

ESTUDIO DE UN MICROCABLE DE PAR TRENZADO PARA LA COMUNICACIÓN Y LECTURA DEL MÓDULO DE PÍXELES DEL EXPERIMENTO CMS

Por

Sandra Jimena Oliveros Tautiva

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

MAESTRÍA EN CIENCIAS

en
FÍSICA

**UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO
RECINTO UNIVERSITARIO DE MAYAGÜEZ
2010**

Aprobada por:

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

Fecha

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

Fecha

Dorial Castellanos, Ph.D
Miembro, Comité Graduado

Fecha

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

Fecha

Héctor J. Jiménez, Ph.D
Director del Departamento

Fecha

Abstract

The Compact Muon Solenoid (CMS) is one of the two most important experiments at the Large Hadron Collider (LHC). The pixel detector is the component closest to the collision in CMS and it receives large doses of radiation which will affect its performance. The pixel detector will be replaced by a new one after four years. The aim is to reduce material in the sensitive zone of the new pixel detector, which leads to the implementation of a type of micro twisted pair cable that will replace the existing kapton cables and some connections will be eliminated.

The purpose of this work was to study the viability of using these micro twisted pair cables in the existing 40 MHz analog readout. The electrical parameters of micro cables were determined, and operational tests were performed in a module using these cables for communicating and reading. Three different lengths of micro cables were used, 1.0, 1.5 and 2.0 m, in order to compare test results with those obtained using the kapton cable. It was found that the use of these cables does not affect the programming and reading of the pixels in one module, so the micro cables are viable to be used in place of the kapton cables.

Resumen

El experimento CMS ("Compact Muon Solenoid") es uno de los dos experimentos más importantes en el gran acelerador de partículas LHC ("Large Hadron Collider"). En CMS el detector de píxeles es el componente más cercano a la colisión, recibiendo grandes dosis de radiación que afectarán su desempeño. Al cabo de 4 años será reemplazado por un nuevo detector. Se busca reducir material en la zona sensitiva del nuevo detector de píxeles lo que conlleva la implementación de un tipo de microcable de par trenzado que reemplazará los existentes cables de *kapton* y se eliminarán conexiones ya no requeridas.

El propósito de este trabajo fue estudiar la viabilidad de utilizar estos microcables en el sistema existente de lectura analógica a 40 MHz. Para ello se determinaron los parámetros eléctricos del microcable y se realizaron las pruebas de operación en un módulo utilizando microcables para la comunicación y lectura. Se usaron microcables de longitudes de 1.0, 1.5 y 2.0 m y se compararon los resultados con los obtenidos usando el sistema actual. Se comprobó que el uso de estos microcables no altera la programación y lectura de los píxeles del módulo; por lo tanto, son viables para ser utilizados en reemplazo de los cables de *kapton*.

Copyright © 2010
por
Sandra Jimena Oliveros Tautiva

Dedicado a mis padres que con su apoyo y motivación me han dado confianza para continuar en mi proceso de formación académica. A Jhon Acosta, el cual me ha acompañado y ayudado en mi crecer académico y su compañía me ha alentado para cumplir mis metas.

Agradecimientos

Al Dr Ángel López, quien me brindó la oportunidad de estar vinculada al Experimento CMS del acelerador más grande de partículas “El Gran Colisionador de Hadrones – LHC”. También quiero agradecer al Dr López sus valiosas contribuciones al desarrollo de este trabajo y su constante asesoría.

A Valeria Radicci, PostDoc de la universidad de Kansas, con quien inicié éste trabajo en el Instituto *Paul Scherrer* y me brindó su apoyo y asesoría para continuarlo.

A Beat Meier, Ingeniero Eléctrico del Instituto *Paul Scherrer*, quien me orientó y me colaboró en la primera etapa del desarrollo de este trabajo.

Tabla de contenido

Abstract	ii
Resumen	iii
Agradecimientos	vi
Tabla de contenido	vii
Lista de tablas	ix
Lista de figuras	x
1. Introducción	1
1.1. LHC y experimento CMS	1
1.2. Motivación.....	3
2. Líneas de transmisión	5
2.1. Introducción.....	5
2.2. Propiedades eléctricas.....	6
2.3. Impedancia	8
2.4. Pérdidas y distorsión	13
3. Detector de píxeles	16
3.1. Descripción general.....	16
3.2. Módulo de píxeles	17
3.2.1. Introducción.....	17
3.2.2. El sensor	18
3.2.3. Chip de lectura “ROC”	20
3.2.4. Los parámetros DAC.....	23
3.3. Lectura y sistema de control.....	24
3.3.1. Aspectos generales.....	24
3.3.2. Señal analógica de salida.....	25
4. Nueva versión del detector de píxeles	27
4.1. Introducción.....	27
4.2. Sensor del detector de píxeles.....	28
4.3. Nuevo protocolo de lectura.....	29
4.4. Reducción de material.....	30

5. Estación y pruebas de operación del módulo.....	33
5.1. Introducción.....	33
5.1.1. Requerimientos de hardware.....	33
5.1.2. Requerimientos de software.....	34
5.2. Pruebas de funcionalidad del módulo de píxeles.....	34
5.2.1. Prueba de <i>address levels</i>	35
5.2.2. Prueba de lectura de píxeles	35
5.2.3. Prueba <i>Vthreshold-CalDel</i>	36
5.3. Pruebas de rendimiento.....	37
5.3.1. Pruebas de la señal de ruido en los píxeles.....	37
5.4. Pruebas de calibración.....	38
5.4.1. Calibración de <i>pulse height</i>	38
6. Procedimientos.....	41
6.1. Cálculo de la impedancia del microcable usando ATLC.....	41
6.2. Medidas de las propiedades eléctricas del microcable.....	42
6.3. Montaje experimental	43
6.4. Lectura de los <i>address levels</i> del módulo de píxeles	45
6.5. Atenuación de señales a través de los microcables.....	46
6.6. Pruebas de operación del módulo usando microcables.....	48
7. Resultados y análisis.....	49
7.1. Impedancia del microcable de par trenzado.....	49
7.2. Propiedades eléctricas del microcable.....	51
7.3. Prueba de los <i>address levels</i>	53
7.4. Atenuación de señales a través de los microcables	57
7.5. Pruebas de operación ..	59
8. Conclusiones y trabajos futuros.....	62
Bibliografía.....	64

Lista de tablas

Tabla 3.1. Parámetros DAC	23
Tabla 7.1. Resultados de las propiedades eléctricas del microcable de par trenzado.	52
Tabla 7.2. Resultados de la razón de calidad para diferentes longitudes de microcables y resistencias de terminación.....	54

Lista de figuras

Figura 1.1. El LHC “Gran Colisionador de Hadrones”	2
Figura 1.2. Experimento CMS “Compact Muon Solenoid”	3
Figura 2.1. Cable de par trenzado.....	6
Figura 2.2. Circuito equivalente de una línea de transmisión.....	6
Figura 2.3. Circuito infinitesimal para una línea con pérdidas.....	8
Figura 2.4. Variación de la impedancia con la frecuencia.....	11
Figura 2.5. Línea de transmisión terminada en una carga Z_L	12
Figura 2.6. Sección transversal de un cable coaxial en ATLC.....	13
Figura 3.1. Detector de píxeles del experimento CMS.....	16
Figura 3.2. Módulo de píxeles.....	18
Figura 3.3. Creación de la región de carga en la unión PN de dos materiales extrínsecos.....	19
Figura 3.4. Esquema del sensor del detector de píxeles.....	20
Figura 3.5. Diagrama del ROC con un solo PUC.....	23
Figura 3.6. Sistema de comunicación y lectura del módulo.....	25
Figura 3.7. Superposición de las lecturas de todos los píxeles en un ROC.....	26
Figura 4.1. Aumento de la luminosidad en el LHC.....	27
Figura 4.2. Frecuencia de transmisión de datos.....	29
Figura 4.3. Contribución de material existente en el sistema del tracker.....	30

Figura 4.4. Relación entre la coordenada <i>pseudo-rapidity</i> y el ángulo de incidencia de las partículas.....	31
Figura 4.5. Sección transversal del microcable de par trenzado propuesto para el reemplazo del cable de kapton.....	31
Figura 4.6. Esquema digital uni/bidireccional para el uso de los microcables de par trenzado....	32
Figura 5.1. Conexión de un módulo de píxeles para las pruebas de operación.....	34
Figura 5.2. <i>Address Levels</i> de todos los píxeles en un ROC.....	35
Figura 5.3. Prueba de lectura de píxeles para un ROC con 2 píxeles muertos.....	36
Figura 5.4. Región de lectura en el plano <i>VthrComp-CalDel</i>	37
Figura 5.5. Curva en <i>S</i> para determinar el ruido en un píxel.....	38
Figura 5.6. <i>Pulse height</i> en función de la señal de calibración <i>Vcal</i>	39
Figura 6.1. Sección transversal de microcable de par trenzado	41
Figura 6.2. Configuración experimental para determinar las propiedades eléctricas del microcable de par trenzado.....	43
Figura 6.3. Configuración experimental de la conexión del módulo por medio de microcables de par trenzado.....	44
Figura 6.4. Diagrama del cable de <i>kapton</i>	44
Figura 6.5. Conexión de las resistencias de terminación en las PCBs.....	45
Figura 6.6. Interfaz gráfica del software PSI46EXPERT para la realización de las pruebas a los módulos de píxeles.....	47
Figura 7.1. Resolución de 350 x 350 píxeles (cuadrado) y 1800 x 1800 (redondo)..	49
Figura 7.2. Variación del resultado de la simulación en función de la resolución.	50
Figura 7.3. Variación de la impedancia diferencial en función de la separación de los conductores del microcable de par trenzado.....	51
Figura 7.4. Lectura de la señal diferencial de entrada y salida medida en el microcable usando una resistencia de terminación en cada línea.....	52
Figura 7.5. <i>Address levels</i> preliminares con resistencias de terminación no óptimas.....	53

Figura 7.6. <i>Address levels</i> de los píxeles para un ROC.	55
Figura 7.7. Razón de calidad de los <i>address levels</i> en función de la resistencia de terminación para cada longitud.....	56
Figura 7.8. Separación promedio entre los <i>address levels</i> en función de la longitud.....	57
Figura 7.9. Optimización del valor de <i>pulse height</i> para cada longitud de microcables.....	58
Figura 7.10. Valor de <i>pulse height</i> con diferentes longitudes de microcables de par trenzado.....	58
Figura 7.11. Prueba de lectura de los píxeles en un ROC. a) Prueba sin microcables b)microcables de 1.0 m c) microcables de 1.5 m d) microcables de 2.0 m.....	59
Figura 7.12. Mapa de <i>Vthreshold-CalDel</i> en un ROC.....	60
Figura 7.13. Distribución del valor de sigma de cada curva en <i>S</i> de todos los píxeles en un ROC.	61

1. Introducción

1.1. LHC y Experimento CMS

El Gran Colisionador de Hadrones (LHC), figura 1.1, es un acelerador circular de 27 km de circunferencia y está 100 m bajo tierra. Se encuentra ubicado en Ginebra, Suiza, y fue construido por el CERN (*European Organization for Nuclear Research*) con el objetivo de explorar la nueva física en la escala de energías del orden de 14 TeV. Está diseñado para colisiones protón-protón. Estos son acelerados en grupos de 1.15×10^{11} e interaccionarán cada 25 ns desde direcciones opuestas a los puntos de colisión. Se espera obtener alrededor de 20 colisiones inelásticas de protón-protón en cada cruce de dos grupos. Su más grande objetivo es la búsqueda del bosón de Higgs, una partícula que juega un papel fundamental en el Modelo Estándar de las partículas elementales pero que aún no ha sido observada experimentalmente.

La cadena de inicio de inyección de protones comienza con un acelerador lineal que acelera los protones hasta una energía de 50 MeV. Luego las partículas son inyectadas al sincrotrón de protones, el cual produce los grupos con intervalos de 25 ns. De ahí pasan al Súper Sincrotrón de Protones (SPS) donde son acelerados hasta una energía de 450 GeV y finalmente al anillo del LHC. Cuatro (4) experimentos ATLAS, LHCb, CMS y ALICE corresponden a los puntos de interacción de los protones. Los experimentos CMS y ATLAS son de propósito general y su objetivo es la exploración de los alcances del Modelo Estándar. El experimento LHCb estará dedicado a la física del Quark bottom (b) y ALICE a la física de los iones pesados. LHCb y ALICE son experimentos más pequeños [1].

