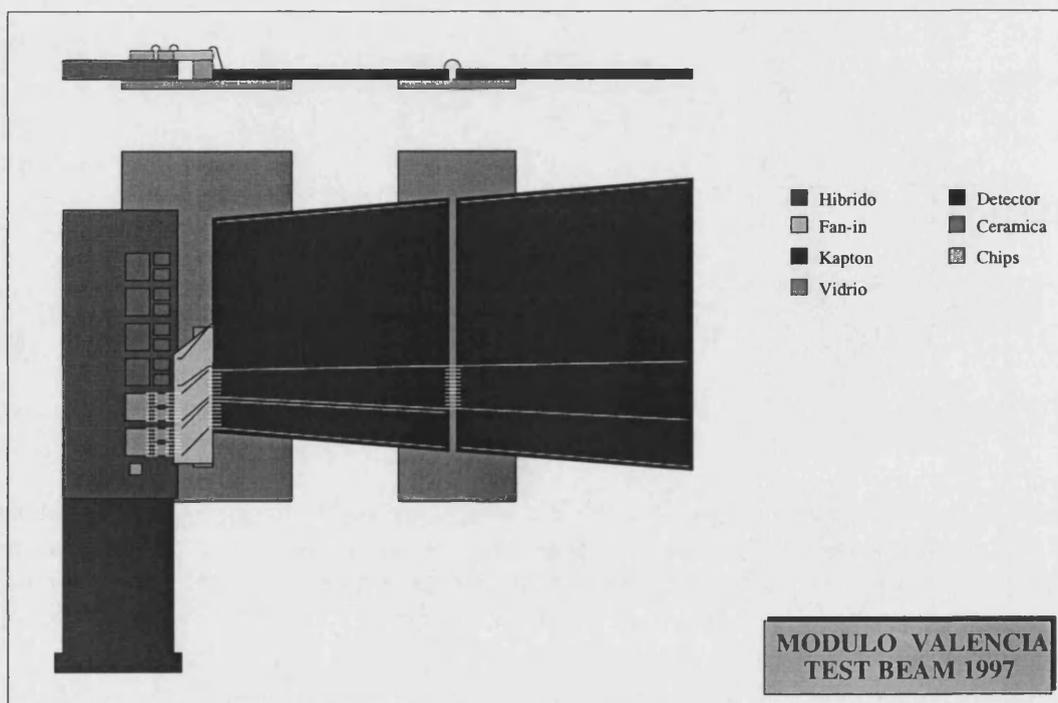


Figura 7.1: La figura muestra la disposición de todos los elementos de módulo tanto frontal como lateralmente.

Electrónica: Está ubicada en el híbrido donde están todos los elementos de lectura de primer nivel del detector. En éste detector la electrónica empleada comprende 2 CDP [105], 4 LBIC's, un HAC [106] y un híbrido de detectores de la parte barril.

FAN-IN: Para poder ajustar las distintas anchuras entre bandas del detector (alrededor de $70 \mu\text{m}$) a la distancia entre los pads de la electrónica (alrededor de $47 \mu\text{m}$), se requiere de un dispositivo que consiste en pistas que varían su distancia. Este elemento ha de estar ubicado encima del híbrido y junto al detector tal como se muestra en la figura 7.2.

En nuestro caso el FAN-IN permite ajustar la parte más estrecha del detector a la electrónica.

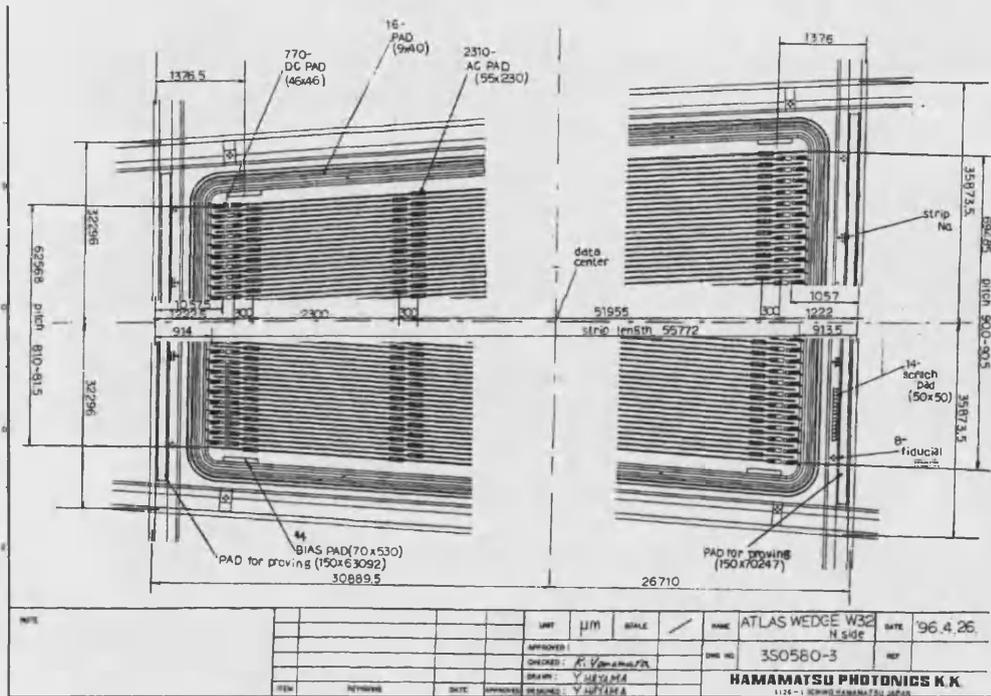
Soportes cerámicos: Estos soportes sirven de asiento tanto al detector como a la electrónica. Para poder tener la parte posterior del detector accesible (donde se conecta el voltaje de polarización) cada zona del detector contiene una cerámica distinta.

El ajuste del tamaño de los soportes cerámicos para conseguir el ensamblado del módulo final se realizó en el Centro Nacional de Microelectrónica (CNM) de Barcelona, que también está colaborando con Valencia en la construcción de detectores para ATLAS.

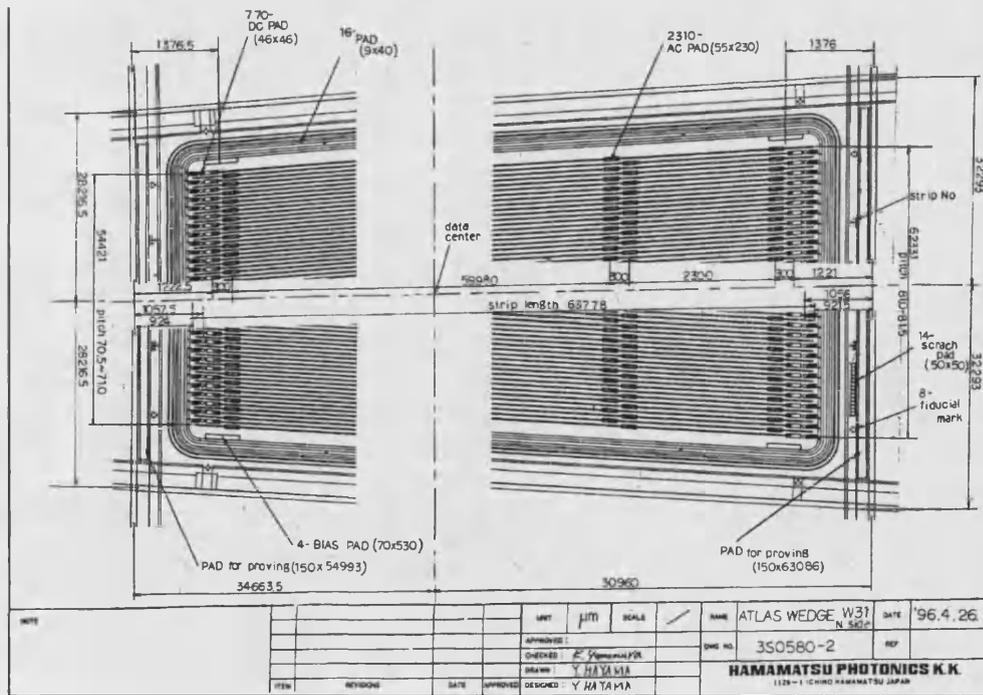
Vidreo Este elemento se sitúa para poder soportar el FAN-IN, a la misma altura que el Híbrido. Las operaciones de corte y ajuste fueron también mecanizadas en el CNM de Barcelona.

7.2 Test de componentes.

Antes de ensamblar los componetes en el módulo se requiere realizar un control de calidad de los elementos para poder elegir los mejores que garanticen en buen funcionamiento del detector. En esta sección se describirán los test que se llevaron a cabo para la selección de los detectores que formaron parte del módulo y de la puesta a punto de la máquina de microsoldadura.



(a)



(b)

Figura 7.2: La figura muestra las dimensiones de los dos detectores que formaron parte del módulo de Valencia. La figura (a) muestra las dimensiones del detector ancho (*wide*) y la figura (b) muestra las dimensiones del detector estrecho (*narrow*).

7.2.1 Medidas estáticas.

Al ser un módulo de la parte forward, la forma del detector (*strips* con anchura variable) obliga a que se tenga que disponer de detectores con distintas dimensiones, uno ancho (*Wide W32*), y otro estrecho (*Narrow W31*).

Para la construcción del módulo se contaba con cuatro detectores. (dos de cada tipo). Previo al montaje, se realizó una selección para comprobar cuales serían los detectores con mejores prestaciones para ser ensamblados.

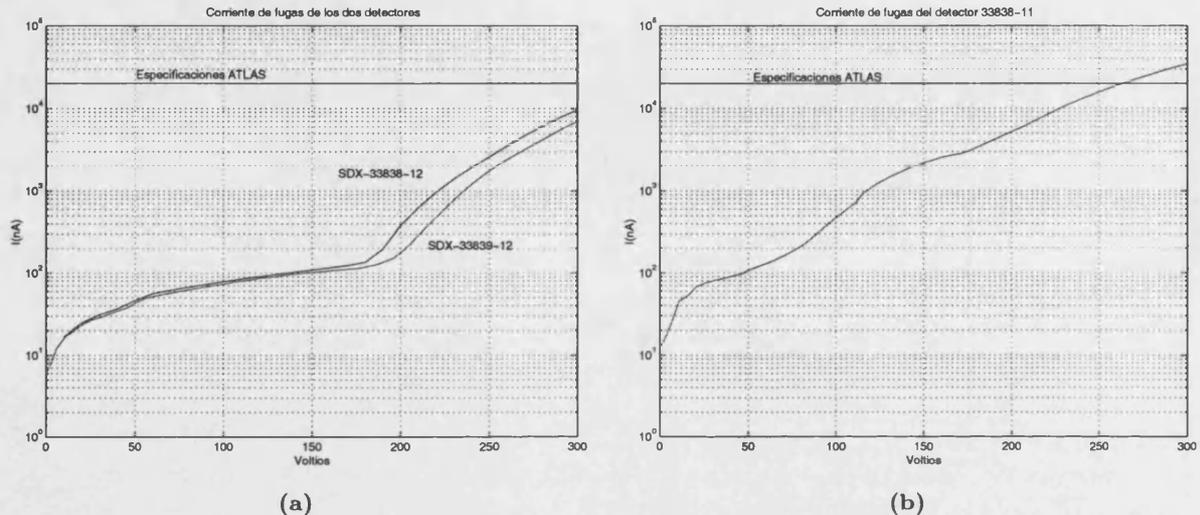


Figura 7.3: La figura (a) muestra resultado de la caracterización de las dos obleas de silicio que se colocaron en VAL1. En la figura (b) se muestra uno de los módulos rechazados por tener un comportamiento anómalo.

Las medidas que se realizaron fue la corriente de fugas del detector antes de que se ensamblaran. La figura 7.3(a), muestra los valores obtenidos de las corrientes de fuga, se muestra que son bastante mejores que el máximo de las especificaciones ATLAS de $20 \mu\text{A}$ [112] [113]. Los detectores elegidos fueron el SDX-33838-12 correspondiente al detector estrecho y el SDX-33839-12 correspondiente al detector ancho.

La elección se realizó empleando la información disponible de la corriente de fugas, de esta medida se pudieron rechazar directamente que dos detectores no cumplían los requerimientos previstos:

- Uno de ellos un comportamiento en la corriente de fugas muy irregular ver figura 7.3(b), y mayor que los elegidos. A partir de 260 V tampoco cumplía las especificaciones.
- El otro detector no podía medirse correctamente puesto que alrededor de 40 V sobrepasaba la corriente máxima permitida por la fuente, no siendo por tanto hábil para emplearse como detector.