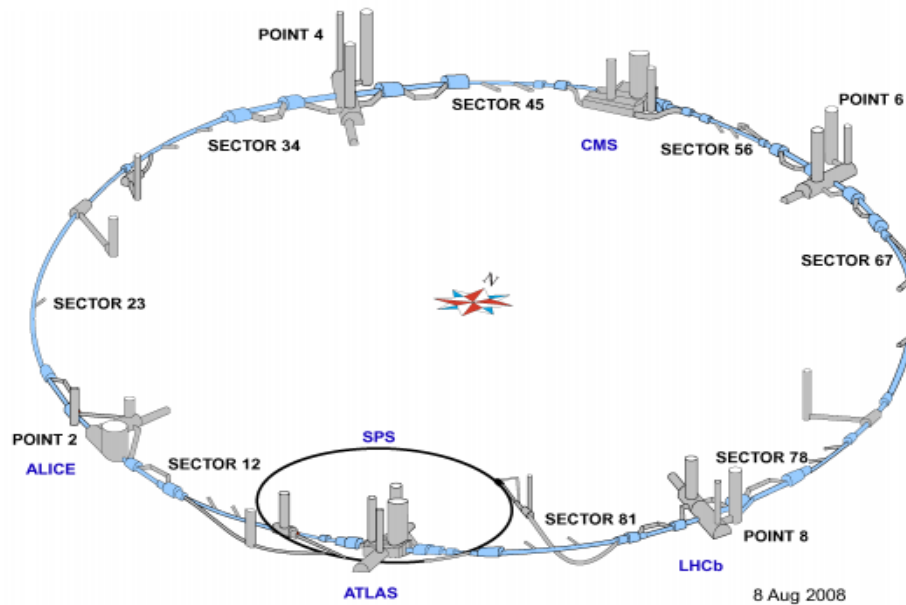


Figura 1.1. El LHC “Gran Colisionador de Hadrones” [1].

El experimento CMS (Compact Muon Solenoid), figura 1.2, está diseñado para buscar el bosón de Higgs, hacer pruebas de supersimetría y dimensiones extras [2]. Para ello cuenta con varios sub-detectores diseñados para detectar grupos de partículas de acuerdo a sus propiedades, además de su gran solenoide, un magneto superconductor que genera un campo magnético de 4 T que se usará para medir el momentum de las partículas cargadas. Sus dimensiones son 21.6m de largo, diámetro de 14.6m y su peso total es 12.500 toneladas. La función principal de cada sub-detector se resume a continuación:

- El Detector de Píxeles: Localizado en la parte más cercana a la colisión, tendrá como misión medir la trayectoria de las partículas cargadas que lo crucen. Para ello cuenta con tres (3) capas en forma de barril “*Pixel Barrel*” concéntricas entre sí y dos tapas “*Forward Pixel*” a cada lado. El silicio es el componente principal del sensor.
- El Calorímetro Electromagnético: Identificará y medirá con precisión la energía de los electrones y fotones. Consiste de 75848 centelladores de tungstato de plomo montados en la parte central y cerrado por 7324 bloques en cada una de las dos tapas de los extremos.
- El Calorímetro Hadrónico: Su objetivo es medir la energía de los hadrones, partículas

que experimentan interacción fuerte como protones, neutrones, piones y kaones. Tiene una estructura de emparedado compuesto por capas de metales y capas de centelladores plásticos.

- El Sistema de Muones: Los muones se caracterizan por su largo tiempo de vida, masa grande, poder de penetración alto y baja pérdida de energía. Para medir su momentum y energía se utilizan tres detectores (tubos de deriva, cámara de tiras catódicas y cámara de tiras resistivas).

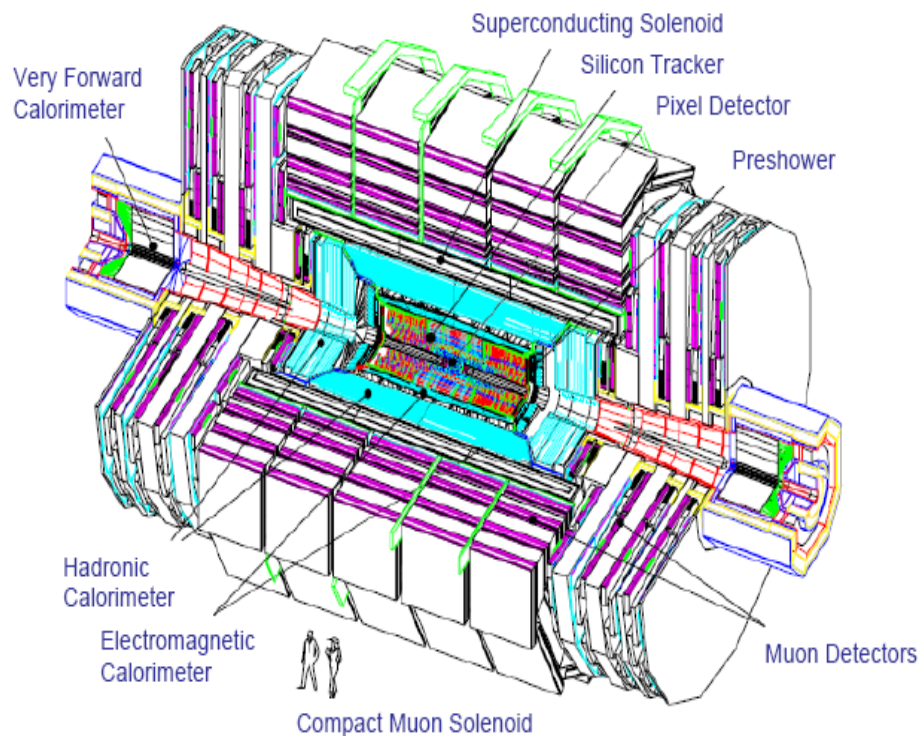


Figura 1.2. Experimento CMS “Compact Muon Solenoid” [1].

1.2. Motivación

Para el año 2014 será necesario reemplazar el detector de píxeles del experimento CMS debido a los daños causados por la radiación. Se hace necesaria una evaluación completa en cuanto a materiales y costos que conlleva realizar una nueva versión del mismo. El sistema de cableado constituye un aporte significativo de material en el detector sobre todo la parte terminal

de sus conexiones debido a la cantidad de tarjetas conectoras. En el detector de píxeles las señales son transmitidas por cables de *kapton* y estos son limitados en longitud (40 cm), presentan poca flexibilidad y además son costosos. Para el reemplazo se está considerando un tipo diferente de cable que pueda superar las limitaciones del actual cable de *kapton*. El prototipo de cable escogido es un microcable de par trenzado el cual cuenta con las siguientes ventajas:

- Tiene bajo costo comparado con el cable de *kapton*.
- Tiene más flexibilidad en todas las direcciones para su manipulación.
- Se podrá eliminar el anillo de conexiones que contiene 1664 conectores y 64 tarjetas de circuito impreso, el cual comunica los cables de *kapton* con las fibras ópticas.
- Se empleará una mayor longitud de microcables (1.0 a 2.0 m) y se podrá alejar las fibras ópticas del punto cercano de interacción de las partículas con el fin de reducir daños causados por la radiación.
- Su masa reducida comparada con el cable de *kapton* permitirá que se instale una cuarta capa de píxeles en el barril sin aumentar la cantidad de material total.
- El microcable brinda bajo consumo de potencia en señales diferenciales.

Para un posible aumento de la luminosidad, el cual se tiene planificado para el LHC, se requerirá un aumento en la velocidad de transmisión de datos, ventaja que presenta este tipo de cable. La luminosidad será aumentada por un factor de dos para una primera fase y un factor de 10 para una segunda fase que será mucho más adelante.

Se requiere realizar las pruebas necesarias para estudiar la funcionalidad de este tipo de microcable. Para ello se determinarán las propiedades eléctricas del microcable y se adaptará el número necesario de microcables a un módulo de píxeles con el fin de realizar las pruebas de comunicación y lectura del módulo. De esta manera los resultados mostrarán la confiabilidad de usar microcables en el reemplazo de los cables de *kapton*.

2. Líneas de transmisión

2.1. Introducción

Las líneas de transmisión están presentes en la mayor parte de los sistemas de comunicación y se debe garantizar la correcta transmisión de datos e información a través de ellas. Por ejemplo, la gran cantidad de datos que es posible recolectar del módulo de píxeles deben ser transmitidos y leídos correctamente y en lo posible evitar la interferencia de agentes externos en su transmisión. Una línea de transmisión consta básicamente de dos conductores separados por un material aislante. El cable coaxial y el cable de par trenzado son líneas frecuentemente utilizadas y ampliamente conocidas. Las líneas de transmisión poseen propiedades que se deben conocer o calcular para predecir exactamente la calidad de información que se está entregando. Propiedades como la velocidad de propagación de la señal, el tiempo de retraso, la impedancia, la atenuación, entre otros, caracterizan una línea de transmisión.

Un cable de par trenzado (figura 2.1) consiste en dos líneas de material conductor y rodeados por un aislante o material dieléctrico con el fin de transmitir datos, generalmente señales iguales y opuestas. Los cables se trenzan en pares para disminuir el ruido y la interferencia provenientes de pares vecinos. Es ampliamente utilizado en redes telefónicas y redes de datos. Su estructura interna es impuesta por cada fabricante de acuerdo a la tecnología usada. Estos cables tienen la ventaja de no ser costosos, además de su flexibilidad y fácil conexión. Entre las desventajas que presentan se encuentran una tasa de error a altas velocidades y distancia limitada (aproximadamente 100m) debido a la atenuación. Los cables de par trenzado tipo estándar presentan valores de impedancia entre 100 y 150 Omhs.



Figura 2.1. Cable de par trenzado [4].

Con el avance de la tecnología, actualmente en algunas aplicaciones se están utilizando microcables de par trenzado que llegan a transmitir señales a 2Gb/s con un diámetro de cada línea del orden de los micrómetros. Estos cables son preferidos especialmente para manejar bajas amplitudes de señales diferenciales así como por su grosor, flexibilidad y bajo costo.

2.2. Propiedades eléctricas

Un modelo de las propiedades eléctricas de las líneas de transmisión puede representarse mediante un circuito como el que presenta la figura 2.2. Una resistencia R (Ω/m) en serie que simula las pérdidas de potencia en el conductor, una inductancia L (H/m) que representa la energía almacenada en forma de campo magnético, un condensador C (F/m) en paralelo que representa la energía almacenada en forma de campo eléctrico debido a los dos conductores separados por un aislante y finalmente, la conductancia G ($1/R$) en paralelo colocada entre los dos conductores para modelar las pérdidas por el material dieléctrico.

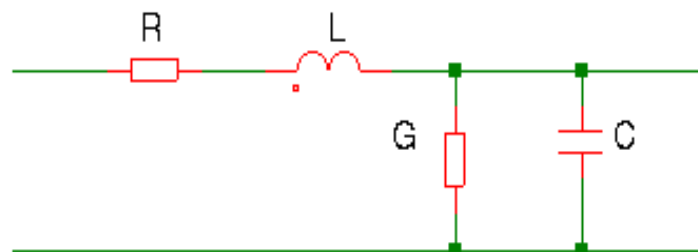


Figura 2.2. Circuito equivalente de una línea de transmisión.

El tiempo de retraso por unidad de longitud (s/m) o de propagación de la señal puede calcularse mediante la ecuación 2.1, la cual depende de los parámetros L y C descritos anteriormente.

$$\tau = \sqrt{LC} \quad (2.1)$$

Igualmente la velocidad de propagación de la señal puede ser calculada utilizando el inverso del tiempo de retraso como se observa en la ecuación 2.2.

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.2)$$

También suele utilizarse el factor de velocidad el cual es la relación entre la velocidad de propagación de la señal en la línea y la velocidad de la luz. El factor de velocidad F_v está relacionado con la permitividad relativa k del material aislante de la línea de transmisión por medio de la ecuación 2.3.

$$F_v = \frac{1}{\sqrt{k}} \quad (2.3)$$

Los factores de velocidad en las líneas de transmisión generalmente se encuentran en el intervalo de 0.6 a 0.9. La longitud de onda λ de la señal puede ser determinada utilizando el valor de la velocidad de propagación o el factor de velocidad y la frecuencia f de la señal que se propaga en la línea (ecuación 2.4).

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{cF_v}{f} \quad (2.4)$$

Generalmente a altas frecuencias se presentan varias longitudes de onda de la señal en la línea y puede variar bastante la amplitud de la señal en la línea. Otro parámetro importante en el estudio de la propagación de las señales en las líneas de transmisión es la longitud eléctrica l_e , la

cual es la longitud de la línea medida en unidades de longitud de onda, ecuación 2.5.

$$l_e = \frac{l}{\lambda} \quad (2.5)$$

Si se desea expresar la longitud en grados, se multiplica la ecuación 2.5 por 360° , lo que corresponde al desfase que se produce en una línea determinada en caso que su longitud no sea igual a un múltiplo de la longitud de onda.

2.3. Impedancia

La propagación del voltaje $V(x)$ y la corriente $I(x)$ a lo largo de la longitud de una línea de transmisión depende de la frecuencia ω de la señal. Las ecuaciones diferenciales de primer orden para el voltaje y la corriente (ecuación 2.6 y 2.7) pueden ser deducidas mediante la figura 2.3.

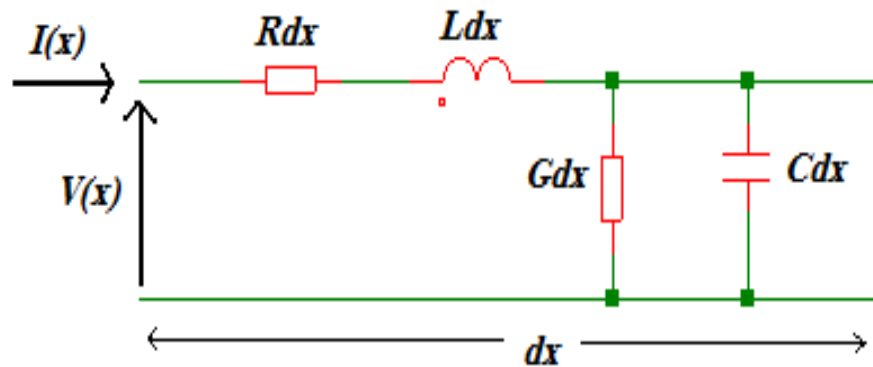


Figura 2.3. Circuito infinitesimal para una línea con pérdidas.

$$\frac{dV(x)}{dx} = -(R + i\omega L)I(x) \quad (2.6)$$

$$\frac{dI(x)}{dx} = -(G + i\omega C)V(x) \quad (2.7)$$

Estas ecuaciones escritas en segundo orden son mostradas en la ecuaciones 2.8 y 2.9.

$$\frac{d^2 V(x)}{dx^2} = \gamma^2 V(x) \quad (2.8)$$

$$\frac{d^2 I(x)}{dx^2} = \gamma^2 I(x) \quad (2.9)$$

El parámetro γ representa el coeficiente de propagación, ecuación 2.10.

$$\gamma = \sqrt{(R + i\omega L)(G + i\omega C)} = \alpha + i\beta \quad (2.10)$$

El coeficiente de propagación es un número complejo compuesto de dos partes: la parte real α es la constante de atenuación (Nepers/m) y en la parte imaginaria β representa el factor de fase en unidades de radianes por unidad de longitud. También se relaciona con la velocidad de propagación mediante la ecuación 2.11. Dicha ecuación también muestra la dependencia de la velocidad de propagación con la frecuencia lo cual origina un fenómeno de dispersión.

$$\beta = \frac{\omega}{v} \quad (2.11)$$

La solución general para la ecuación de voltaje 2.8 se muestra en la ecuación 2.12. El primer término representa una onda de amplitud V_1 que se desplaza en la dirección positiva de x y el segundo término una onda de amplitud V_2 desplazándose en la dirección negativa de x .

$$V(x) = V_1 e^{-\gamma x} + V_2 e^{\gamma x} = V_1 e^{-\alpha x} e^{-i\beta x} + V_2 e^{\alpha x} e^{i\beta x} \quad (2.12)$$

Ahora la solución de la ecuación para la corriente puede encontrarse utilizando la ecuación 2.6 mediante la diferenciación de la ecuación 2.12. De esta manera se obtiene la ecuación 2.13 para la solución de la corriente en función de x .

$$I(x) = \sqrt{\frac{G + i\omega C}{R + i\omega L}} (V_1 e^{-\gamma x} - V_2 e^{\gamma x}) = \frac{1}{Z_0} (V_1 e^{-\gamma x} - V_2 e^{\gamma x}) \quad (2.13)$$

El termino Z_0 representa la impedancia característica de una línea de transmisión [3]. Así de la ecuación 2.13 el valor de Z_0 esta dado por la ecuación 2.14.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + iwL}{G + iwC}} \quad (2.14)$$

La impedancia característica es la razón entre el nivel de voltaje presente en un punto en la línea de transmisión y la corriente en ese instante. Es una cantidad compleja independiente de la longitud. El término complejo señala un desfase entre las ondas de tensión y corriente. El componente resistivo de la impedancia es la parte real y la reactancia la parte imaginaria de la impedancia. Para que haya una transferencia máxima de la señal desde la fuente hacia el receptor, la línea de transmisión debe terminar en una resistencia de carga de igual magnitud al valor de la impedancia característica de la línea, es decir, debe estar adaptada. Esto con el fin de evitar reflexiones de la señales cuando llegan al receptor. Generalmente si la línea no esta bien adaptada la impedancia varia con la longitud.

El cable de par trenzado constituye un tipo especial de línea de transmisión por el cual se puede enviar señales diferenciales, por ejemplo, una señal positiva por una línea y una señal negativa por la otra línea. Estas líneas están constituidas por un material conductor, generalmente cobre, y cubiertas por un material aislante. Las líneas se trenzan para reducir las interferencias que se producen entre ellas al enviar señales. Existen varios términos de impedancia relacionados con este tipo de línea de transmisión. Estos son:

- Impedancia simple Z_0 : Corresponde a la impedancia de una sola línea de transmisión, la cual no esta acoplada a otra línea. La señal se propaga a través de la línea y retorna por medio del sistema de referencia tierra.
- Impedancia en modo impar Z_{odd} : Corresponde a la impedancia de una sola línea, del cable de par trenzado, la cual lleva una señal igual en magnitud y opuesta polaridad, es decir, esta acoplada a otra línea.
- Impedancia diferencial Z_{diff} : Es la impedancia calculada entre las dos líneas, las cuales transportan señales iguales en magnitud pero diferente polaridad. Es equivalente a dos veces la impedancia en modo impar ($Z_{diff} = 2 Z_{odd}$).

A altas frecuencias la ecuación 2.14 puede aproximarse a la ecuación 2.15 lo cual elimina los parámetros R y G:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.15)$$

Con la ecuación 2.15 puede encontrarse el valor de la impedancia característica como un número real e independiente de la frecuencia generalmente para líneas sin pérdidas y a muy altas frecuencias. En la figura 2.4 se muestra la tendencia del valor de Z_0 a bajas y altas frecuencias.

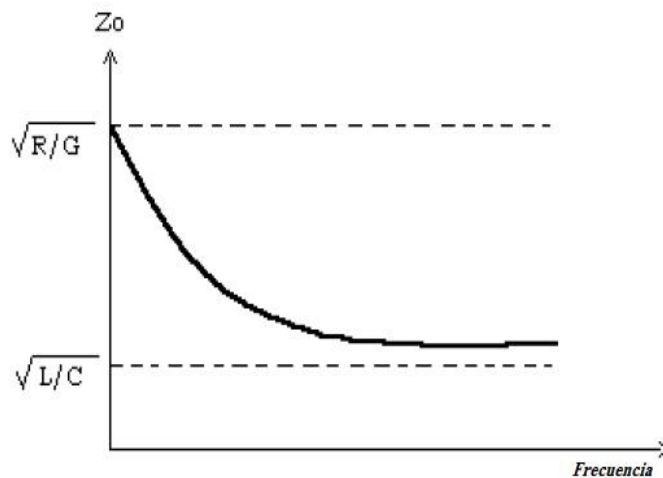


Figura 2.4. Variación de la impedancia con la frecuencia [4].

Cuando se transmiten señales a través de una línea es primordial que la información sea transmitida desde la fuente hacia el receptor, es decir, debemos cerciorarnos de que la información que llega al receptor sea la correcta y no información que ha sido modificada por otros parámetros. Es aquí donde reside la importancia de tener una adaptación correcta de impedancia en el receptor. Es decir se debe cumplir que la razón de voltaje a corriente en una onda viajera permanezca constante a lo largo de la línea. Para ello una línea de transmisión con una impedancia característica Z_0 conocida debe terminar en una impedancia de carga Z_L del mismo valor (figura 2.5) con el fin de evitar reflexiones de la señal y garantizar así la transmisión correcta de la información hacia el receptor.

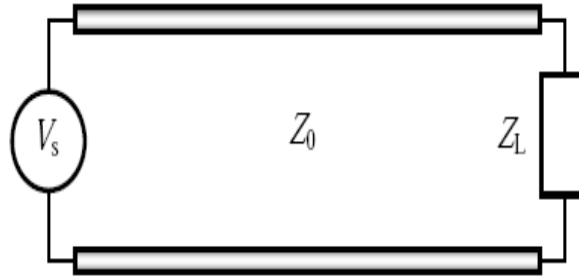


Figura 2.5. Línea de transmisión terminada en una carga Z_L .

En el caso de que $Z_0 \neq Z_L$ se generan reflexiones las cuales se interponen con la señal incidente y se producen ondas estacionarias. Por consiguiente también se produce una variación de la impedancia de la línea de transmisión en función de la longitud de la línea [4]. Para líneas con pérdidas la ecuación 2.16 determina la impedancia en función de x (medida desde el receptor); Z_0 es la impedancia característica de la línea y Z_L la impedancia de carga (figura 2.5).

$$Z(x) = Z_0 \frac{Z_L + iZ_0 \tanh \gamma x}{Z_0 + iZ_L \tanh \gamma x} \quad (2.16)$$

Es de notar que si $Z_L = Z_0$ el valor de Z será siempre igual al valor de Z_0 , es decir a la impedancia característica. Con la correcta adaptación de impedancias en las líneas de transmisión se garantizan bajas pérdidas en la transmisión de datos, se maximiza la transferencia de potencia desde la fuente al receptor y se minimiza las señales distorsionadas a causa de reflexiones y superposiciones.

Para realizar cálculos de impedancia se puede usar un programa llamado ATLC (Arbitrary Transmission Line Calculator) el cual es de uso libre para realizar cálculos de impedancia y de algunas propiedades de las líneas de transmisión. ATLC [5] utiliza el método de diferencias finitas para su funcionamiento. Básicamente usa mapa de “bits” con sus correspondientes colores predeterminados para diferenciar entre conductores y dieléctricos. El programa necesita tomar la forma de la sección transversal de la línea de transmisión. Para ello se dibuja la sección con sus

correspondientes relaciones de dimensiones y colores en un programa gráfico (Gim, photoshop, paint, etc...) y ejecutándolo desde un terminal en la plataforma Linux (también funciona con windows), con el nombre del archivo, desglosa los diferentes resultados de los cálculos en un mensaje. La figura 2.6 muestra la sección transversal de un cable coaxial. Aquí el programa identifica el color verde (RGB 0, 255, 0) como tierra (potencial cero), rojo (RGB 255, 0, 0) como conductor a potencial positivo +1V y blanco (RGB 0, 0, 0) el vacío. Para otros casos, por ejemplo un potencial negativo se usa el color azul (RGB 0, 0, 255) y diferentes colores para cada tipo de material dieléctrico en particular.

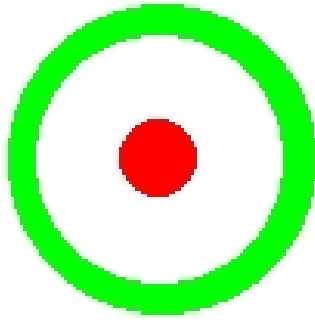


Figura 2.6. Sección transversal de un cable coaxial en ATLC [5].