Los test posteriores al montaje se muestran en la figura 7.4. En ella se observa que inmediatamente después del montaje el detector mantiene las especificaciones ATLAS (situada ahora a $40 \mu\text{A}$ al ser dos detectores en paralelo). Sin embargo después del continuo manipulado durante 6 meses, la corriente de fugas aumenta hasta situarse por encima de las especificaciones, antes de llegar a los 300 V nominales. Este proceso se debe fundamentalmente a los daños sufridos en

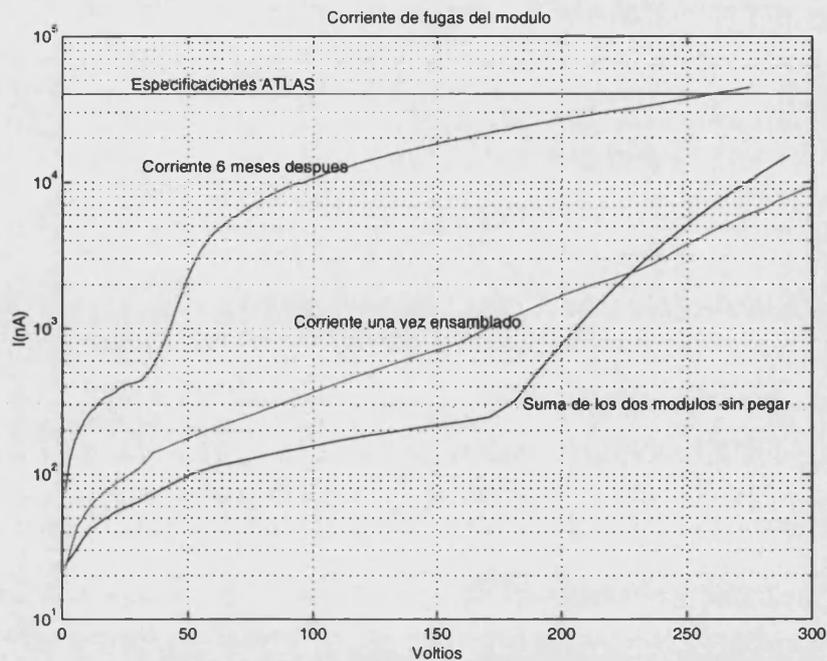


Figura 7.4: La figura muestra la suma de las corrientes de fugas de los detectores antes del montaje (para comparar), inmediatamente después del montaje, y después de manipularse y trasladarse durante 6 meses. Muestran un empeoramiento progresivo del detector conforme aumenta la manipulación del mismo.

la parte externa del detector como consecuencia del continuo manipulado. Se debería minimizar optimizando el diseño de los contenedores y empleando herramientas para su traspaso.

7.2.2 Medidas en frecuencia.

Las medidas en frecuencia sirven para comprobar cual es el voltaje de depleción del detector, midiendo cuando deja de existir variación de C con el incremento del voltaje (ver sección 2.3.1), y por otra comprobar que el volumen del detector que ha deplecionado es el adecuado para funcionar, viendo el valor de C una vez se ha completado la depleción.

Para llevar a cabo dicha medida se emplea el montaje experimental descrito en la figura 6.3. Para esta medida el valor elegidos de C y de R como circuitos de apoyo son:

$$C = 2\mu\text{F} \quad (7.1)$$

$$R = 440\text{K}\Omega \quad (7.2)$$

La figura 7.5 muestra la capacidad de uno de los módulos que participaban. El valor de la capacidad es compatible con el valor de las especificaciones ATLAS. Para poder calcular el punto donde se realiza la depleción, se lineariza la curva representando V frente a $1/C^2$, pues la dependencia de la capacidad con el voltaje es:

$$C = \sqrt{\frac{\epsilon}{2\mu\rho V_b}} \quad (7.3)$$

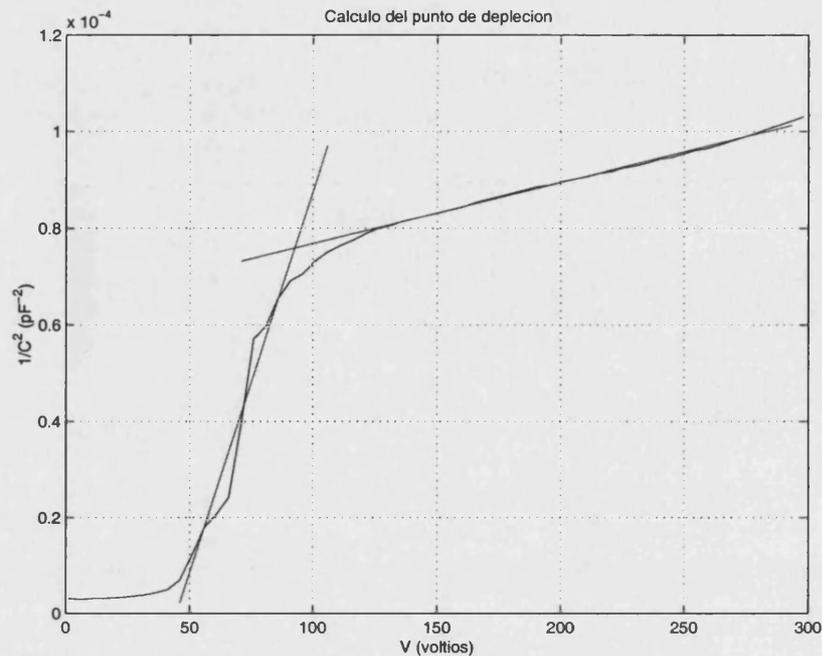


Figura 7.5: La figura muestra que la depleción se alcanza en torno a los 60-70 Voltios. Sin embargo el detector no está completamente deplecionado hasta alcanzar los 120 Voltios, que es donde muestra el valor asintótico.

Para los detectores que se montaron la depleción se alcanza alrededor de los 80 V, sin embargo esta sigue generándose hasta alrededor de los 120 V. La siguiente disminución de la capacidad corresponde a la depleción de las zonas N^+ y P^+ del detector y no es relevante para el funcionamiento del mismo.

Una vez ensamblado el módulo no es posible obtener curvas de capacidad para comparar. Esto es debido a que el detector lleva conectado en paralelo una capacidad que imposibilita dicha medida. Dicha capacidad actúa como filtro reduciendo el ruido común en el detector.

Por tanto los únicos test que se pueden realizar acerca de si el detector depleciona una vez está todo conectado son midiendo eficiencias en función del voltaje de depleción con la electrónica.

7.2.3 Calibración de la electrónica.

La electrónica se calibró antes y después de insertar los detectores. Dado que se trata de electrónica binaria, la calibración consistió en calcular la respuesta de la electrónica a una carga de entrada. Así se procedió a inyectar al LBIC, distintas señales (equivalentes a distintas cargas de entrada) a través de un capacitor, y comprobar el umbral (en mV) al que hay que poner la electrónica de entrada para que la eficiencia (media de canales que dan 1 respecto a los canales que dan cero) esté al 50 %.

Para caracterizar los chips, se representan las siguientes magnitudes que nos da toda la información acerca del funcionamiento del chip, esto es la calibración:

- **Respuesta**, es decir la relación entre el nivel de calibración y la carga de entrada al chip. Se obtiene inyectando una señal de referencia y variando el nivel de calibración, desde un nivel donde el 100 % de los canales den señal hasta el nivel donde ningún canal de señal. El valor a 50 % es el que se define como nivel de calibración.
- **Ganancia**, es la derivada de la **respuesta** del detector.

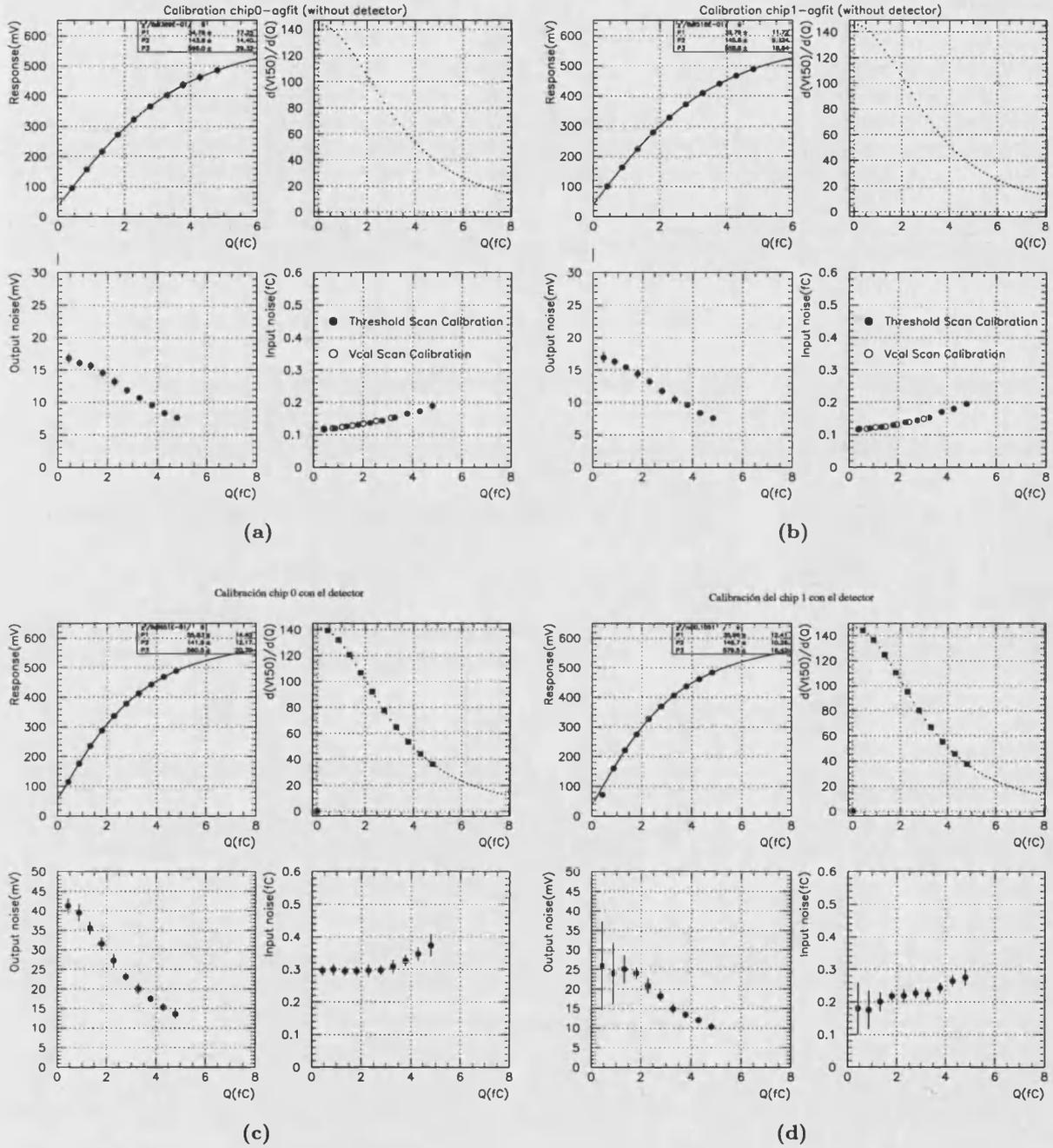


Figura 7.6: Valores de la calibración de los chips del módulo antes de unirse al detector (a) y (b), y después del proceso de unión al detector (c) y (d). Nótese la diferencia de valores de ruido correspondiente a las distintas longitudes de detectores (6 cm es chip 0 y 12 cm es chip 1)

- Ruido total, que corresponde al ajuste de una función de error, de la pendiente que se obtiene de bajar del 100 % de señal a 0.
- Ruido a la entrada, Se obtiene dividiendo el **ruido total** por la ganancia.

Las curvas muestran un comportamiento bastante similar en los dos chips antes de unirlos al detector figuras 7.6(a) y 7.6(b). Una vez unidos al detector (figuras 7.6(c) y 7.6(b)), las curvas muestran que la respuesta permanece constante a pesar de aumentar la capacidad de entrada en el detector, mientras que el ruido se incrementa. Además se observan diferencias entre ambos chips debido a que uno de ellos (chip 0) está conectado a un detector completo (12 cm) que tiene una capacidad de entrada mucho mayor.

Para poder tener una base de datos con los canales defectuosos para el análisis del módulo en el haz, se realizó un estudio del ruido del detector por canal. la figura 7.7 muestra la respuesta del detector para cada canal. Se observan canales muy ruidosos, que posteriormente no se tendrían en cuenta en el análisis así como canales (chip 1) con muy poco ruido (y ganancia) entre 150 y 200 que completarían la base de datos de canales rechazados en el análisis.

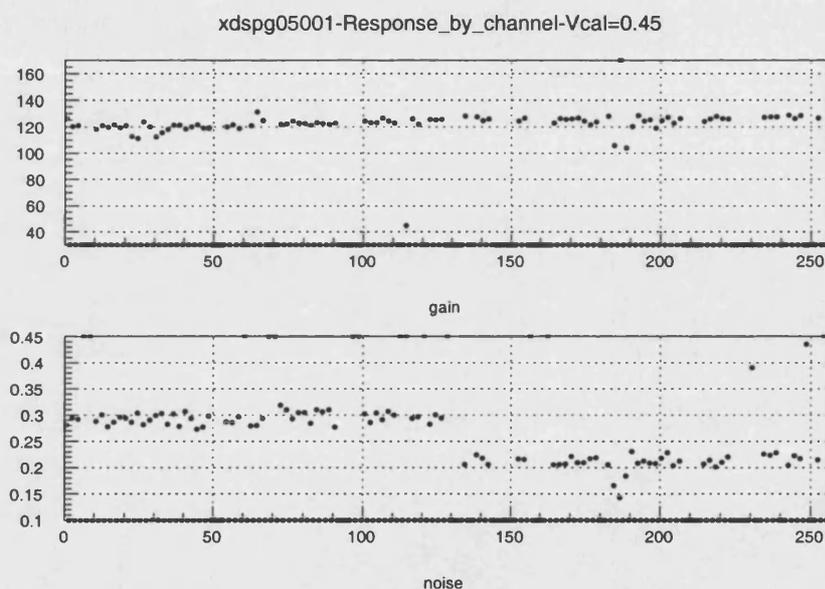


Figura 7.7: Ganancia del detector con 4.fc de entrada y ruido correspondiente a esta entrada. Se observa la diferencia existente entre la zona de 12 cm con un incremento de ruido frente a la de 6 cm. Esta curva se empleó para eliminar aquellos canales que tienen una respuesta muy diferente a los vecinos.

7.2.4 Puesta a punto del sistema de microsoldadura.

La máquina de microsoldadura fue puesta en marcha pocos meses antes del montaje del módulo. Para poder realizar la conexión del módulo se realizaron dos series de ajuste, por una parte la puesta en marcha del sistema, y por otra una serie de test internos para comprobar que el sistema era capaz de proporcionar las prestaciones requeridas:

Test sin detector: Corresponde a todas las inspecciones y test realizados sobre elementos simples.