Por ejemplo para un cable coaxial, con unas dimensiones definidas, la salida del programa desglosa la siguiente información: $Z_0 = 70.0215 \text{ Ohm}$ $C = 47.637 \text{ pF/m}$ $L = 233.557 \text{ nH/m}$. ATLC también es usado para calcular impedancias en modo común y diferencial y para aquellas líneas de transmisión conformadas de 3 materiales conductores con diferentes geometrías. Todas las estimaciones de las propiedades de las líneas de transmisión son muy próximas a los valores teóricos de las mismas. Contando así con errores típicos en los cálculos entre 0.1% a 0.3 %.

2.4. Pérdidas y distorsión

Las señales que viajan en una línea de transmisión están sujetas a experimentar problemas de atenuación, distorsión y ruido. Las pérdidas en una línea de transmisión se deben principalmente a la resistencia del conductor y a los efectos del material dieléctrico. La resistencia en el conductor ocasiona pérdidas por calentamiento. Existe una dependencia de las pérdidas con la

frecuencia y se debe principalmente al cambio de impedancia en el conductor al variar la frecuencia. Este cambio es causado por la circulación de la corriente en la superficie del conductor a medida que la frecuencia aumenta. Esto es conocido como “efecto pelicular”. Los dieléctricos ocasionan pérdidas en una línea de transmisión que dependen de la frecuencia que se emplee, espesor y el tipo de material. Al aumentar la frecuencia se calienta el dieléctrico y se incrementa la pérdida por calentamiento.

Cuando una señal se propaga en una línea de transmisión su amplitud disminuye con la distancia recorrida; es decir, la señal es afectada por la atenuación. En la sección 2.3 se mencionó la constante de atenuación α la cual corresponde a la parte real del coeficiente de propagación. La atenuación de la señal varía exponencialmente a través de la longitud de la línea (ecuación 2.17) donde α es medido en Nepers/m.

$$V_x = V_0 e^{-\alpha x} \quad (2.17)$$

La unidad Neper se utiliza para expresar relaciones entre voltajes y está basado en el logaritmo natural. Otra unidad común para expresar la atenuación es el decibelio (dB) el cual está basado en el logaritmo base-10 y suele utilizarse para relaciones de potencia. Un Neper es equivalente a 8.686 dB. Generalmente las pérdidas en una línea de transmisión se expresan en decibelios por unidad de longitud y puede ser calculada utilizando la ecuación 2.18 donde V_2 es el voltaje de salida en la línea y V_1 el voltaje de entrada.

$$dB = 20 \cdot \log\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (2.18)$$

Una atenuación de 3 dB corresponde, aproximadamente, a la pérdida de la mitad de cierta potencia y 6 dB a la pérdida de la mitad de un cierto voltaje. La potencia se disipa en calor, principalmente en pérdidas por radiación y calentamiento del dieléctrico. La atenuación se hace más notoria cuanto más larga sea la línea de transmisión y es dependiente de sus propiedades eléctricas como la resistencia, la cual origina la pérdida directa de potencia, la conductancia G origina pérdida de potencia por conducción en el material dieléctrico de la línea y la capacitancia

C y la inductancia L por los efectos magnéticos. Las distorsiones en las señales, las cuales se ven reflejadas en el cambio de su forma, se presentan principalmente en la atenuación y en la variación de la velocidad de fase con la frecuencia. Estas distorsiones generalmente se intensifican con la distancia que debe recorrer la señal. Una manera de reducir la atenuación y la distorsión de la señal es aumentar la inductancia L de una manera continua a lo largo de la línea para contrarrestar la capacitancia. Los efectos de R y G también se pueden reducir a medida que el diámetro del conductor sea mayor y mejorando la calidad del aislante.

3. Detector de píxeles

3.1. Descripción general

En la región cercana a la interacción se encuentra ubicado el detector de píxeles [6], que tiene como fin reconstruir las trazas de las partículas cargadas y medir con buena resolución su momentum así como determinar su vértice de origen. El esquema general puede observarse en la figura 3.1. Consta de 3 capas en forma de cilindros y 2 tapas o discos en cada extremo. Los radios de las capas son 4.4, 7.3 y 10.2 cm y están constituidas por un total de 768 módulos de píxeles. Los módulos de los discos tienen una geometría diferente y están organizados de tal forma que la carga depositada por una partícula puede ser compartida entre varios píxeles al igual que en los cilindros.

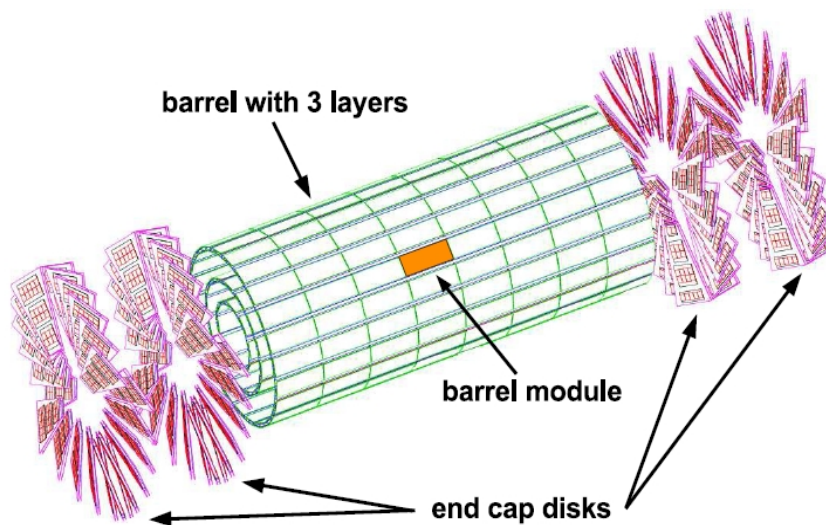


Figura 3.1. Detector de píxeles del experimento CMS [1].

3.2. Módulo de píxeles

3.2.1. Introducción

El módulo es el componente básico del detector y su estructura permite obtener una completa funcionalidad [1]. Sus dimensiones son de 66.6 mm x 26 mm, con un peso de 3.5 g y una potencia de consumo de alrededor de 2W. Los componentes principales (ver figura 3.2) son:

- Sensor: El material del sensor es silicio y está estructurado con implantes de material tipo N+ (100 μm X 150 μm), los cuales constituyen los píxeles del sensor, sobre un sustrato tipo N de espesor de 270 μm .
- ROC (*Readout Chip*): El módulo está organizado en 2 X 8 ROCs, los cuales tienen como objetivo la lectura de la carga de ionización recolectada en cada píxel. Para ello cada píxel cuenta con un circuito acoplado “*Pixel Unit Cell (PUC)*”. A la vez cada ROC conforma un grupo de 52 X 80 píxeles. Las dimensiones de un ROC son 7900 μm de ancho, 9800 μm de largo y 180 μm de grosor. Cada píxel está conectado al PUC por medio de una soldadura de Indio de tan sólo 20 μm de grosor.
- TBM (*Token Bit Manager*): Es un chip que controla la lectura de los 16 ROCs en un módulo.
- HDI (*High Density Interconnect*): Es una flexible tarjeta de circuitos, la cual distribuye las señales de control y el alto voltaje. Sirve como interfase de todas las conexiones eléctricas.
- Cable de potencia: Provee el voltaje inverso (*bias voltage* -150V) análogo (1.5V) y digital (2.5V). Para ello consta de 5 alambres de aluminio cubiertos con cobre y soldados al HDI.
- Cable de *kapton*: Por medio de éste se transmiten las señales de control al módulo y se extrae la información analógica de lectura. Consiste de 21 trazas y trabaja con señales diferenciales. Está conectado al HDI a través de alambres muy finos. El cable consiste de varias capas de material. La primera capa la componen las trazas, la cual cada una tiene un grosor de 14 μm de cobre + 1 μm de oro. Le sigue una capa de poliestireno de 75 μm de grosor. Adherida a ésta se encuentra una capa de 5 μm de cobre con el fin de suprimir ruido electrónico entre las trazas, luego una capa de pegamento de 50 μm de grosor y finalmente una capa de 25 μm de poliestireno para darle soporte mecánico, completando así un grosor total de 170 μm . El ancho total del cable de *kapton* es de 6300 μm con 21 trazas de 190 μm de ancho cada una y una separación de 110 μm entre trazas.

- *Base-stripes*: Se utilizan como soporte para el montaje del módulo sobre la estructura de enfriamiento.

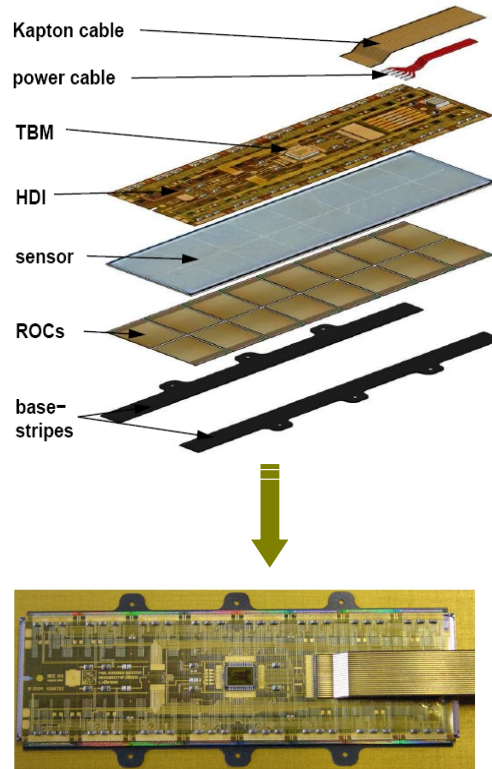


Figura 3.2. Módulo de píxeles [1].

3.2.2. El sensor

El sensor es la parte del detector de píxeles donde la carga depositada por las partículas cargadas será detectada para así ser leída por el sistema electrónico. El material escogido para el sensor fue el silicio, con el cual se construye un sensor que brinda alta resolución espacial y rápida respuesta. El silicio es un material semiconductor intrínseco, tiene cuatro electrones de valencia y estructura cristalina formando así enlaces covalentes. Dependiendo del tipo de impurezas, será material extrínseco tipo N o tipo P. Si se le hace el proceso de dopado con elementos trivalentes el material será tipo P (alta concentración de portadores de carga - huecos), en caso de elementos pentavalentes el material es tipo N (alta concentración de portadores de carga – electrones). Cuando se une un material tipo P con uno de tipo N se obtiene la unión PN

[7], la cual es la estructura básica y fundamental de diodos y transistores. En esta unión ocurre un proceso de difusión debido a la diferencia de portadores de carga de ambos materiales lo que conlleva a que los electrones libres de la parte N ocupen los huecos en la parte P. Esto tiene lugar en la región de la unión, como puede ser observado en la figura 3.3. En esa región no habrá centros de recombinación y existirá un campo eléctrico que puede acelerar cualquier carga libre que se genere en ella. La región no contiene portadores libres pero sí una densidad de carga neta que es la causante del campo eléctrico.

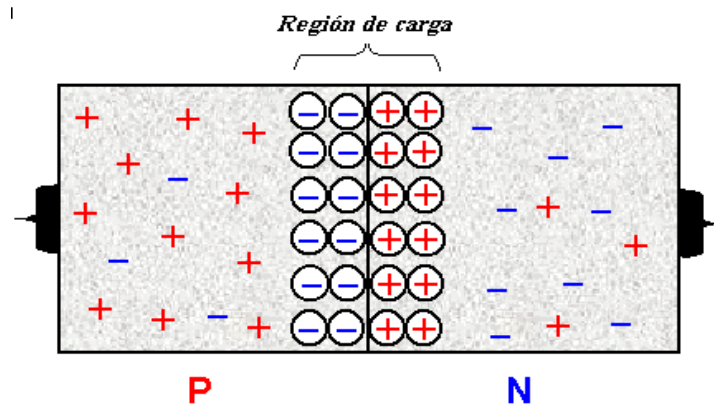


Figura 3.3. Creación de la región de carga en la unión PN de dos materiales extrínsecos [7].