- Microsoldadura a distintas presiones. Este análisis se realizó sobre PAD de chips cedidos por el CNM de Barcelona. Posteriormente, se procedió a analizar con microscopio

electrónico de barrido la calidad del proceso. La figura 7.8 muestra al microscopio electrónico la comprobación que se realizó posteriormente a las operaciones para determinar los parámetros de trabajo de la máquina.

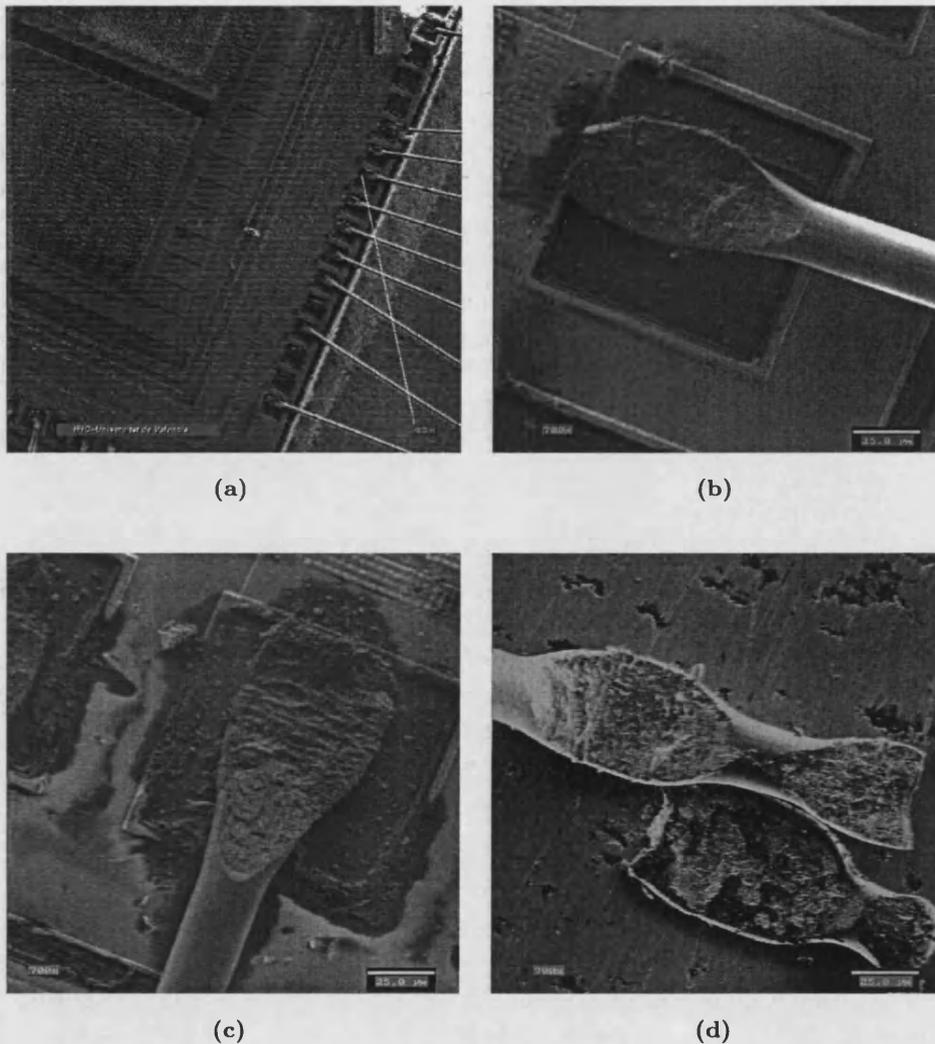


Figura 7.8: Visión al microscopio electrónico con objeto de ajustar los parámetros de la máquina de microsoldadura (bonding). La figura (a) muestra una visión general del chip y de los PADS e hilos. La figura (b) muestra una soldadura aceptable y bien centrada sobre el PAD. La figura (c) muestra una soldadura realizada con demasiada potencia de ultrasónicos. La huella está deformada y el PAD dañado. Por último la figura (d) muestra la soldadura de Al sobre cobre, en la que se aprecia el efecto de haber aplicado una presión insuficiente.

Los resultados de dicho test nos dan la presión y el tiempo de soldadura requeridos, y se resumen en la sección 6.2.1

- Pruebas de microsoldadura de PADS en modo automatico. Con este test se pretende medir la calidad y capacidad de reproducir uniones en series automáticas de forma cualitativa.
- Pruebas de alineamiento de la maquina con dos series de PADS cuando entre ellos existe una traslación. Esta prueba se realizó partiendo un detector en dos mitades y alineándolas entre si. Posteriormente se elegían dos zonas que estuviesen entre sí

desplazadas. Este test pretendía realizar estos ajustes de forma cualitativa.

- Pruebas de alineamiento de la máquina con dos series de PADs cuando entre ellos existe una traslación y una rotación. Empleando los mismos parámetros para la máquina que en el test anterior.

Test con detector: Son todos los test realizados sobre el detector en zonas no vitales para el funcionamiento final. Estas pruebas iban acompañadas posteriormente de test eléctricos para comprobar que el ensamblaje era correcto.

- Test de continuidad eléctrica. Consiste en unir el FAN-IN con el detector y comprobar entre un extremo del detector y otro del FAN-IN que existe continuidad eléctrica. Requiere el empleo de la **estación de pruebas**.
- Test de eliminación del hilo. Eliminando posteriormente el hilo y comprobando que queda en el PAD una huella de aluminio, que muestra que los parámetros de la microsoldadura son correctos (un exceso de potencia produciría el efecto de arrancar el recubrimiento de aluminio del PAD, un defecto de potencia y/o presión no dejaría ninguna huella). Este tipo de test se puede realizar con un dinamómetro que da la tensión del hilo al estirarlo y arrancarlo. No disponiéndose de esta herramienta, el hilo se extrajo con pinzas.
- Microsoldar zonas del detector que no se empleaban con zonas del FAN-IN que no iban a ser utilizadas con electrónica. El objetivo era medir después si el proceso de microsoldadura rompía el óxido de silicio, al unir zonas que estaban a distintas alturas. Este test implicaba llevar posteriormente el detector a la **estación de pruebas** y comprobar que no se había cortocircuitado el óxido.
- Unión de dos zonas del detector real que no iban a emplearse para comprobar si el proceso de unión dañaba el óxido de silicio. Al igual que el test anterior requiere comprobar que no se daña el óxido con un test eléctrico, realizado en la **estación de pruebas**.

7.3 Ensamblado de componentes.

El ensambado y pegado tanto del módulo como de todas las partes de sus componentes se realizó en Valencia. El proceso de corte de algunas partes requeridas en el montaje (cerámicas) se realizó en el CNM de Barcelona, el proceso de población del híbrido se realizó en Santa Cruz.

El proceso de ensamblaje se realizó en tres fases:

Ensamblado de la electrónica: Esta fase consiste en disponer todos los elementos de electrónica sobre los soportes cerámicos, así como el FAN-IN. Para fijar todas estas piezas se empleó como epoxi Araldit 2011. Este epoxi tiene buenas características mecánicas, pero plantea el problema de que las operaciones realizadas no son reversibles. Sin embargo dado que el tiempo de fraguado es de alrededor 15 horas permite manipular cómodamente los componentes. El tiempo de endurecimiento para posteriores operaciones, es de 15 horas a 20°C, lo cual al requerir dos operaciones (pegado de la electrónica y del vidreo a la cerámica, y pegado del FAN-IN a el módulo lleva un total de dos días de operación.

Ensamblado con el módulo: En esta fase se realiza el pegado del módulo adicional en la base cerámica. En este pegado se realizó un alineamiento visual con la electrónica. La fase de pegado lleva 24 horas adicionales. La fase de microsoldar con la electrónica lleva un día adicional.

Tabla 7.1: Tabla de tiempos empleados en cada una de las fases de procesado del detector VAL1.

Proceso	Tiempo de procesado (h)	Tiempo de curado (h)	Días
Pegado híbrido	2	15	1
Pegado FAN-IN	2	15	1
Pegado Detector	2	15	1
Mirosoldadura (515)	2	0	0
Test IV	1	0	0
Pegado BIAS	1	0	0
Test IV	1	0	0
Pegado soporte cerámico	2	15	1
Pegado Detector	2	15	1
Microsoldadura (129)	2	0	0
Pegado BIAS	1	0	0
Test IV	1	0	0
Total	19	75	5

El hecho de poder disponer de parte del FAN-IN (preparado para tres chips en vez de los dos chips con que se equipó el detector) permitió realizar en los 128 canales no utilizados una comprobación inicial de las características de la microsoldadura sobre los detectores. De esta forma se comprobaron los ajustes de los parámetros de la máquina a las condiciones reales del microsoldadura, y por otra parte medir si la presión ejercida sobre el strip por parte de la máquina de microsoldadura dañaba el óxido de silicio del detector.

Para poder polarizar el detector, se ha de conectar el backplane a la línea de HV. Esto se realiza a través de un cable que está conectado a través de un capacitor C_{detc} directamente a la tierra de la electrónica, tal como se muestra en la figura 7.9(b). Este condensador es el que está en paralelo con el detector y que impide realizar medidas de capacidad del detector posteriormente.

Una vez finalizada esta fase se dispuso el sistema electrónico para calibrar el detector. Sin embargo debido a un problema con el conector del híbrido a la electrónica, la entrada I_{ref} del CDP que controla el nivel lógico del LBIC resultó dañada.

En esta fase se envió el módulo a Santa Cruz para la reparación. Dicha reparación consistió en la sustitución de los CDP's dañados, pero manteniendo los LBIC's que ya habían sido unidos al detector. Como resultado de la reparación la construcción del módulo se prolongó durante dos semanas adicionales, que no aparecen en la tabla 7.1.

Debido al proceso de remecanización de las microsoldaduras entre el LBIC y el CDP, algunos canales resultaron interconectados. Esto se pudo comprobar posteriormente en el análisis de los resultados obtenidos. La figura 7.10(a) muestra como quedaron conectados el LBIC y el CDP después de ser eliminados las microsoldaduras y puestas de nuevo. Como se observa la calidad de las microsoldaduras después del remecanizado es peor que las que no se repararon (figuras 7.9(a) y 7.10(b)).

Ensamblado del módulo adicional: Éste módulo se pegó empleando como soporte una superficie cerámica sobre la que descansa tanto el módulo que contiene el híbrido de la electrónica como el módulo que no lleva la electrónica conectada.

Para alimentar el segundo módulo se conectan las dos zonas del bias del detector, y se prolonga el cable del backplane hasta que llegue al segundo detector.

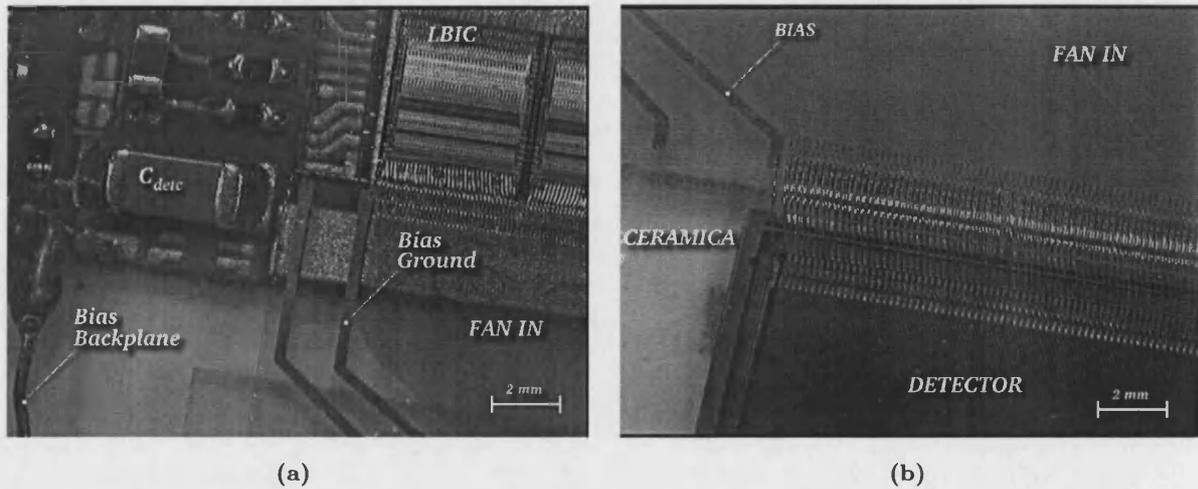


Figura 7.9: La figura (a) muestra la disposición de los elementos de la electrónica en relación al primer detector. En particular muestra la disposición de la alimentación del detector. *Bias Backplane* alimenta la parte posterior del detector mientras que *Bias ground* alimenta a las resistencias de posisilicio del detector. Haciendo un puente con el backplane está situado *C_{det}*. La figura (b) muestra el detector unido al fan-in. Se observa que la pista que lleva la alimentación es bastante más ancha que el resto para permitir el paso de la corriente, y a mitad dos canales que dieron problemas en el proceso de microsoldadura y por tanto fueron eliminados. Tanto el fan-in como el detector están montados en un soporte cerámico.

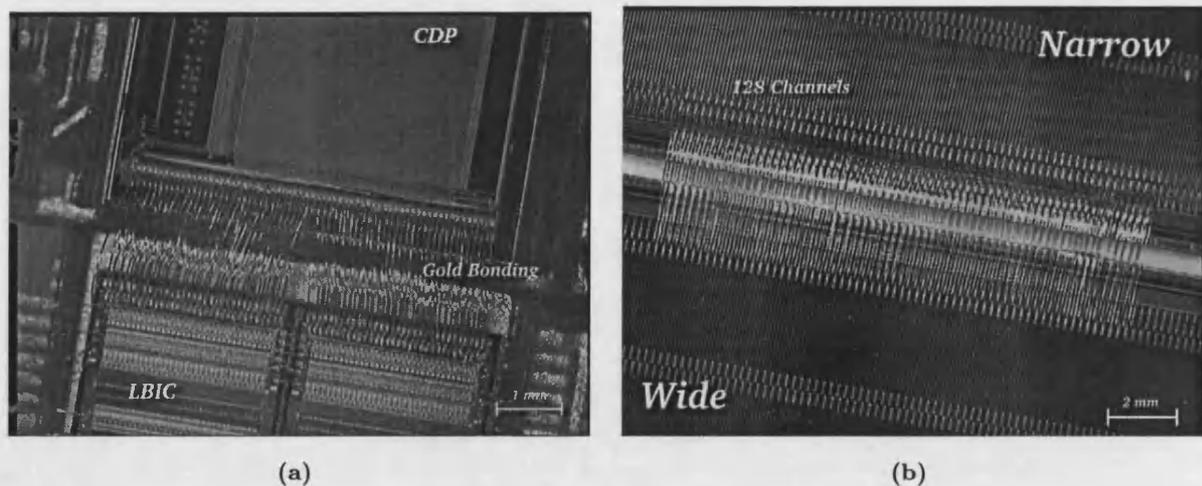


Figura 7.10: La figura (a) muestra a detalle las microsoldaduras entre el LBIC y el CDP después de ser remecanizado en Santa Cruz. Se observa que al tener que reutilizar los PADS del LBIC para realizar la reparación por segunda vez, el alineamiento de la unión de ambos chips se degradó. Como resultado algunos de los canales aparecerían conectados. Se puede comparar con la unión (figura (b)) entre los dos detectores, donde se realizó el proceso de forma automática.

El proceso de pegado de este módulo adicional lleva otras 48 horas contando con el pegado y microsoldado con el módulo anterior.

Dadas las características del módulo como elemento de test no se conectaron todos los canales a 12 cm de longitud. De esta forma se disponía de un módulo que con un chip se leían 6 cm de detector y con el otro se leían los 12 cm del mismo. La figura 7.10(b)), muestra un detalle de las zona del detector que fueron microsoldadas para conseguir los 12 cm de longitud.

La tabla 7.1 muestra los tiempos invertidos en cada una de las fases, separados en tiempos de proceso y tiempos donde el detector no requiere manipulado (proceso de secado del epoxi). Este primer módulo nos da una idea de la capacidad de producción de módulos sin los elementos automáticos de alineamiento y pegado.

Sin embargo para este análisis los tiempos se invierten fundamentalmente en el preparado de los epoxis, el preparado del equipo, soportes etcétera. Se podría reducir dichos tiempos, optimizando operaciones en distintos módulos simultáneamente. Por tanto para optimizar la producción se requiere poder disponer de espacio para poder almacenar 3 ó 4 detectores que estén en fase de pegado diarios.

7.4 Conclusiones.

Con el equipamiento adquirido en Valencia, se ha construido un módulo de las siguientes características:

- Dos detector de tipo N^+N de tipo AC, con las especificaciones de geometría *forward*.
- Lectura binaria de 256 canales, 128 de ellos conectados a un único detector (6 cm.) y los 128 restantes conectados a los dos detectores (12 cm.)

Se han realizado una batería de test antes, durante y después del montaje que han permitido:

- Comprobar que las especificaciones y calidad de todos los componentes ensamblados cumplen con las especificaciones ATLAS.
- Poner a punto el equipamiento de electrónica y montaje, así como comprobar que los procesos de ensamblaje no dañaban la calidad de los componentes.
- Estudiar algunas características de los detectores, una vez ha pasado un periodo.
- Comprobar en laboratorio los efectos de la electrónica sobre la lectura del detector. De esta forma caracterizar el ruido y respuesta de la electrónica sin detector, con un detector de 6 cm y con un detector de 12 cm.

Durante el proceso de montaje se comprobó de forma realista, la capacidad del laboratorio de montar módulos para ATLAS, así como de la operativa para llevar a cabo tal cometido. Los tiempos obtenidos sin ningún tipo de herramienta adicional (todos los procesos fueron manuales), permiten extrapolar la capacidad de construir uno a dos módulos diarios, organizando y optimizando las fases adecuadamente.

Capítulo 8

Test en haz del módulo.

La construcción del detector que se ha explicado en el capítulo 7 tuvo como objetivo comprobar la capacidad del laboratorio de Valencia (capítulo 6) completar la construcción de un módulo detector, y poder afrontar los compromisos con la colaboración ATLAS.

Las medidas de laboratorio se completaron con un test en haz. El test en haz se levó a cabo en la línea H8 del CERN en similares condiciones a los test de años anteriores descritos en los capítulos 4 y 5.

A diferencia de la participación realizada en los test de años anteriores, en este test, donde la participación predominante fué a nivel de análisis de resultados ¹, en éste test se participó tanto a nivel de análisis *offline*, como en la puesta a punto y toma de datos del *online*.

En este capítulo se describen los test realizados al primer módulo de Valencia en el test-beam. Se describirán las prestaciones obtenidas y se tratará de realizar un test de calidad del detector una vez ensamblado y manipulado con resultados del haz.

8.1 Descripción del test-beam.

El montaje experimental se muestra en la figura 8.1.

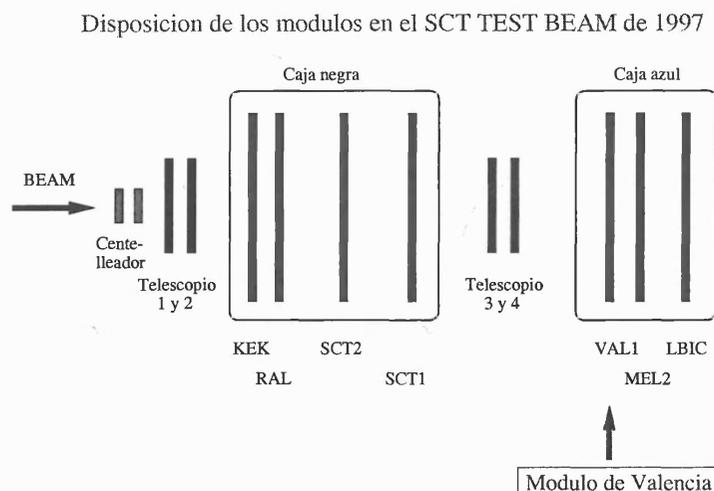


Figura 8.1: La figura muestra la disposición de todos los elementos de módulo tanto frontal como lateralmente.

¹Durante el test de 1995 descrito en el capítulo 4 se colaboró también en la puesta a punto de un sistema laser de calibración de detectores

Tabla 8.1: Características de los detectores del TEST-BEAM de agosto de 1997, así como los estudios realizados

Tipo	FEE/Irr	Det. Irrad.	Pitch	Fabricante	Tests	Canales en uso
Test de Agosto						
KEK	$2 \cdot 10^{14} \text{mips/cm}^2$	10^{14}mips/cm^2	75 μm	Hamamatsu	r,v,n,	256
RAL	-	-	75 μm	Hamamatsu	r,v,n,	256
SCT1 SCT2	-	-	75 μm	Hamamatsu	r,v,n,	256
VAL1	-	-	70-90 μm	Hamamatsu	v,n,	256
MEL1	-	-	75 μm	Hamamatsu	v,n,	2x768
		Test	Descripción			
		r	Rotación sin campo magnético.			
		B	Rotación con campo magnético.			
		v	Variación de voltaje de depleción.			
		n	Barrido de ruido.			
		h	Barrido de alta intensidad.			

Para este test, se disponía de los siguientes detectores:

Planos telescopio : Con una resolución mejor de 8 μm son detectores analógicos leídos cada 50 μm con electrónica VICKING.

KEK : Detectores $N^+ - N$, leídos por electrónica binaria, LBIC y CDP, para la parte barril. Estos detectores tienen características distintas (forma de *strips* y de aislamiento de bandas) dependiendo de la zona del detector. Las medidas obtenidas en estos detectores sirven para optimizar el diseño de la separación entre *strips*. Producidos en KEK (Japón). En este TB, las medidas sirvieron para complementar otros estudios ya realizados en KEK [114].

RAL : Detector con electrónica binaria, LBIC y CAFE, para la parte barril de ATLAS. El objeto de este test era comprobar las prestaciones con un nuevo procedimiento de ensamblado. Producidos en el Rutherford Lab.

SCT1 SCT2 : Detectores equipados con electrónica binaria con procesamiento DMILL. Producidos en el CERN.

VAL1 : Detector para la parte de bajo ángulo, objeto de este análisis.

MEL2 : Detector para la parte *forward*, producido en Melbourne construido con el sistema de ensamblaje propio, y con la electrónica en el centro del detector.

LBIC1 : Detector usado como plano de referencia binario para cerrar los planos del telescopio y evitar la extrapolación de la traza a los detectores que no están en la caja intermedia.

El sistema experimental contenía dos cajas, la mayor de ellas era capaz de albergar más detectores, y permitía la rotación en el eje perpendicular al suelo. La dirección de los *strips* de estos detectores era perpendicular al suelo y por tanto la rotación tiene efectos directos en la resolución. En la menor de las cajas, los detectores tenían los *strips* orientados paralelos al suelo. Por tanto la rotación sólo tiene el efecto de incrementar la señal en el detector. De esta forma tampoco tienen efecto los estudios de ángulo de Lorentz, (ver sección) puesto que el campo magnético que se podía aplicar era perpendicular al suelo y por tanto a los *strips* de esta caja.

Por otra parte dado que el sistema del campo magnético es perpendicular a la dirección de los *strips* al aplicar campo magnético, no tiene efecto en la resolución.

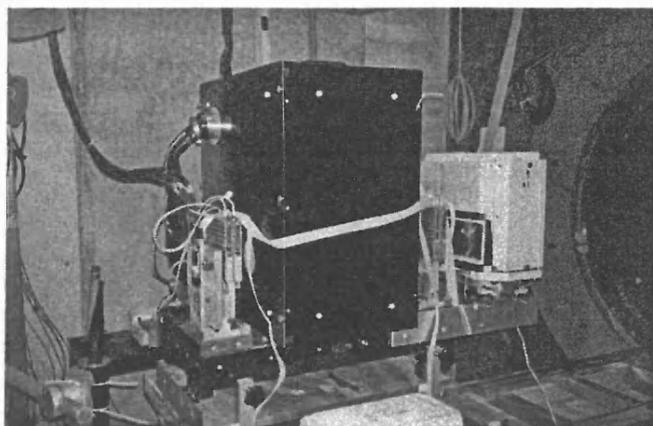


Figura 8.2: Fotografía del dispositivo experimental ubicado en H8. A la derecha está ubicado el sistema del campo magnético que no se empleó en este test-beam. La caja de la izquierda se encuentra entre los cuatro planos de detectores la de la derecha, es la que contenía el módulo de Valencia.

A pesar de todo, el efecto del campo magnético es importante en detectores de la parte barril, pues el campo magnético en esta región está orientado paralela a los *strips* y por tanto perpendicular al campo eléctrico, sin embargo en los detectores de la zona *forward* el campo magnético está orientado en la misma dirección que el campo eléctrico, por tanto no tiene efectos perjudiciales en la resolución.

En la caja mayor ubicada entre los planos de los telescopios, la orientación de los detectores era perpendicular al suelo, permitiendo por tanto que la rotación del sistema tenga efectos sobre la resolución así como estudiar efectos del campo magnético.

8.1.1 Descripción de la electrónica.

Para el funcionamiento del sistema se utilizaron dos tipos de electrónica, NIM [115] y VME [116]. En NIM funcionaban tanto el sistema de *trigger* como la alimentación de los detectores. A este nivel se generaban los retrasos y el reloj común del sistema, con una frecuencia de 40 MHz, que es la nominal de ATLAS.

Las señales de *trigger* iban directamente al VME (Fig. 8.3). Este principalmente contenía:

CPU : Consiste en una tarjeta con un UNIX tiempo real que permite relizar la adquisición del sistema, enviar los programas a los DSP y realizar todas las tareas de adquisición y toma de datos.

TDC : Conversor analógico digital con una resolución de 200 ps. Permite medir el desfase de llegada de la partícula respecto de la fase del reloj de 40 MHz del sistema.

DSP Analógico : Permite comprimir la salida analógica de los 640 canales analógicos del telescopio. Realiza una eliminación del ruido común, substracción de pedestales y da la información analógica únicamente de los clusters afectados con señal. Una de las mejoras mayores en la adquisición respecto a años anteriores ha sido la incorporación de este sistema que permite reducir la tasa de información en un factor 100 o más. El diseño de este DSP es una adaptación de otro análogo empleado en el detector Delphi.

DSP Binario : Este DSP es el mismo que se empleó en el laboratorio para realizar la adquisición de los detectores binarios. Como diferencia lleva insertada una tarjeta que permite realizar un *trigger* externo con el sistema de centelleadores.

El sistema sistema exporta los discos a la red y permite de esta forma realizar cierto análisis online con una estación de trabajo SUN. Ésta última realiza las tareas de envío de ficheros al sistema de cintas de ATLAS.