El principio básico del funcionamiento del sensor se basa en la producción de pares electrón-hueco al incidir la radiación en la unión PN de dos materiales extrínsecos. La unión básicamente proporciona la propiedad de que no va a existir recombinación de los electrones liberados por la radiación incidente. Los electrones y huecos liberados serán separados por el campo eléctrico. Se requiere la ampliación de la región de carga de tal manera que estos portadores puedan ser extraídos sin haber sufrido recombinación. Es decir, queremos que la región ocupe el volumen total del píxel. Para ello se aplica un voltaje inverso “*bias voltage*”, el cual es del orden de -150 V con una polaridad que coincide con la del campo eléctrico natural de difusión. Para efectos de eficiencia, el ancho de la región de carga es primordial. Esto se consigue aplicando un diferencial de potencial inverso (polarización inversa) a la unión, logrando así que los electrones libres del material N sean disminuidos y en el material P los huecos sean ocupados por

electrones, proceso que culminará hasta que el potencial de la zona de carga iguale la diferencia de potencial aplicado. El ancho de la zona de carga será proporcional al valor del potencial inverso aplicado.

El sensor de silicio [8] (figura 3.4) esta conformado por la segmentación de material tipo n^+ , los cuales conforman los píxeles ($100\mu\text{m} \times 150\mu\text{m}$) sobre un sustrato tipo n y en la parte de atrás una capa de silicio tipo p^+ . La señal se detecta a través de los implantes n^+ ya que están unidos al ROC por una técnica de soldadura muy fina “*bump bonding*” de $20\mu\text{m}$ de diámetro. Los implantes n^+ se encuentran a un potencial cero y los implantes p^+ están a un voltaje negativo alto (*High Bias Voltage*). El aislamiento entre los píxeles se logra usando una técnica de spray tipo p (utilizando Boro).

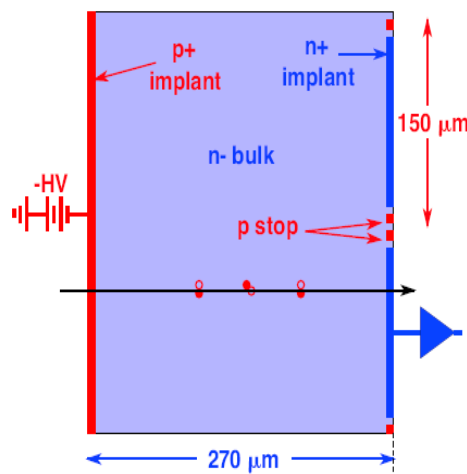


Figura 3.4. Esquema del sensor del detector de píxeles [8].

El sustrato tipo n tiene un grosor de aproximadamente $270\mu\text{m}$. Cada módulo contiene 66560 ($2 \times (8 \times (52 \times 80))$) píxeles (implantes de tipo n^+) de $150\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ cada uno.

3.2.3. Chip de lectura “ROC”

La carga producida por una partícula ionizante atravesando el sensor de silicio es recolectada por el píxel y una señal de voltaje es producida en el PUC por medio de un condensador. El ROC

tiene como función medir la cantidad de carga producida en el sensor, amplificándola, filtrándola y enviándola junto con la posición del píxel a los “*buffers*” de datos. Cada módulo está dividido en 16 ROC's (2 x 8 ROC's) y a la vez cada ROC conforma un arreglo de 4160 PUC's (uno por píxel). La versión actual del ROC es el PSI46V2 [9] y está dividido en tres principales bloques (figura 3.5), la cual conforma toda la parte electrónica del módulo para la lectura de datos con diferentes funciones: la parte sensitiva es un arreglo de píxeles organizados en columnas dobles conformadas de circuitos acoplados a PUCs “Pixel Unit Cell” en los cuales la carga recolectada inducirá una señal de voltaje la cual será amplificada y filtrada para ser enviada junto con su dirección física; el segundo bloque consiste de la periferia con las interfaces de control y “*buffers*” de datos para almacenar la información de la señal en cada doble columna junto con la dirección del píxel; y como tercer bloque, una parte conteniendo las funciones de control e interfaces complementarias para el ROC. Cada PUC está conectado al píxel por medio de una soldadura de indio de 20 μm de ancho. La zona del ROC correspondiente a los PUC's está dividida en 26 columnas dobles y 80 filas, configuración que permite la lectura de los 4160 píxeles más rápidamente ya que cada doble columna corresponde a un canal de lectura en paralelo. Cuando un píxel tiene una carga mayor al umbral (*threshold*), su información es almacenada en la memoria (FIFO *buffer*) que corresponde a la columna doble en la cual se encuentra el píxel. Este flujo de información ocurre en las columnas dobles en forma paralela. En el FIFO se almacena la información en la forma de una “altura de pulso” (*pulse height*) y también la localización del píxel, ambas en forma analógica. Para que la señal analógica de salida “*pulse height*” sea leída una señal de “*Trigger*” debe ser habilitada con el fin de recolectar la lectura. Por cada “*Trigger*” la lectura de cada módulo es inicializada por medio de un “*token*” a través del TBM y que pasa de ROC en ROC. Luego la señal es enviada por medio del cable de kapton.

3.2.4. Los parámetros DAC

El ROC, para su óptimo funcionamiento, se encuentra controlado por 26 parámetros DAC [10] y 3 registros que controlan los voltajes y corrientes en los PUC y en la periferia. Estos parámetros ayudan a optimizar el procesamiento y la lectura de la señal así como compensar las variaciones de píxel a píxel. Algunos DAC pueden fijarse individualmente para cada ROC y ser aplicados a todos los PUCs del mismo; otros pueden fijarse PUC por PUC. La tabla 3.1 presenta todos los parámetros DAC agrupados en diferentes categorías de acuerdo a su función.

Tabla 3.1. Parámetros DAC [10].

Voltage Regulators	Pixel Unit Cell			Double Column Periphery
	Analog	Trigger	Calibrate	
Vana	Vleak_comp	VIColOr	Vcal	VIbias_bus
Vdig	VwllPr	Vnpix	CalDel	Vbias_sf
Vcomp	VrgPr	VSumCol		VoffsetOp
Vsf	VwllSh			VIbiasOp
	VrgSh			VOffsetRO
	Vtrim			VIon
	VthrComp			
	VhldDel			

Control and Interface Block
Ibias_DAC
VIbias_PH
VIbias_roc

A continuación se resumen las funciones de algunos parámetros DAC. Si hay corrientes de fuga pueden ser compensadas por medio de “*Vleak-comp*”. La señal analógica va a través del preamplificador “*VwllPr* y *VrgPr*” y la filtra “*VwllSh* y *VrgSh*”. Cuando ésta ha pasado el valor umbral (*threshold*) es enviada después de algún tiempo de retraso “*VhldDel*”. El umbral fijado, para filtrar la señal, puede ser un valor global para todo el ROC “*VthrComp*” ajustado para las variaciones de píxel a píxel por “*Vtrim*” (4 bits). Para pruebas y optimización una señal de

calibración “ V_{cal} ” puede ser inyectada dentro de cada PUC y retrasada por cierto tiempo “ $CalDel$ ”; esto con el fin de simular una inyección de carga dentro del píxel y realizar los estudios necesarios para ajustar el comportamiento del ROC. Para regular voltajes análogos y digitales en el ROC, se utiliza “ V_{ana} y V_{dig} ”. Con “ V_{comp} ” se regula las amplitudes de los voltajes del comparador.

3.3. Lectura y sistema de control

3.3.1. Aspectos generales

La salida de lectura de un módulo está precedida por el envío de una señal *token* del TBM enviada en secuencia a cada ROC cuando se cree que ha ocurrido un evento interesante. A través del cable de *kapton* la lectura de la señal analógica es enviada desde el TBM al terminal del anillo del barril de píxeles “*Front End Module*” (ver figura 3.6). La señal analógica de salida es convertida a óptica por medio de unas tarjetas “*Analog Optical Hybrids*” (AOH) y luego transmitida por fibras ópticas al *Fron End Driver* (FED) [11] el cual digitaliza los datos para finalmente enviarlos al sistema de adquisición de datos.

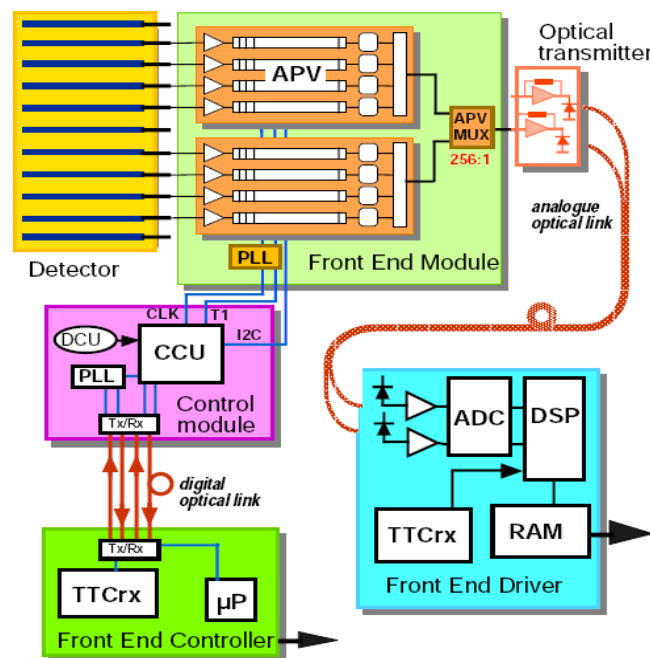


Figura 3.6. Sistema de comunicación y lectura del módulo [11].

La unidad de control del módulo maneja los parámetros de control así como las señales de reloj y *trigger*. También transmite información de temperaturas y voltajes (DCU) en forma digital al FEC (*Front End Controller*). El FEC envía la señal de reloj, las señales rápidas de control y los programas a los dispositivos correspondientes.

3.3.2. Señal analógica de salida

La forma de una lectura de un módulo se muestra en la figura 3.7 [9], en la cual se observa la superposición de todas las lecturas de las direcciones de los píxeles en un ROC.

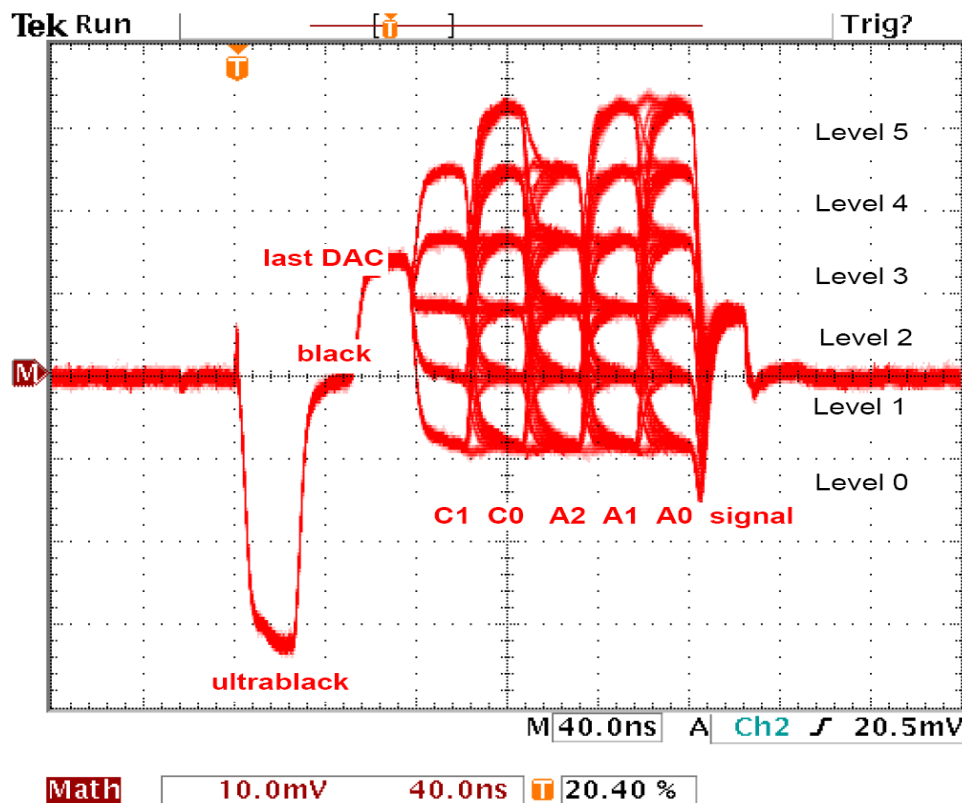


Figura 3.7. Superposición de las lecturas de todos los píxeles en un ROC [9].