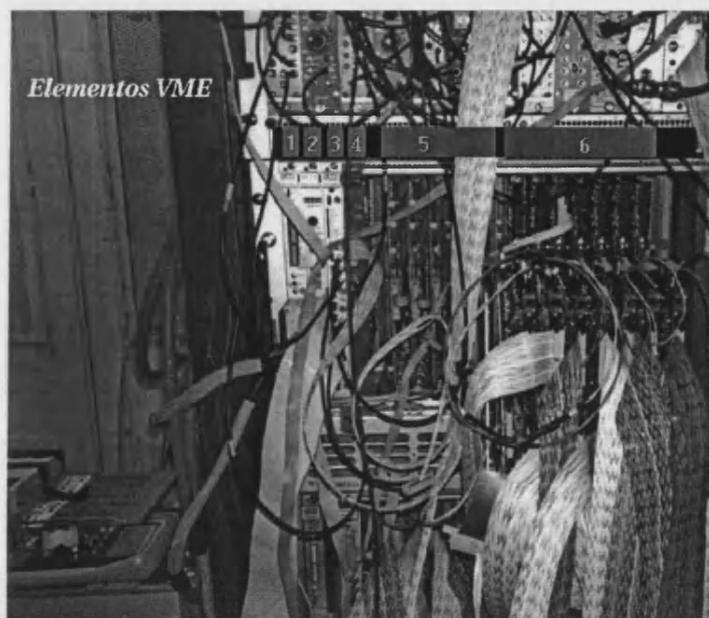


Figura 8.3: Fotografía del armario de la electrónica empleada en el test-beam (1) Tarjeta VIC de comunicación con otros sistemas VME. (2) CPU Local que controla tanto el VME, como la adquisición. (3) CORBO genera interrupciones del NIM en VME. (4) Tarjeta TDC mide el desfase del trigger con el reloj. (5) DSP analógicos para la lectura de los 4 planos del telescopio. (6) DSP binarios para la lectura de los detectores binarios.

8.2 Resolución temporal.

Para poder realizar el *trigger* se dispone de dos centelleadores, que dan el tiempo de paso de la partícula. En LHC se espera que las partículas lleguen al detector en fase con el cruce de haces, sin embargo en el test-beam éstas llegan de forma aleatoria con un desfase que varía en un intervalo de 25 ns.

La respuesta del LBIC es suficientemente rápida para variar la eficiencia en el intervalo de 25 ns correspondiente a los 40 MHz. Es necesario situar la fase del detector convenientemente para obtener la máxima eficiencia. La figura 8.4(a) muestra la eficiencia del detector en función del tiempo a tres niveles de entrada. Se muestra la asimetría de la señal de entrada con respecto al máximo de señal. En el resto del análisis, se realiza un corte en el TDC de 0 ns a 17 ns correspondientes a la zona donde la eficiencia no depende de forma significativa con el nivel de entrada impuesto en el LBIC.

Es necesario pues ajustar el retraso del detector respecto a la señal de referencia para poder obtener la máxima eficiencia. En el capítulo 5 donde se realizó el análisis de módulos equipados con electrónica binaria no se trató el problema. La diferencia entre éstos módulos es que el chip analógico que equipaban aquellos detectores era el CAFE. a diferencia del LBIC, lleva integrado en la electrónica un sistema que prolonga la señal (1 ó 0) durante la ventana de 25 ns una vez se ha sobrepasado el umbral de señal *shaper*. De esta forma los detectores equipados con chips CAFE son menos sensibles a la variación de respuesta temporal.

En la figura 8.4(b) se observa el efecto que tiene sobre la señal la diferencia de la capacidad

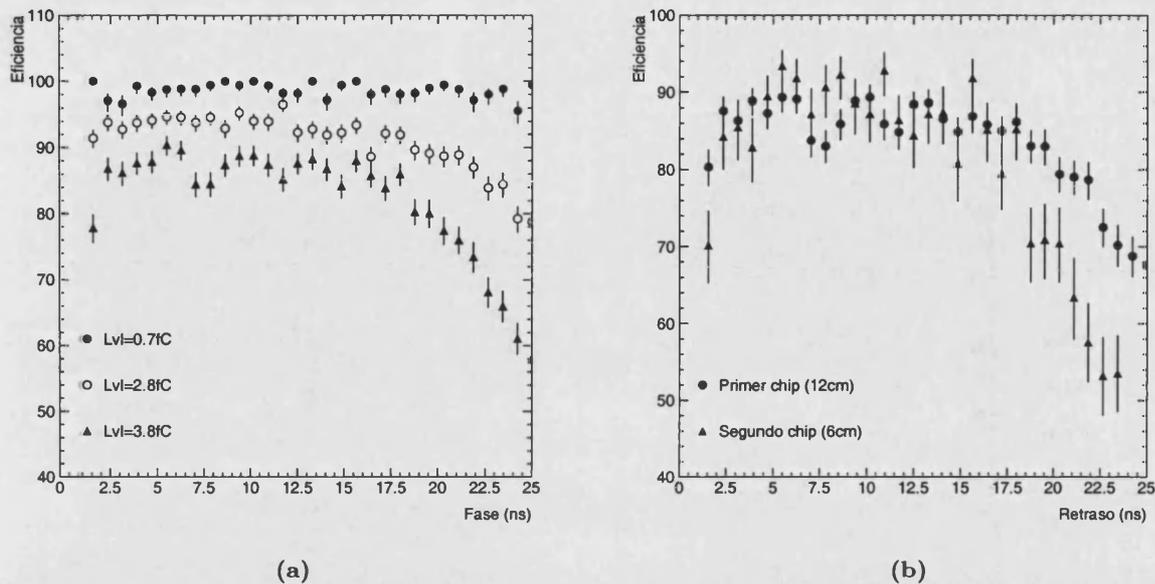


Figura 8.4: La figura (a) muestra la eficiencia del detector frente al TDC a tres niveles distintos de entrada. La figura (b) muestra la diferencia de respuesta de los dos chips frente al TDC debido a la diferente capacidad de entrada de cada detector

de entrada que tienen las dos regiones del detector, (6 cm y 12 cm). En el detector de 12 cm la capacidad de entrada es mayor por lo tanto la respuesta del detector es también mayor.

8.3 Respuesta del detector.

Para la realización de éste análisis se hará uso de las mismas definiciones y técnicas expuestas en el capítulo 5, pues la técnica de análisis es análoga, aunque algunos de los test realizados cambien (durante el periodo de 1996 se disponía de campo magnético, en este test-beam por las razones antes expuestas no se disponía de esta herramienta).

Para poder realizar las medidas de eficiencia y ruido se realizaron distintas tomas de adquisición de $25 \cdot 10^3$ sucesos cada una a diferentes umbrales. En el momento de la puesta en haz, el detector había sido calibrado para recoger huecos (señales positivas). Sin embargo al ser un detector de tipo N^+N , donde las señales son negativas (electrones), no se contaba con una calibración apropiada. Así el rango de cargas que se tomó se realizó entre 0.1 fC a 3.4 fC y no se incluyeron puntos por encima de 4 fC correspondiente a un mip.

Las curvas 8.5(a) y 8.5(b) muestra la eficiencia de los dos detectores frente al ruido. Se observa la diferencia entre las zonas del detector de 12 cm y de 6 cm en la región del ruido, que a los dos voltajes es significativa. Asimismo la eficiencia es menor para la zona de 12 cm cuando el detector está polarizado a 80 V. A 240 V la diferencia en la eficiencia no es significativa. A 1.5 fC la eficiencia en ambos casos es mejor del 97%.

La relación señal ruido utilizamos el valor medio (ver sección 5.3), como máximo de la señal. Al no disponer de la calibración del detector para electrones no se dispone de datos por encima de 4 fC. Sin embargo extrapolando de la curva 8.5 se obtiene una relación señal/ruido de 16:1 para la zona de 12 cm y de 22:1 para el grupo de 6 cm, cuando el detector está polarizado a

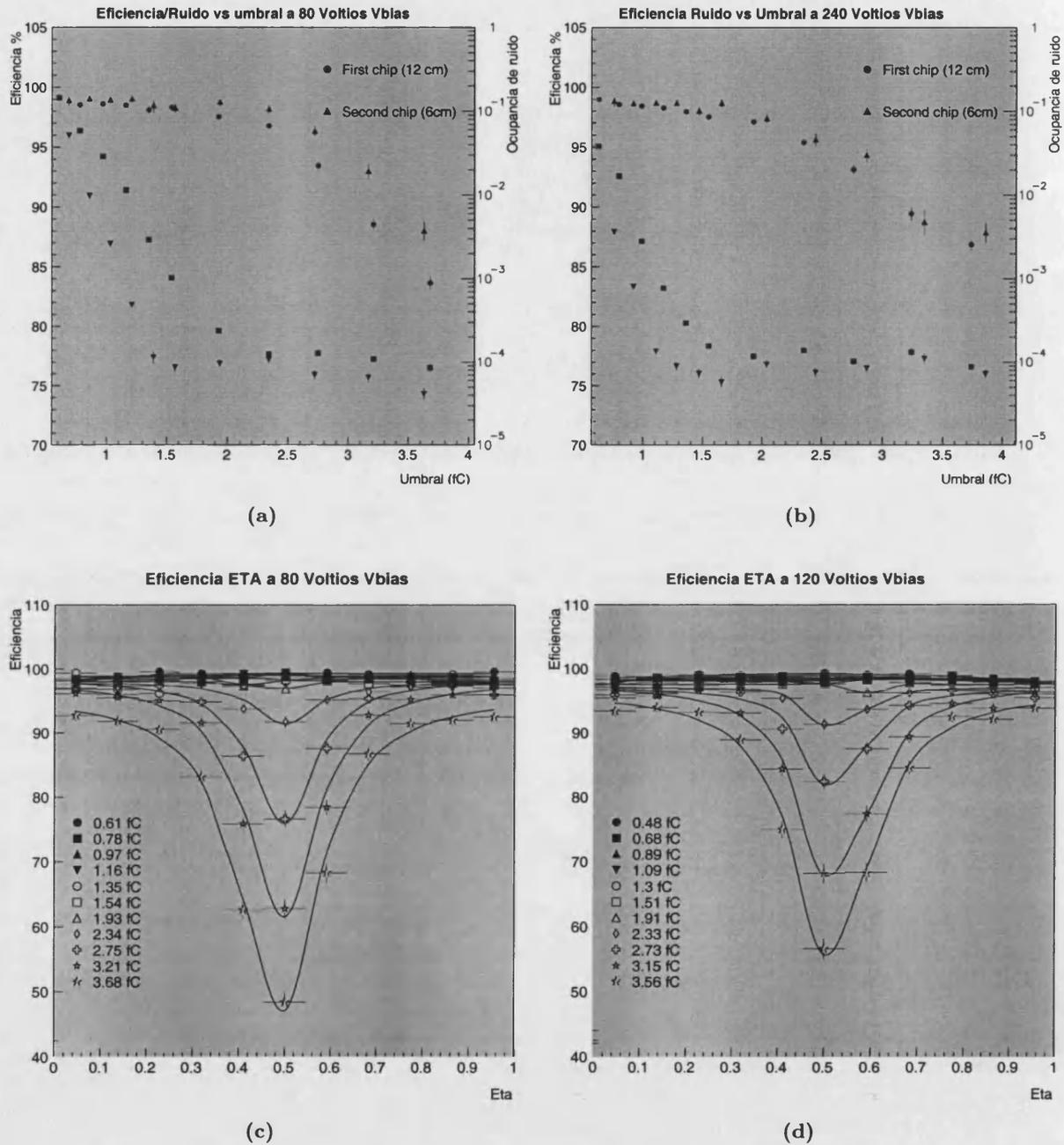


Figura 8.5: Las figuras (a) y (b) muestran eficiencia y ruido del detector a dos voltajes de operación diferentes, en función del umbral de la electrónica. Las figuras (c) y (d) muestran la variación de eficiencia en función de la distancia al centro del *strip* en los mismos voltajes

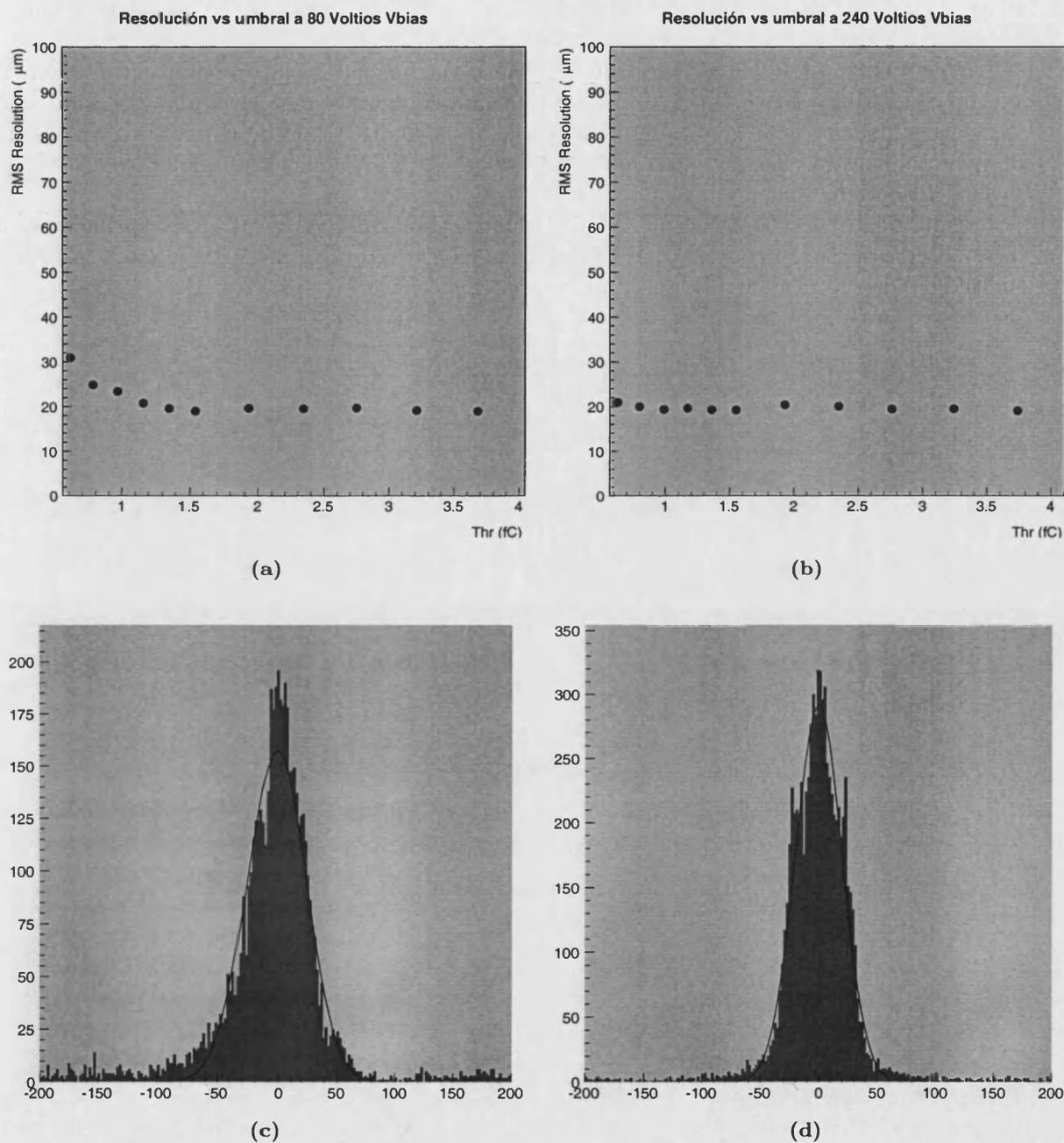


Figura 8.6: Las gráficas (a) y (b) muestran la variación de la resolución del detector frente al umbral de la electrónica a 80 V y 240 V distintos. Las gráficas (c) y (d) muestra la distribución de residuos a 0.63 fC a 80 V y 240 V.

240 V.

Durante el análisis de datos se comprobó la existencia de un grupo de canales que daban señal siempre que un canal a dos posiciones de éste daba señal. El análisis reveló posteriormente una ocupación de señal con un valor doble que los canales adyacentes. Posteriormente la inspección en microscopio reveló que los hilos que transportaban la señal de dichos canales estaban tocándose. Estos canales fueron eliminados del análisis para no introducir efectos debidos al montaje.

Las figuras 8.5(c) y 8.5(d) muestran la eficiencia a función de la posición entre *strips* del detector a dos voltajes diferentes. Conforme aumenta el umbral, se observa una disminución de la eficiencia global y de la zona intermedia debido a la compartición de carga. Hasta 1.0 fC la eficiencia se muestra constante en todo el intervalo. A 1.6 fC la eficiencia global es del 98 % y mayor del 96 % en el medio de los dos *strips*.

La figura 8.5 muestra la eficiencia del detector en función de dos voltajes de alimentación. No se observa variación con el voltaje de alimentación en el rango de 80 V a 240 V ni con la longitud del detector, manteniéndose por encima del 98 %.

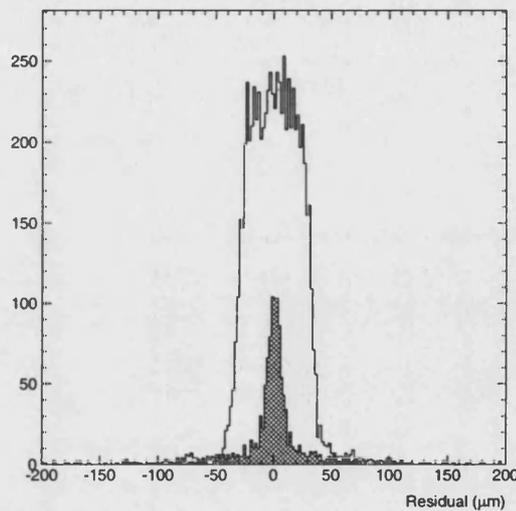


Figura 8.7: Descomposición de la distribución de residuos en sucesos con un *strip* afectado (blanco) y dos *strips* afectados (gris).

8.4 Resolución espacial.

La resolución del detector se midió en función del voltaje de alimentación y del umbral puesto a la electrónica. La figura 8.6 muestra la variación de resolución que se tiene a distintos umbrales. Mientras que a 240 V no se observa variación con el umbral y es de alrededor 20 μm . A 80 V debido al mayor ruido del detector (fig 8.5) existe una variación de la respuesta, así varía desde 30 μm hasta 20 μm .

La distribución de residuos a 0.63 fC (figura 8.6) muestra que para 240 V, se tiene una distribución uniforme prácticamente de la distancia *interstrip*, mientras que para 80 Voltios, esta distribución es más gaussiana y más ancha debido a la mayor contribución de ruido del detector.

La figura 8.7 muestra la distribución de residuos a 240 V y 1.6 fC, que corresponde a valores de operación reales. La zona blanca representa sucesos con un único canal afectado mientras

que la zona gris muestra sucesos con dos canales. La resolución que se tiene cuando se afecta a dos canales es mejor debido a que existe poca compartición de carga, en efecto la región donde la carga se comparte de forma apreciable a dos *strips* es estrecha comparada con la distancia entre *strips* y esta distribución corresponde a sucesos en dicha región.

8.5 Conclusiones.

El test del primer prototipo de Valencia muestra unos resultados comparables con los obtenidos con electrónica similar en años anteriores (ver capítulo 5). Es un detector construido íntegramente en Valencia y ha permitido validar los test previos a la puesta en haz con las prestaciones obtenidas.

- Se han efectuado estudios de resolución espacial del detector, y de eficiencia, mostrando que es un prototipo capaz de funcionar con las especificaciones de ATLAS.
- Se ha comprobado también las diferentes prestaciones del detector en dos zonas 6 y 12 cm.
- Durante el montaje se consiguió reparar el módulo y se han podido detectar tanto en análisis como en laboratorio los problemas derivados de las dichas reparaciones.
- Todos los resultados obtenidos corresponden a un detector de simple cara de tipo N^+N . En el futuro se ha de construir el primer prototipo equipado con versiones nuevas de electrónica, con dos planos de detectores de tipo P^+N , que es la opción final decidida por la colaboración ATLAS.
- Este trabajo corresponde a la fase inicial para la construcción de 200 módulos de la parte frontal de ATLAS, y está dentro del programa de adecuación del laboratorio de silicio de Valencia construido para tal fin.

Conclusiones.

Después de un periodo de tres años (desde 1995 hasta 1997), se ha realizado trabajo dentro de la colaboración ATLAS, destinado a mejorar las prestaciones del diseño del detector interno, reduciendo el presupuesto necesario.

Se ha participado activamente en dos tareas:

- Elección de la tecnología de la zona de bajo ángulo del detector, donde el silicio se planteaba alternativamente al MSGC. El resultado de este test, que se describe en el capítulo 4 ha servido de base en el documento de resultados de la colaboración [100].
- Elección del tipo de electrónica. Los resultados se describen en el capítulo 5. Se comparaban dos alternativas: electrónica analógica y electrónica binaria.

Los resultados de este test, han servido para comprobar la viabilidad de la solución de detectores binarios, frente a una tecnología mucho más establecida y conocida como la lectura binaria, así como entender el funcionamiento de los detectores después del proceso de irradiación [108].

Alternativamente se ha desarrollado en Valencia la capacidad de construir y trabajar con módulos de detectores de silicio. Así durante el año 1997 se procedió a la construcción del primer detector de silicio basado en la tecnología por defecto de ATLAS, esto es un detector tipo $N^+ - N$ y strips con geometría radial unido a un híbrido de electrónica binaria.

También durante ese mismo año se realizó una puesta en haz del detector y se obtubieron resultados acordes con las medidas realizadas previamente en el laboratorio.

Los resultados que se obtuvieron están de acuerdo con los resultados obtenidos por detectores análogos presentados por otros grupos de la colaboración. Asimismo se han podido realizar estudios en haz que están de acuerdo con medidas realizadas previamente en el laboratorio.

Estos son los trabajos previos para poder realizar posteriormente una contribución en el detector interno montando módulos de dos de las ruedas del detector interno.

Índice de Tablas

1.1	Parámetros y prestaciones del colisionador LHC.	8
1.2	Parámetros principales de las prestaciones del espectrómetro de muones para distintos canales, en resolución de energía y en capacidades de <i>trigger</i>	13
1.3	Resumen de canales y características del sistema de calorímetros de ATLAS.	14
1.4	Resolución del parámetro de impacto parametrizado para el detector interno de ATLAS. Las contribuciones se sumarán de forma cuadrática. Dichas resoluciones se parametrizarán en función de P_T y del ángulo polar θ	18
1.5	Parámetros del detector interno con las resoluciones esperadas por detector, los valores de la resolución son valores típicos aunque la dependencia en η no se incluye.	19
1.6	Tasa esperada en el detector de TRT a distintas zonas y niveles de señal.	19
1.7	Lista de los requerimientos de trigger en LVL1 and LVL2 y tasa asociada a baja y alta luminosidad.	22
2.1	Propiedades físicas del silicio a temperatura ambiente	30
3.1	Descripción de las diferentes líneas experimentales que dependen del SPS.	50
4.1	Posición relativa de cada uno de los detectores que formaban el sistema en el eje Z DUT se refiere a la posición del detector objeto de nuestro test.	68
5.1	Características de los detectores del test-beam de agosto de 1996, así como los estudios realizados	80
6.1	Señales programables que se requieren ajustar para poner en marcha el sistema binario	93
7.1	Tabla de tiempos empleados en cada una de las fases de procesado del detector VAL1.	107
8.1	Características de los detectores del TEST-BEAM de agosto de 1997, así como los estudios realizados	112

Índice de Figuras

1.1	Sección eficaz total y elástica protón-protón a varias energías. Extrapolando a las energías de LHC se espera una sección eficaz total alrededor de 100 mb. Las medidas a las energías de LHC se han realizado con experimentos de rayos cósmicos.	5
1.2	Suceso Higgs decayendo a 4 leptones (electrones). A pesar de la elevada multiplicidad del suceso es posible reconstruirlo aplicando cortes fuertes de momento transverso (momento mayor de 4 GeV).	6
1.3	Esquema de los aceleradores e inyectores en LHC, así como la disposición de los detectores con algunos elementos de referencia de escala.	9
1.4	Sección transversal del elemento dipolar de LHC mostrando las partes más relevantes del mismo	10
1.5	Vista general del detector ATLAS mostrando los subdetectores.	11
1.6	Vista lateral del detector mostrando, sobre el sistema de calorímetros, las cámaras de muones. En gris claro se representa el soporte, mientras que en gris oscuro se muestra las cámaras de precisión. Se observa asimismo los intervalos de pseudo-rapidez que cubre dicho detector.	12
1.7	En la figura (a) se muestra la combinatoria en primer nivel de trigger para muones de alto y bajo P_T . En la figura (b) se representan las eficiencias que se esperan en función del momento total del muón.	15
1.8	En la figura (a) se muestra el esquema global de los calorímetros en ATLAS. La figura (b) muestra una celda del calorímetro electromagnético. La figura (c) muestra la disposición de elementos del calorímetro hadrónico.	16
1.9	Cuadrante del detector interno de ATLAS mostrando todos los subdetectores. . .	18
1.10	Esquema previsto para el en ATLAS. La figura (a) es un esquema del primer nivel de trigger, con los detectores que participan. La figura (b) muestra un detalle de la combinatoria esperada en el primer nivel de <i>trigger</i>	21
2.1	Pérdida de energía de una partícula en hidrógeno líquido, helio gaseoso, carbono, aluminio, estaño y plomo. Datos tomados del Particl Data Group [31].	26
2.2	Distribución de energía depositada en un detector mostrando la forma de la distribución de Landau.	27
2.3	Concentraciones de dopante, densidades de carga, portadores, configuraciones de campo y potencial en una unión <i>PN</i>	31
2.4	Esquema general de un detector de silicio. Se muestra el significado de los cortes transversales y longitudinales del detector con relación a la dirección de los <i>strips</i>	34
2.5	Esquema de transversal de un detector de microstrip de silicio de acoplo directo mostrando todos los elementos relevantes del detector.	35
2.6	Circuito equivalente a primer orden de un detector de silicio con strip intermedio.	37

2.7	Explicación del efecto del ángulo de Lorentz θ . La traza de la partícula pasa por el <i>strip</i> numerada como 3, sin embargo el efecto del campo magnético B en la dirección del <i>strip</i> dispersa la carga de forma que el <i>strip</i> numerada como 4 recibe carga adicional.	38
2.8	Esquema transversal de un detector de microstrip de silicio de acoplo alterno mostrando todos los elementos relevantes del detector.	40
2.9	Vista superior de una esquina mostrando los elementos de un detector polarizado con implantes de polisilicio.	41
2.10	Corte de un detector mostrando la disposición de la alimentación del detector con estructuras de polisilicio en un detector de tipo p^+n	42
2.11	Vista de una esquina mostrando los elementos de un detector polarizado con el efecto foxfet.	43
2.12	Corte de un detector mostrando la estructura de transistor PNP del detector cuando se alimenta a través de FOXFET.	44
2.13	Esquema genérico de las etapas de lectura de un detector de silicio, la carga se lee y es amplificada en un buffer de salida. Si se produce un <i>trigger</i> se realiza una conversión con ADC posteriormente.	46
3.1	Disposición de los aceleradores mostrando las distintas áreas experimentales, respecto a los aceleradores en particular el área Norte y el área Oeste	51
3.2	Número de protones acumulados por SPS desde 1993 a 1997. Se observa a partir de 1994 un incremento por año debido a las mejoras introducidas en SPS. En 1997 se observa un largo periodo de inactividad debido a un incendio producido en la sala de control de la máquina.	52
3.3	Flujo de datos durante la toma de adquisición en el área experimental de H8: Los datos se leen de los detectores a través de un sistema VME, que comparte datos con una máquina SUN donde se realiza el procesamiento <i>online</i> . Automáticamente estos datos se trasladan al sistema central de ATLAS (<i>shift pool</i>) y posteriormente a cinta. Estas cintas pueden accederse por medio del sistema de análisis <i>offline</i> de ATLAS, o bien a través de una estación de trabajo ALPHA más potente destinada a tal fin.	53
4.1	La figura (a) muestra todos los elementos de un detector MSGC. La figura (b) muestra un corte transversal de un detector MSGC mostrando las dimensiones típicas de estos detectores.	58
4.2	Resultados mostrando por una parte el ruido de un detector de MSGC y la señal con el paso de un mip. El máximo de la señal está alrededor de 30 lo que equivale a una relación señal ruido para el máximo de 10 a 1.	59
4.3	La figura (a) muestra todos los elementos del modulo del test dispuestos en la oblea, la figura (b) muestra un detalle de la esquina del detector, con las guardas para operar a alto voltaje.	60
4.4	La figura (a) muestra la capacidad entre strips medida en varias frecuencias. La figura (b) muestra la corriente de fugas del detector, se observa que esta produce avalancha alrededor de los 300V.	61
4.5	Fotografía del chip APV5 (a). La figura (b) muestra la disposición geométrica de cada componente del mismo.	63
4.6	Esquema de una celda individual de memoria del chip APV5 (a) S1, S2 y S0, donde son conmutadores controlados externamente. En (b) se muestra la última etapa del APV5, donde se gestiona el <i>modo deconvolución</i> o <i>modo integración</i> . . .	64