Por cada evento las posiciones y el *pulse height* de las señales almacenadas en el FIFO son enviados al *Front End Module* en serie. La lectura de cada ROC comienza con una cabecera (*Header*), un “ultrablack” el cual define el nivel mínimo de la señal; luego es precedida por un

“black” (nivel cero de la señal) y un “last DAC” que despliega el valor del último DAC cambiado. La lectura de cada píxel consiste de un bloque de 6 ciclos de reloj (*C1*, *C0*, *A2*, *A1*, *A0* y *señal*) en donde se proporciona la dirección física del píxel dentro de un ROC y la señal de salida del respectivo píxel. Los dos primeros ciclos de reloj (*C1* y *C0*) localizan la doble columna en donde se produjo la señal y los tres siguientes (*A2*, *A1* y *A0*) localizan el número de la fila así como su ubicación dentro de la doble columna (izquierda o derecha) desplegando así la ubicación del píxel dentro del ROC donde se detectó señal. Cada uno de estos cinco ciclos de reloj puede tomar uno de los seis niveles (level 0,...level 5) para la dirección de un píxel. Finalmente el último ciclo de reloj corresponde al *Pulse Height* del píxel correspondiente.

4. Nueva versión del detector de píxeles

4.1. Introducción

El proyecto “*Super Large Hadron Collider*” SLHC [12] tiene como objetivo un incremento de luminosidad en un factor de 10, es decir, de $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ a $10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (figura 4.1). Esto conlleva a una reestructuración del detector de píxeles ya que debido a los daños que causará la radiación será necesario reemplazar una gran cantidad de material. Debido al incremento estadístico que se obtendrá gracias al aumento de la luminosidad, también se seguirá explorando la precisión de la física del Modelo Estándar, la física del Bosón de Higgs, Supersimetría, rompimiento de la simetría fuerte-electro-débil, extra-dimensiones, entre otros. El SLHC conlleva una actualización de los experimentos.

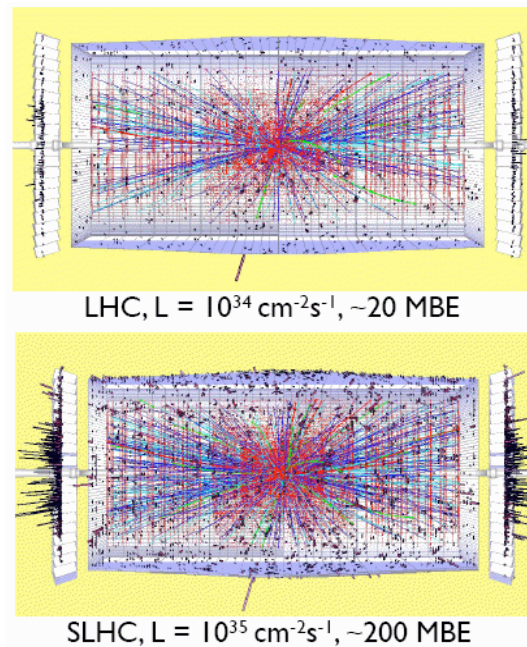


Figura 4.1. Aumento de la luminosidad en el LHC [18].

El experimento CMS tiene estimado un tiempo de 10 años de operación. Siendo el detector de píxeles el que está más próximo al punto de interacción será el más afectado por los daños de la radiación. Esto incluye en conjunto a la arquitectura del sistema de lectura electrónica así como las propiedades de colección de carga del sensor [13]. Por lo tanto se tiene planeado una optimización total del detector de píxeles así como un cambio en el sistema de lectura apto para el incremento de la luminosidad. La nueva versión comprende una primera fase la cual conlleva a doblar la luminosidad y solo reemplazar la parte del barril del detector de píxeles. Este reemplazo conduce a un factor muy importante el cual es reducir la cantidad de material de modo que la estructura del barril quede más liviana y simplificar la contribución de cableado dentro del detector para incrementar la eficiencia de reconstrucción de trazas.

4.2. Sensor del detector de píxeles

Después de 2-3 años de operación el sensor se verá afectado significativamente debido a los daños por radiación. Esta radiación desplaza a los átomos de sus lugares en la red cristalina creando niveles aceptores que hace que cambie el dopaje efectivo del material y el voltaje de la zona de carga del sensor. Será necesario aumentar el voltaje de polarización inverso lo cual reduce el ángulo de Lorentz, el cual es el ángulo que forma la dirección del campo eléctrico con la dirección del movimiento de los electrones al ser liberados en el sensor. Al reducir el ángulo de Lorentz también disminuirá la carga compartida entre píxeles. Esto termina afectando la resolución de las medidas de las trazas. El tipo de sensor actual es un sustrato de silicio tipo N con implantes tipo N⁺ (píxeles) y en la parte posterior está dopado con tipo P. El sustrato es silicio crecido con la técnica tipo FZ (Float Zone), la cual provee alta resistividad (4.5 K Ω .cm), con una concentración de átomos de oxígeno ($1.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) difundidos a alta temperatura, convirtiéndose así el material resultante en DOFZ (Diffusion Oxygenated Float Zone). Los átomos de oxígeno mejoran significativamente la resistencia al efecto del aumento del voltaje de agotamiento beneficiando de esta forma al sensor. Para la nueva versión se quiere buscar la mejor tecnología para el sensor y el objetivo es mantener el mismo prototipo de píxeles N⁺ y sustrato oxigenado. Los estudios y pruebas referentes al sensor incluyen:

- Determinar los límites del actual sensor en términos de eficiencia de detección y pérdida de carga.
- Estudiar la posible modificación de la separación entre los píxeles para ampliarla 10 μ m

con el fin de disminuir la capacitancia entre los píxeles y reducir el ruido.

- Caracterizar intrínsecamente sustratos de silicio oxigenados tipo MCz (Magnetic Czochralski) los cuales son sustratos crecidos mediante una técnica “*Czochralski*” usando campos magnéticos para incrementar la resistividad. Esto tiene la ventaja de que la concentración de oxígeno es mayor ($4.6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$).

4.3. Nuevo protocolo de lectura

El límite de eficiencia de recolección de datos conlleva a una pérdida del 4% debido a la saturación de la cantidad de datos. Referente al sistema de lectura analógica, que se está manejando ahora y que continuará hasta la fecha del SLHC, se están realizando algunas pruebas para pasar a lectura digital [14]. Es decir, se utilizará un nuevo protocolo digital el cual será implementado directamente dentro del ROC de forma que la salida de la señal tendrá la correspondiente conversión digital. Para ello se utilizará un conversor analógico digital de 8 bits dentro de cada ROC. Además la transmisión de datos pasará de 40 MHz (caso analógico) a 160 MHz del ROC al TBM y a 320 MHz del TBM al FED (caso binario) como muestra la figura 4.2. Justamente con esta conversión se obtendrá una mayor rapidez de lectura de datos apta para el aumento de la luminosidad ya que se tendrá más estadística y eventos.

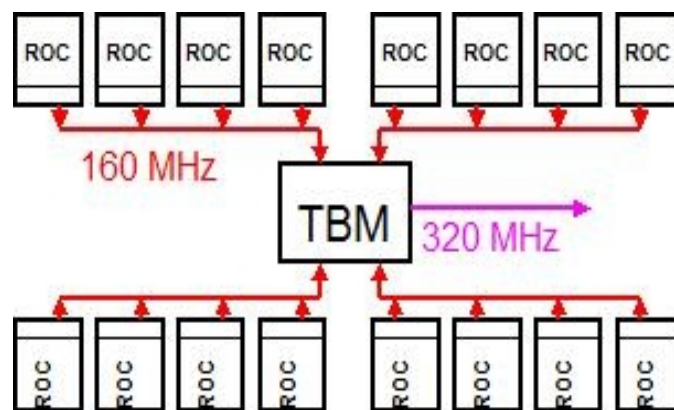


Figura 4.2. Frecuencia de transmisión de datos [18].

4.4. Reducción de material

La cantidad de material existente como cables, estructuras de soporte y de enfriamiento en el sistema de barriles del detector de píxeles dificultará la eficiencia en la reconstrucción de trazas debido a la dispersión que sufren las partículas al pasar por el material. Por consiguiente se hace necesario reducir y aislar la mayor cantidad de material cerca del punto de interacción. En la figura 4.3 se relaciona la cantidad de material en función de la longitud de radiación. En el eje vertical se representa la longitud de radiación del material específico y en el eje horizontal la *pseudo-rapidity* η la cual es una coordenada espacial relacionada con el ángulo de la partícula (θ) relativo a la radiación de los haces del LHC (figura 4.4). Se puede observar que los cables tienen una gran exposición a la interacción de las partículas. Así, para la nueva versión se sustituirán los cables de *kapton* por microcables de par trenzado los cuales son más livianos, flexibles y económicos. Además sin tener problemas de limitación de longitud es posible mover 1.0 a 2.0 m las tarjetas AOH y DOH para alejarlas de la región cercana de interacción así como reducir los daños que pueden causarles la radiación. También se eliminarán tarjetas de conexión, reduciendo así una gran cantidad de material. Con relación al módulo, se eliminarán las bases y el grosor del ROC será disminuido de 175 a 75 μm consiguiendo así una reducción de masa de 2.20g a 1.36g por cada módulo.

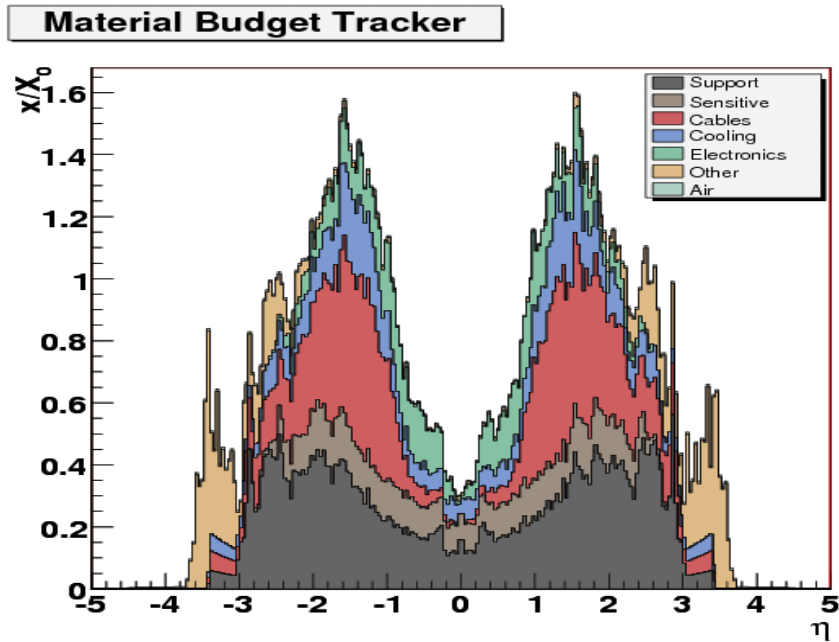


Figura 4.3. Contribución de material existente en el sistema del tracker [18].

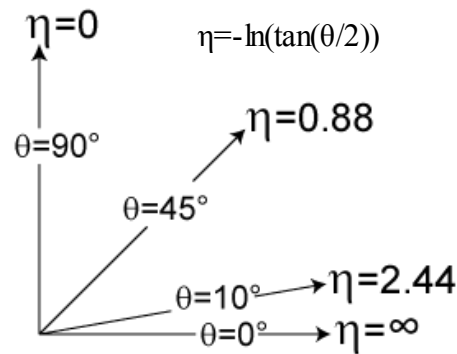


Figura 4.4. Relación entre la coordenada *pseudo-rapidity* y el ángulo de incidencia de las partículas.

La sección transversal del microcable de par trenzado propuesto es mostrado en la figura 4.5. El cable consiste de dos alambres de aluminio cubiertos por una capa de cobre de grosor de $4\ \mu\text{m}$ y separados por una distancia de $145\ \mu\text{m}$; además tiene una capa de poliesterimida de $9.5\ \mu\text{m}$ y de poliamida de $4.5\ \mu\text{m}$, es decir, cada línea de cable tiene un diámetro de $153\ \mu\text{m}$. Las dos líneas del cable son trenzadas con vueltas de separación de $1\ \text{cm}$. Para unirlos el proceso que se emplea consiste en aplicar calor y así parte del aislante se funde para permitir la unión de las dos líneas del microcable de par trenzado. El microcable fue elaborado por la compañía alemana Elektrisola. Es un cable muy flexible y liviano gracias a que su mayor parte se compone de aluminio y poco cobre.