4.7	En (a) se muestra un esquema de la salida del multiplexor del APV5. La figura (b) muestra la forma del pulso una vez se ha pasado por todo el chip medida a intervalos de 1 ns	65
4.8	La gráfica (a) muestra las diferencias de carga en todas las celdas de memoria para un único canal, igual amplificación de entrada pero distinta capacidad en celdas de memoria, la gráfica (b) muestra el efecto para todos los canales en una única celda de memoria, distintas amplificaciones de entrada para cada canal.	66
4.9	La fotografía (a) muestra el detector preparado para ser insertado en el Test-Beam, la figura (b) muestra la disposición de uno de los módulos X – Y del telescopio.	68
4.10	Esquema del telescopio de granito utilizado por la colaboración <i>RD20</i> para el test de detectores	69
4.11	La figura (a) muestra la mejora en la eficiencia al aplicar o no la corrección de pedestales 2D, la figura (b) muestra como cambia la distribución de la señal a efectuar dichas correcciones.	70
4.12	Relación S/N obtenida en el detector sobre distintas posiciones del detector.	71
4.13	La figura (a) muestra la eficiencia del detector a distintos cortes de señal/ruido, la figura (b) muestra la ocupación de ruido del detector en las mismas unidades.	72
4.14	La figura (a) muestra la salida típica de ADC (señal/ruido) de detectores equipados con electrónica convencional, mientras que la figura (b) muestra la salida de ADC (señal/ruido) de un detector equipado con electrónica rápida capaz de trabajar en las condiciones de LHC.	73
4.15	Strip con señal del APV5 frente a strip con señal de uno de los detectores del telescopio que han pasado un determinado umbral.	74
4.16	La figura (a) muestra los residuos para hits de un único canal (en blanco) y para hits de dos canales (en negro). La figura (b) muestra la resolución espacial del detector en distintas regiones del mismo, la línea muestra el caso teórico de que la resolución fuera ideal.	75
5.1	Esquema general de cada uno de los componentes de electrónica del sistema binario. El detector se une a los chips analógicos (CAFE) que discriminan la señal. El CDP contiene una pila digital que vuelca en un registro de salida cada vez que se produce un <i>trigger</i> . El HAC se encarga de gestionar las cabeceras necesarias para que los comandos se envíen adecuadamente.	79
5.2	Disposición de cada uno de los detectores en el haz.	80
5.3	Fotografía de un módulo ensamblado en la caja de test (a). En (b) se muestra un esquema mostrando cada parte de la figura.	81
5.4	Valor medio y eficiencia de los detectores ATT8 (sin irradiar) y ATT7 (irradiado) en función del voltaje de depleción.	82
5.5	Eficiencia de los detectores junto a la ocupación de ruido.	82
5.6	Eficiencia de los detectores junto a la ocupación de ruido.	83
5.7	Eficiencia angular y resolución de los detectores ATT7 y ATT8 con un umbral de 1fC.	83
5.8	La figura (a) muestra la variación de la multiplicidad en función del ángulo de rotación. La figura (b) muestra que la eficiencia de recolección es independiente con la tasa de partículas.	84
5.9	Variación del valor medio de eficiencia con la corrección de trazas y de la eficiencia de recolección a 1.2fC.	84
6.1	Estación de pruebas con los equipos de caracterización.	88

6.2	Electrónica asociada a la caracterización de los detectores de silicio.	89
6.3	Esquema eléctrico mostrando la conexión combinada de la fuente de tensión (237) con el analizador de componetes.	91
6.4	Dispositivo experimental empleado para la caracterización y análisis de la electrónica binaria basada en LBIC+CDP y CAFE+CDP.	92
6.5	Estación de pruebas con los equipos de caracterización.	94
7.1	La figura muestra la disposición de todos los elementos de módulo tanto frontal como lateralmente.	98
7.2	La figura muestra las dimensiones de los dos detectores que formaron parte del módulo de Valencia. La figura (a) muestra las dimensiones del detector ancho (<i>wide</i>) y la figura (b) muestra las dimensiones del detector estrecho (<i>narrow</i>).	99
7.3	La figura (a) muestra resultado de la caracterización de las dos obleas de silicio que se colocaron en VAL1. En la figura (b) se muestra uno de los módulos rechazados por tener un comportamiento anómalo.	100
7.4	La figura muestra la suma de las corrientes de fugas de los detectores antes del montaje (para comparar), inmediatamente después del montaje, y después de manipularse y trasladarse durante 6 meses. Muestran un empeoramiento progresivo del detector conforme aumenta la manipulación del mismo.	101
7.5	La figura muestra que la depleción se alcanza en torno a los 60-70 Voltios. Sin embargo el detector no está completamente deplecionado hasta alcanzar los 120 Voltios, que es donde muestra el valor asintótico.	102
7.6	Valores de la calibración de los chips del módulo antes de unirse al detector (a) y (b), y después del proceso de unión al detector (c) y (d). Nótese la diferencia de valores de ruido correspondiente a las distintas longitudes de detectores (6 cm es chip 0 y 12 cm es chip 1)	103
7.7	Ganancia del detector con 4.fC de entrada y ruido correspondiente a esta entrada. Se observa la diferencia existente entre la zona de 12 cm con un incremento de ruido frente a la de 6 cm. Esta curva se empleó para eliminar aquellos canales que tienen una respuesta muy diferente a los vecinos.	104
7.8	Visión al microscopio electrónico con objeto de ajustar los parámetros de la máquina de microsoldadura (bonding). La figura (a) muestra una visión general del chip y de los PADs e hilos. La figura (b) muestra una soldadura aceptable y bien centrada sobre el PAD. La figura (c) muestra una soldadura realizada con demasiada potencia de ultrasonidos. La huella está deformada y el PAD dañado. Por último la figura (d) muestra la soldadura de Al sobre cobre, en la que se aprecia el efecto de haber aplicado una presión insuficiente.	105
7.9	La figura (a) muestra la disposición de los elementos de la electrónica en relación al primer detector. En particular muestra la disposición de la alimentación del detector. <i>Bias Backplane</i> alimenta la parte posterior del detector mientras que <i>Bias ground</i> alimenta a las resistencias de posilisilicio del detector. Haciendo un puente con el backplane está situado C_{detc} . La figura (b) muestra el detector unido al fan-in. Se observa que la pista que lleva la alimentación es bastante más ancha que el resto para permitir el paso de la corriente, y a mitad dos canales que dieron problemas en el proceso de microsoldadura y por tanto fueron eliminados. Tanto el fan-in como el detector están montados en un soporte cerámico.	108

7.10	La figura (a) muestra a detalle las microsoldaduras entre el LBIC y el CDP después de ser remecanizado en Santa Cruz. Se observa que al tener que reutilizar los PADs del LBIC para realizar la reparación por segunda vez, el alineamiento de la unión de ambos chips se degradó. Como resultado algunos de los canales aparecerían conectados. Se puede comparar con la unión (figura (b))entre los dos detectores, donde se realizó el proceso de forma automática.	108
8.1	La figura muestra la disposición de todos los elementos de módulo tanto frontal como lateralmente.	111
8.2	Fotografía del dispositivo experimental ubicado en H8. A la derecha está ubicado el sistema del campo magnético que no se empleó en este test-beam. La caja de la izquierda se encuentra entre los cuatro planos de detectores la de la derecha, es la que contenía el módulo de Valencia.	113
8.3	Fotografía del armario de la electrónica empleada en el test-beam (1) Tarjeta VIC de comunicación con otros sistemas VME. (2) CPU Local que controla tanto el VME, como la adquisición. (3) CORBO genera interrupciones del NIM en VME. (4) Tarjeta TDC mide el desfase del trigger con el reloj. (5) DSP analógicos para la lectura de los 4 planos del telescopio. (6) DSP binarios para la lectura de los detectores binarios.	114
8.4	La figura (a) muestra la eficiencia del detector frente al TDC a tres niveles distintos de entrada. La figura (b) muestra la diferencia de respuesta de los dos chips frente al TDC debido a la diferente capacidad de entrada de cada detector	115
8.5	Las figuras (a) y (b) muestran eficiencia y ruido del detector a dos voltajes de operación diferentes, en función del umbral de la electrónica. Las figuras (c) y (d) muestran la variación de eficiencia en función de la distancia al centro del <i>strip</i> en los mismos voltajes	116
8.6	Las gráficas (a) y (b) muestran la variación de la resolución del detector frente al umbral de la electrónica a 80 V y 240 V distintos. Las gráficas (c) y (d) muestra la distribución de residuos a 0.63 fC a 80 V y 240 V.	117
8.7	Descomposición de la distribución de residuos en sucesos con un <i>strip</i> afectado (blanco) y dos <i>strips</i> afectados (gris).	118

Bibliografía

- [1] P. HIGGS. Inventing an elementary particle.
- [2] PICH A. The standard model of electroweak interactions. In *XXII International Winter Meeting on Fundamental Physics: The Standard Model and beyond*.
- [3] ZOLTAN KUNSZT. Theoretical aspects of higgs hunting at lhc. 1997.
- [4] GHADIR ABU LEIL AND STEFANO MORETTI. Intermediate mass higgs bosons of the minimal supersymmetric standard model at the proposed cern lep x lhc e p collider. *Phys. Rev.*, D53:178–203, 1996.
- [5] R. KOBAYASHI. The crossing matrix for $su(3) \times su(3)$. *Nuovo Cim.*, 43A:161, 1978.
- [6] HIDEZUMI TERAZAWA. Possible structure of the quark mass matrix and the cabibbo angle.
- [7] KLAUS R. SCHUBERT. Experimental determination of the cabibbo-kobayashi-maskawa matrix elements.
- [8] A. ASTBURY. Found: W and z. the discovery of the w and z intermediate vector bosons at cern's proton anti-proton collider. *Phys. Bull.*, 34:434, 1983.
- [9] P. L. TIPTON. Evidence for top quark production in anti-p p collisions at $s^{**}(1/2) = 1.8\text{-tev}$. *Austral. J. Phys.*, 48:207, 1995.
- [10] G. F. GIUDICE. The search for a supersymmetric higgs boson at lep. *Phys. Lett.*, 208B:315, 1988.
- [11] G. PASZTOR. Search for higgs particles at lep. *Nucl. Phys. Proc. Suppl.*, 65:287, 1998.
- [12] P. GIACOMELLI. The search for the higgs particle at lep at cern.
- [13] RICHARD JACOBSSON. Search for the standard model higgs boson with the delphi detector at lep.
- [14] G. ALEXANDER ET AL. Search for neutral higgs bosons in z^0 decays using the opal detector at lep. *Z. Phys.*, C73:189, 1997.
- [15] G. ALEXANDER ET AL. Search for charged higgs bosons using the opal detector at lep. *Phys. Lett.*, B370:174–184, 1996.
- [16] STEPHAN SIMION. Search for neutral higgs bosons of two doublet models with the aleph detector at lep.
- [17] JEAN PAUL MARTIN. Sm higgs boson search at lep.
- [18] GIOVANNI CROSETTI. Search for higgs bosons at lep.

- [19] ANDRE SOPCZAK. Search for nonminimal higgs bosons in z_0 decays with the l3 detector at lep.
- [20] DONG-NING MAO. Search for the minimum standard model neutral higgs boson at the l3 experiment at lep.
- [21] O. ADRIANI ET AL. A search for the neutral higgs boson at lep. *Phys. Lett.*, B303:391, 1993.
- [22] B. ADEVA ET AL. Search for the neutral higgs boson at lep. *Phys. Lett.*, B283:454-464, 1992.
- [23] M. Z. AKRAWY ET AL. Search for the minimal standard model higgs boson in $e^+ e^-$ collisions at lep. *Phys. Lett.*, B253:511-523, 1991.
- [24] F. FRANKE AND T. WOHRMANN. Production of supersymmetric higgs bosons at lep x lhc. *Phys. Lett.*, B358:281-286, 1995.
- [25] D. P. ROY. Search for the invisibly decaying higgs particle at lep and the lhc. 1994.
- [26] D. ZEPPENFELD. Higgs search at lep / lhc.
- [27] (ED.) G. ALTARELLI, (ED.) R. KLEISS, AND (ED.) C. VERZEGNASSI. Z physics at lep 1. proceedings, workshop, geneva, switzerland, september 4-5, 1989. vol. 2: higgs search and new physics.
- [28] GÖSTA ED. FERNÁNDEZ, ENRIQUE ED. ; JARLSKOG. Ecfa study week on instrumentation technology for high-luminosity hadron colliders. In *Vol 1*, volume CERN 89-10 v 1 ; ECFA 89-124 v 1, page 392.
- [29] GÖSTA ED. FERNÁNDEZ, ENRIQUE ED. ; JARLSKOG. Ecfa study week on instrumentation technology for high-luminosity hadron colliders. In *Vol 2*, volume CERN 89-10 v 2 ; ECFA 89-124 v 2, page 400.
- [30] *Large Hadron Collider Workshop.*, volume 1, 1990.
- [31] R. M. BARNETT ET AL. *Review of particle physics. Particle Data Group*, volume D54. 1996.
- [32] C. AUGIER ET AL. Predictions on the total cross-section and real part at lhc and ssc. *Phys. Lett.*, B315:503-506, 1993.
- [33] THE ATLAS COLLABORATION. Atlas technical proposal. Technical report, CERN, 1994.
- [34] LHC COLLABORATION. The large hadron collider conceptual design report. 1995.
- [35] L.R. EVANS. *The Large Hadron Collider*.
- [36] E. BERGER ET AL. A measurement of the energy loss spectrum of 150-gev muons in iron. *Z. Phys.*, C73:455, 1997.
- [37] ELZBIETA RICHTER-WAS ET AL. Minimal supersymmetric standard model higgs rates and backgrounds in atlas. *Int. J. Mod. Phys.*, A13:1371, 1998.
- [38] V. TISSERAND. The higgs to two photon decay in the atlas detector.