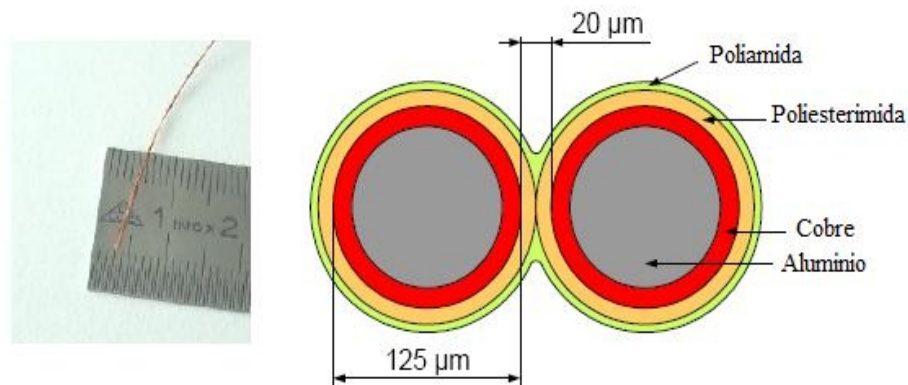


Figura 4.5. Sección transversal del microcable de par trenzado propuesto para el reemplazo del cable de *kapton* [14].

El cable de *kapton* actual cuenta con 21 trazas de las cuales 5 corresponden a tierra. Para la cantidad del número de micro-cables de par trenzado se tiene planificado dos opciones: 1) mantener el mismo número de trazas del cable de kapton para los microcables de par trenzado, conservando el sistema de lectura analógico ó 2): utilizando sistema de lectura digital usar la misma cantidad de trazas con microcables de par trenzado. Como estudios para una segunda fase del SLHC se planifica utilizar uno o dos micro-cables de par trenzado para un esquema digital unidireccional o bidireccional como muestra la figura 4.6.

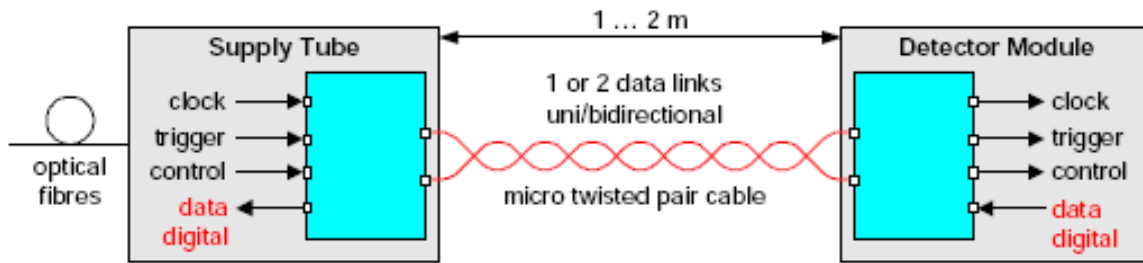


Figura 4.6. Esquema digital uni/bidireccional para el uso de los microcables de par trenzado [14].

5. Estación y pruebas de operación del módulo

5.1. Introducción

En las tres capas que conforman el barril del detector de píxeles hay distribuidos 768 módulos. Antes de montarlos es necesario asegurarse que no presentan problemas de lectura o de calibración, ya que un módulo defectuoso montado en el barril provocará pérdidas de información valiosa para cumplir el objetivo con el que fue construido el detector. Por tal razón, actualmente existen unas pruebas para verificar todas las clases de operación de funcionamiento del módulo desde los píxeles hasta el ROC. Estas pruebas fueron desarrolladas en el Instituto Paul Scherrer (PSI) en Suiza donde se probaron una producción de aproximadamente 1000 módulos.

5.1.1. Requerimientos de hardware

La estación para la realización de las pruebas del módulo de píxeles consta de lo siguiente:

- Un ordenador con sistema operativo Scientific Linux 4.
- Una tarjeta de pruebas (figura 5.1) especialmente construida para las pruebas de los módulos. Esta provee al módulo tanto los voltajes necesarios como las señales eléctricas (*trigger*, *clock*). Además tiene incorporada una FPGA (*Field Programmable Gate Array*). Para la lectura de la señal analógica utiliza un conversor análogo-digital de 12 bits (ADC) cada uno.
- Un adaptador para el módulo, el cual es una tarjeta pequeña que sirve de conexión entre el módulo de píxeles y la tarjeta de pruebas.
- Una caja refrigerada para realizar las pruebas necesarias a una temperatura de -10 C, ya que a esta temperatura estarán los módulos en el LHC.
- Una fuente de alto voltaje (0...800V), necesaria para aplicar el voltaje inverso a los sensores.

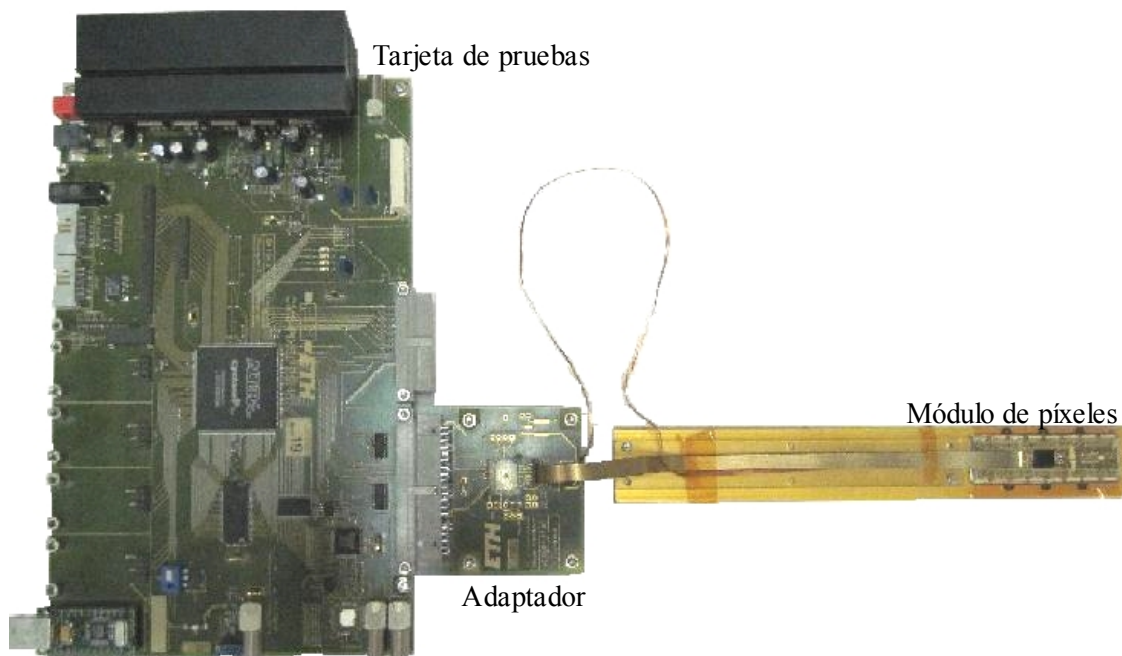


Figura 5.1. Conexión de un módulo de píxeles para las pruebas de operación.

5.1.2. Requerimientos de software

Los algoritmos que conforman las pruebas del módulo están organizados en tres diferentes grupos: funcionalidad, rendimiento y calibración. Se han implementado en el lenguaje de programación C++ y conforman un paquete de software llamado “PSI46expert”. Este paquete requiere de Scientific Linux 4 para ser ejecutado. Para el almacenamiento, acceso y análisis de los datos se utiliza ROOT [15] una herramienta desarrollada en CERN específicamente para las necesidades de los experimentos de física de altas energías. Así la organización y el análisis de los datos pueden ser manejados en una forma ordenada y visualizados por medio de histogramas, gráficas en diferentes dimensiones, utilizando ajuste de funciones, entre otros.

5.2. Pruebas de funcionalidad del módulo de píxeles

Esta parte incluye pruebas de validación de la lectura del TBM, verificación de la programación del ROC así como la lectura y la correcta identificación de la dirección física de

cada píxel.

5.2.1. Prueba de *address levels*

La correcta identificación de la dirección de los píxeles permitirá recolectar la información proveniente del píxel que la envía [16]. La dirección (posición física) de un píxel está conformada por 5 ciclos de reloj de 25 ns cada uno (2 para la columna y 3 para la fila) y cada ciclo puede tomar 6 niveles diferentes (nivel 0, 1,...5). Estos niveles son medidos para todos los píxeles de cada ROC y desplegados en un histograma para cada nivel como muestra la figura 5.2. Las seis distribuciones conforman lo que se denomina *address levels*. La correcta decodificación de las direcciones de los píxeles se podrá establecer si estos niveles están bien separados uno del otro.

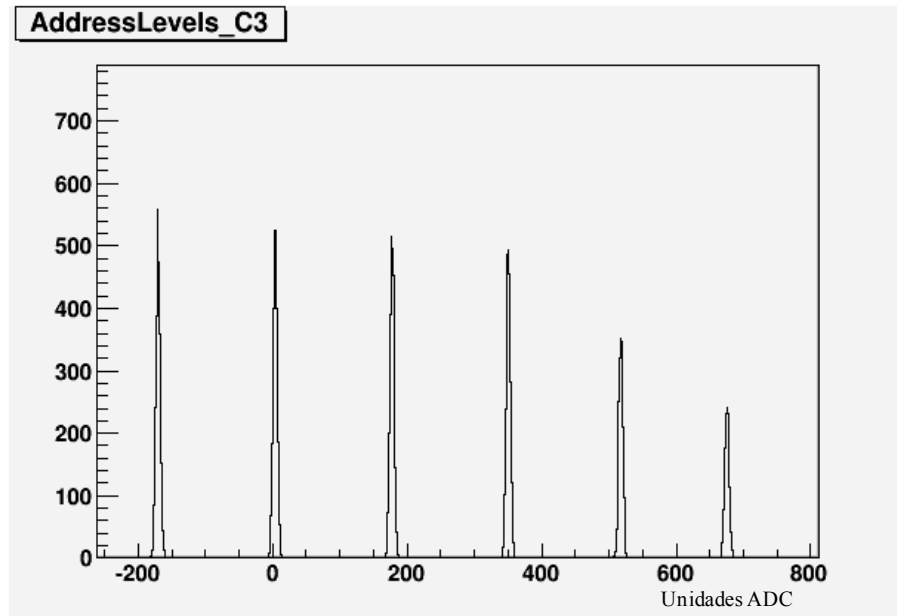


Figura 5.2. *Address Levels* de todos los píxeles en un ROC.

5.2.2. Prueba de lectura de píxeles

Esta prueba [16] consiste en verificar la eficiencia de la lectura de los píxeles a través de la generación de 10 señales de prueba (Vcal 200). Si los píxeles responden se consideran píxeles vivos; en caso contrario será un píxel muerto. La figura 5.3 muestra la salida de esta prueba para

un ROC. Se pueden observar todos los píxeles en el ROC distribuidos en un arreglo de 80 x 52 píxeles. En este caso el color rojo quiere decir que el píxel respondió en 100% a la lectura de las 10 señales. Casi la totalidad son píxeles vivos. Los 2 píxeles que se encuentran en la esquinas inferiores (color blanco) no respondieron al envío de las señales; es decir son píxeles muertos.

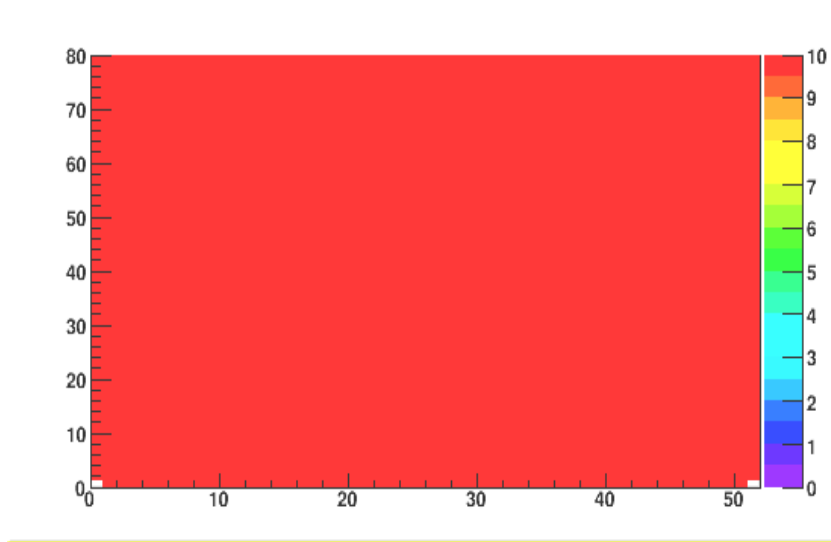


Figura 5.3. Prueba de lectura de píxeles para un ROC con 2 píxeles muertos.