- [39] VINCENT TISSERAND. Optimization of the atlas detector for the investigation of the higgs boson decaying into two photons at lhc.
- [40] U. EGEDE. The search for a standard model higgs at the lhc and electron identification using transition radiation in the atlas tracker.
- [41] M. BOZZO ET AL. (TOTEM COLLABORATION). Totem: an experiment to measure total cross section and elastic scattering at lhc. *CERN/LHCC 93-47*, 1993.
- [42] M. BOZZO ET AL. (TOTEM COLLABORATION). *CERN/LHCC 94-39*, 1994.
- [43] D. FROIDEVAUX Y E. RITCHER-WAS. Atlas internal note. In *PHYSICS-NO-48*, 1994.
- [44] J. J. AUBERT ET AL. Experimental observation of a heavy particle j. *Phys. Rev. Lett.*, 33:1404, 1974.
- [45] J.E AUGUSTIN ET AL. *Phys Rev Letter*, 33:1406, 1974.
- [46] E. H. M. HEIJNE ET AL. A silicon surface barrier microstrip detector designed for high-energy physics. *Nucl. Instrum. Meth.*, 178:331, 1980.
- [47] B. HYAMS ET AL. A silicon counter telescope to study shortlived particles in high-energy hadronic interactions. *Nucl. Instr. Meth.*, 205:99, 1983.
- [48] R. ALBERGANTI ET AL. A system of 4400 silicon microstrips readout with analog multiplexed electronics used in the wa75 experiment. *Nucl. Instrum. Meth.*, A248:337, 1986.
- [49] H. F. W. SADROZINSKI ET AL. Radiation - hard frontend electronics and silicon microstrip detectors.
- [50] T. A. ARMSTRONG ET AL. Use of silicon microstrip detectors for precise measurement of high momenta. *Nucl. Instrum. Meth.*, A274:165, 1989.
- [51] G. ANZIVINO ET AL. Latest results from silicon microstrip detectors with vlsi readout for the delphi microvertex detector. *Nucl. Instrum. Meth.*, A256:65, 1987.
- [52] T. OHSUGI ET AL. Double sided microstrip sensor for the barrel of the sdc silicon tracker. *Nucl. Instrum. Meth.*, A342:16-21, 1994.
- [53] MANOBU TANAKA ET AL. Readout system of the silicon microstrip vertex detector for the kek b factory. *Nucl. Instrum. Meth.*, A342:169-174, 1994.
- [54] W.R. LEO. *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experimente*. Springer-Verlag, 1994.
- [55] EISBERG RESNICK. *Física cuántica*. 1989.
- [56] GALINDO Y PASCUAL. *Mecánica cuántica*. Editorial EUEDEMA, 1989.
- [57] GEROLD W. NEUDECK. *The PN Junction Diode.*, volume II. ADDISON-WESLEY, 1986.
- [58] C.J.S DAMERELL. *Development in solid state vertex detectors*. 1984.
- [59] M. L. WOOD ET AL. Charge correlation measurements of double sided direct coupled silicon microstrip detectors.

- [60] R. BRENNER ET AL. Results from double sided silicon microstrip detector with field plate separation. *Nucl. Instrum. Meth.*, A326:198, 1993.
- [61] R. BRENNER ET AL. Measurement of the spatial resolution of double sided double metal ac coupled silicon microstrips detectors. *Nucl. Instrum. Meth.*, A326:189, 1993.
- [62] D. HUSSON. Quantitative device simulation of double sided silicon microstrip detectors. *Nucl. Instrum. Meth.*, A320:201, 1992.
- [63] T. OHSUGI ET AL. Radiation hardness of double sided microstrip silicon detector.
- [64] P. FISCHER ET AL. Performance of a beam telescope using double sided silicon microstrip detectors. *Nucl. Instrum. Meth.*, A364:224–230, 1995.
- [65] SALLY SEIDEL. Double sided silicon microstrip sensors for the cdf svx-ii detector.
- [66] M. WOOD ET AL. Studies of a double sided silicon microstrip system with analog vlsi readout. *Nucl. Instrum. Meth.*, A342:264, 1994.
- [67] O. ADRIANI, G. AMBROSI, G. CASTELLINI, G. LANDI, AND G. PASSALEVA. Optical readout for double sided silicon microstrip detectors. *Nucl. Instrum. Meth.*, A342:181, 1994.
- [68] G. R. KALBFLEISCH ET AL. Charge sharing and resolution studies of double sided silicon microstrip detectors with boson spray implants. *Nucl. Instrum. Meth.*, A355:366–385, 1995.
- [69] R. WHEADON. Radiation damage studies on single sided and double sided silicon microstrip detectors. *Nucl. Instrum. Meth.*, A348:449, 1994.
- [70] F. DJAMA ET AL. Double sided double metal ac coupled silicon microstrip detectors. *Nucl. Instrum. Meth.*, A360:113, 1995.
- [71] M. CARIA AND E. FIANDRINI. Characterization of large series of double sides silicon microstrip detectors.
- [72] N. L. BRUNER, M. A. FRAUTSCHI, M. R. HOEFERKAMP, AND S. C. SEIDEL. Characterization procedures for double sided silicon microstrip detectors. *Nucl. Instrum. Meth.*, A362:315, 1995.
- [73] S. C. SEIDEL, N. L. BRUNER, M. A. FRAUTSCH, M. R. HOEFERKAMP, AND A. PATTON. Studies of double sided silicon microstrip detectors. *Nucl. Instrum. Meth.*, A383:128–136, 1996.
- [74] M. A. FRAUTSCHI, M. R. HOEFERKAMP, AND S. C. SEIDEL. Capacitance measurements of double sided silicon microstrip detectors.
- [75] Y. SAITOH ET AL. Fabrication of a double sided silicon microstrip detector with an ono capacitor dielectric film. *Ieee Trans. Nucl. Sci.*, 43:1123, 1996.
- [76] M. A. FRAUTSCHI, S. C. SEIDEL, AND A. WEBSTER. A fixture for probing double sided silicon microstrip detectors. *Nucl. Instrum. Meth.*, A355:521, 1995.
- [77] C. ROENNQVIST ET AL. Double sided silicon microstrip detectors and low noise selftriggering multichannel readout chips for imaging applications. *Nucl. Instrum. Meth.*, A348:440, 1994.

- [78] A. ADAM ET AL. Performance on test beam of the 13 double sided silicon microstrip detector. *Nucl. Instrum. Meth.*, A348:436, 1994.
- [79] C. TRONCON. Measurement of spatial resolution and charge collection in double sided double metal silicon microstrip detectors. *Nucl. Phys. Proc. Suppl.*, 44:287–291, 1995.
- [80] M. BRUZZI, E. CATACCHINI, R. D’ALESSANDRO, AND G. PARRINI. Heavily irradiated double-sided wedge silicon microstrip detector. *Nucl. Instrum. Meth.*, A409:132, 1998.
- [81] K. D. HOFFMAN, D. BORTOLETTO, S. CIHANGIR, J. SPALDING, AND M. GARCIA-SCIVERES. Charge collection efficiency in double-sided silicon microstrip detectors. *Nucl. Instrum. Meth.*, A379:237, 1996.
- [82] M. A. FRAUTSCHI, M. R. HOEFERKAMP, AND S. C. SEIDEL. Capacitance measurements of double-sided silicon microstrip detectors. *Nucl. Instrum. Meth.*, A378:284, 1996.
- [83] WEN-CHIN TSAY ET AL. Fabrication of double-metal ac-coupled silicon microstrip detectors. *Nucl. Instrum. Meth.*, A405:13, 1998.
- [84] A. BRANDL, S. SEIDEL, AND S. WORM. Measurement of proton induced radiation damage effects in double-sided silicon microstrip detectors. *Nucl. Instrum. Meth.*, A399:76, 1997.
- [85] Y. SAITOH ET AL. Performance of a double sided silicon microstrip detector with a wide pitch n side readout using a field plate and a multip-stop structure. *Ieee Trans. Nucl. Sci.*, 44:622, 1997.
- [86] V. CHABAUD ET AL. The delphi silicon strip microvertex detector with double sided readout. *Nucl. Instrum. Meth.*, A368:314–332, 1996.
- [87] Y UNNO ET AL. Beam tests of a doubled-sided silicon strip detector with fast binary readout electronics before and after proton irradiation. *IEEE trans N.S.* 42, 1996.
- [88] K. GILL. Radiation damage studies of n side silicon microstrip detectors. *Nucl. Phys. Proc. Suppl.*, 44:475–479, 1995.
- [89] J. F. KRIZMANIC. The depletion properties of silicon microstrip detectors with variable strip pitch. *Nucl. Instrum. Meth.*, A342:27, 1994.
- [90] J. DEWITT ET AL. Single-to-noise in silicon microstrip detectors with binary readout. *Ieee Trans. Nucl. Sci.*, 42:445, 1995.
- [91] Y UNNO ET AL. Beam test of a large area n-n silicon strip detector with fast binary electronics. *IEEE N.S. Symposium, Nov 3-8, Anaheim, CA*, 1996.
- [92] O. TOKER, S. MASCIOCCHI, E. NÝGARD, A. RUDGE, AND P. WEILHAMMER. Viking: A cmos low noise monolithic 128-channel frontend for si strip detector readout. *Nucl. Instrum. Meth.*, A340:572–579, 1994.
- [93] F. ANGELINI ET AL. A microstrip gas chamber on a silicon substrate. *Nucl. Instrum. Meth.*, A314:450–454, 1992.
- [94] A. SEIDEN. High precision tracking: Silicon detectors, gas microstrips.
- [95] E. F. BARASCH ET AL. Gas microstrip detectors on polymer, silicon and glass substrates. *Nucl. Phys. Proc. Suppl.*, 32:216, 1993.

- [96] J. VAN DER MAREL ET AL. A silicon microstrip gas chamber. *Nucl. Instrum. Meth.*, A348:383, 1994.
- [97] W. S. HONG, H. S. CHO, V. PEREZ-MENDEZ, AND W. G. GONG. Utilization of amorphous silicon carbide (a-si:c:h) as a resistive layer in gas microstrip detectors.
- [98] STEVE SNOW ET ALL. Msgc beam test results. *ATLAS Internal Note*, INDET-NO-063, 1994.
- [99] M. D. M. DE FEZ-LASO ET AL. Beam test performance of the apv5 chip. *Nucl. Instrum. Meth.*, A382:533-544, 1996.
- [100] PP ALLPORT ET ALL. Silicon detectors for forward tracking in atlas. *Nucl. Instrum. Meth.*, A383:27-34, 1996.
- [101] S. GADOMSKI ET ALL. The deconvolution method of fast pulse haping at hadron colliders. *Nucl. Instr & Methods A320 112-119*, 1993.
- [102] P. P. ALLPORT ET AL. Performance of the atlas-a silicon detector with analogue readout. 1996.
- [103] A. GOMEZ AND HFW SDROZINSKI. Biasing and grounding in the atlas sct. *SCIPP 96/46*, 1996.
- [104] I. KIPNIS. Cafe: A complementary bipolar analog front end integrated circuit for the atlas sct. In *Sin publicar*.
- [105] J. DEWITT. A pipeline and bus interface chip for silicon strip detector readout. *IEEE N.S. Symposium, San Francisco CA.*, 1993.
- [106] J. DEWITT. Header adder chip. In *Sin publicar*.
- [107] P. GIUBELLINO ET AL. Study of the effects of neutron irradiation on silicon strip detectors. *Nucl. Instrum. Meth.*, A315:156, 1992.
- [108] F. ALBIOL ET AL. Beam test of the atlas silicon detector modules with binary readout in the cern h8 beam in 1996. *Presented to IEEE*, 1996.
- [109] J. DEWITT. Low power bipolar integrated circuit. In *Sin publicar*.
- [110] STIVE PIER. Dsp readout system for atlas sct test beam and test bench. <http://positron.ps.uci.edu/pier/>.
- [111] JOHN HILL. Bias card documentation. http://www.hep.phy.cam.ac.uk/atlas/atlas_home.html.
- [112] ATLAS IDG. Atlas inner detector technical design report. Technical Report 1, CERN, 1997.
- [113] ATLAS IDG. Atlas inner detector technical design report. Technical Report 2, CERN, 1997.
- [114] Y. UNNO ET AL. Evaluation of p-stop structures in the n-side of n-on-n silicon strip detector. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 45:401, 1998.
- [115] L. COSTRELL. *NIM Standard in Instrumentation in Applied Nuclear Chemistry*. 1973.
- [116] *VME Standard*. 1982.