5.2.3. Prueba *Vthreshold-CalDel*

Todos los ROCs trabajan dentro de una región específica del rango de *VthrComp* y *CalDel* [16]. Por medio de esta prueba, se toma un píxel y se envían 5 señales de calibración por cada par de valores (*VthrComp*, *CalDel*) a un *Vcal* fijo de 200 en unidades DAC. El área de lectura válida se muestra en la figura 5.4 para un ROC. La prueba determina el punto óptimo fijo para el par (*VthrComp*, *CalDel*). Este valor es extraído utilizando el siguiente procedimiento: (1) se toma el valor mínimo de *VthrComp* del área válida, (2) se le suman 50 unidades y (3) se busca el 50% del ancho del rango de *CalDel* con ese valor de *VthrComp*. De esta manera se encuentra el punto óptimo y se fija este par de valores para todo el ROC.

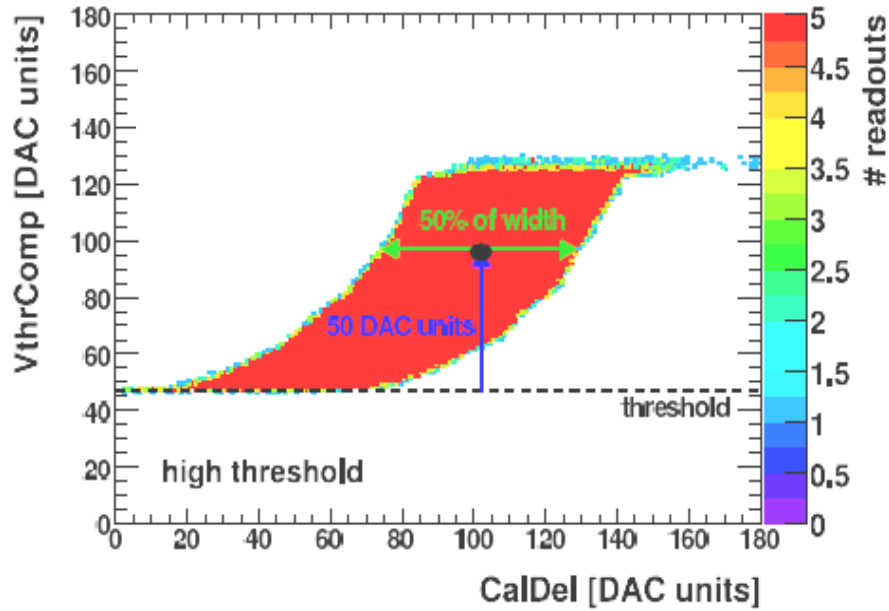


Figura 5.4. Región de lectura en el plano $VthrComp$ - $CalDel$ [16].

5.3. Pruebas de rendimiento

Una de las más importantes pruebas de rendimiento es la prueba de medida de ruido en los píxeles.

5.3.1. Pruebas de la señal de ruido en los píxeles

El ruido en la señal de calibración para cada píxel es medido con el fin de identificar píxeles ruidosos los cuales pueden saturar el sistema de lectura con una alta tasa de eventos falsos y provocar pérdidas de datos. Para esta medida se utiliza $Vcal$ (voltaje de calibración) para determinar la respuesta de eficiencia de cada píxel. Si el ruido tiene una distribución gaussiana, la curva en S (figura 5.5) tendrá la forma de la función error (forma de la integral de una gaussiana) y su ancho es una medida del ruido [17]. Para un píxel ideal, sin ningún ruido, la gráfica sería una función escalón desde eficiencia cero hasta eficiencia igual a uno.

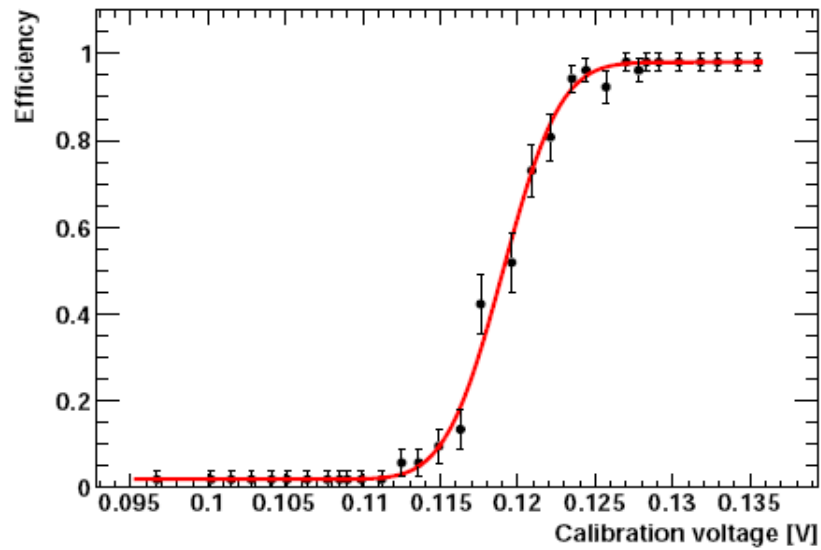


Figura 5.5. Curva en S para determinar el ruido en un píxel [10].

La relación entre el voltaje de calibración V_{cal} y la carga depositada fue determinada en trabajos previos [17], los cuales arrojaron un resultado promedio de 65 electrones para una unidad de DAC V_{cal} . De esta manera se puede expresar el ruido de un píxel en unidades de carga (número de electrones). Para ello se extrae de la curva en S el ancho y la posición del punto que corresponde al 50% (escala horizontal). Este último corresponderá al umbral que se fija por medio del parámetro DAC $V_{threComp}$. El ancho es convertido a unidades de DAC V_{cal} ($1V_{cal}=1.20mV$) y luego convertido a número de electrones ($1 \text{ DAC } V_{cal}=65e^-$). El ruido de cada píxel puede ser determinado con una precisión de 13 e^- con este procedimiento.

5.4. Pruebas de calibración

La calibración tiene como objetivo convertir a unidades físicas (electrones) la lectura analógica del Pulse Height para su interpretación física.

5.4.1. Calibración de *pulse height*

La señal de salida analógica, *pulse height PH*, contiene la información de la carga recolectada en un píxel. Se requiere conocer la equivalencia de una unidad analógica a una unidad física. Por

medio del parámetro *Vcal DAC* es posible conocer el comportamiento del *pulse height* ante una variación de la carga depositada. Esta calibración [17] se realiza utilizando 10 valores fijos diferentes de *Vcal DAC*: 50, 100, 150, 200 y 250 para el rango de *Vcal* bajo y 210, 350, 490 ,630 y 1400 para el rango de *Vcal* alto. La figura 5.6 muestra una típica curva de calibración de la respuesta del *pulse height* ante la variación del parámetro *Vcal DAC* con el correspondiente ajuste de una función tangente hiperbólica. Para valores de *Vcal* muy bajos no se detecta señal, dependiendo del valor que se fija en el comparador para filtrar señales, y a partir de 100 hasta *Vcal* 150 se observa un comportamiento lineal y a partir de un cierto valor comienza a saturarse la señal. Esta saturación no presenta problema para la lectura de la señal ya que pocos eventos caen en este rango.

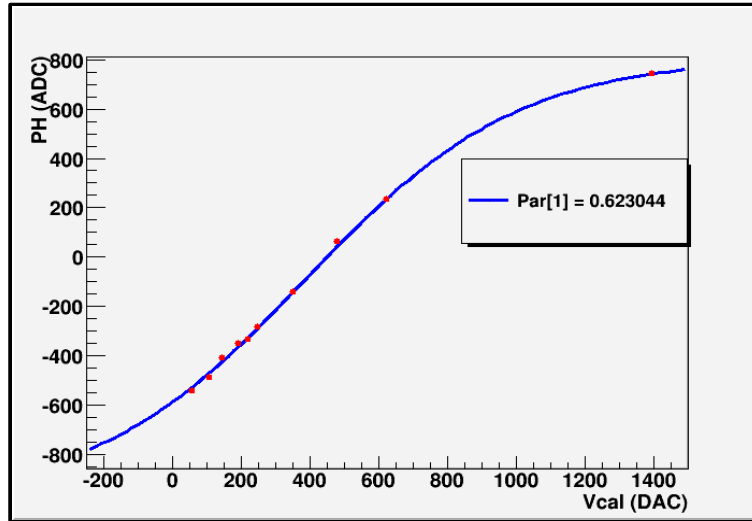


Figura 5.6. *Pulse height* en función de la señal de calibración *Vcal*.

La función correspondiente al ajuste de la relación entre *pulse height* y *Vcal* está descrita en la ecuación 5.1. El parámetro P_1 describe la parte lineal de la función, este valor está comprendido entre 0 y 1. Un valor de 1 describirá una perfecta linealidad.

$$y = P_3 + P_2 \tanh(P_0 x - P_1) \quad (5.1)$$

Para cada módulo esta calibración se realiza píxel por píxel. Habiendo determinado los

parámetros de ajuste se puede invertir la función para calcular el valor de V_{cal} que corresponde a un valor medido de *pulse height*. Para la equivalencia en unidades de carga (e^-) se requiere de una calibración del parámetro V_{cal} DAC. Esta calibración fue realizada primeramente en un *Test Beam* en PSI (Suiza) con piones de energía de 300MeV con lo cual se verificó la dependencia lineal de la señal de calibración V_{cal} con la inyección de carga. Esto arrojó un resultado de $65 e^- /DAC$ con un RMS de $5.5 e^- /DAC$ para un módulo. Una segunda calibración con una muestra de 69 módulos fue realizada utilizando una fuente variable de rayos X, Americio 241 , la cual contenía diferentes materiales como blanco, entre ellos Mo, Ag y Ba los cuales producen entre 4800 a 9000 pares electrón-hueco en el silicio. Se extrae el valor medio de la distribución de V_{cal} de todos los píxeles en un ROC. De esta forma, se grafica el número de pares electrón hueco, correspondiente a cada material de la fuente de rayos X, en función del valor medio de V_{cal} , obteniéndose una relación lineal cuya pendiente proporciona la equivalencia del número de electrones por unidad de V_{cal} DAC. El valor medio obtenido fue de $66 e^- /DAC$ con un RMS de $5 e^- /DAC$ correspondiente a la distribución de todos los ROCs de los 96 módulos.

6. Procedimientos

6.1. Cálculo de la impedancia del microcable usando ATLC

Para la simulación es primordial conocer las dimensiones de la sección transversal del microcable de par trenzado, las cuales fueron descritas en la sección 4.4. Primero se requiere hacer el dibujo de la sección transversal en un programa gráfico. Para esto se escogió el editor de imagen GIM. Un esquema de la sección transversal es expuesto en la figura 6.1. Aquí se tomó la escala de 1 píxel = 1 μm . Para este caso los colores representan los siguientes datos:

- Verde: Potencial cero (tierra)
- Rojo: Conductor (cobre + aluminio) a potencial positivo (+1V)
- Azul: Conductor a potencial negativo (-1V)
- Amarillo: Representa el material dieléctrico Poliesterimida con $\epsilon = 2.5$
- Marrón: Representa el material dieléctrico Poliamida con $\epsilon = 3.6$

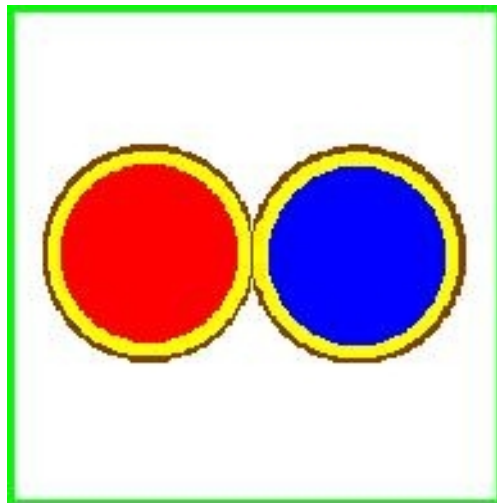


Figura 6.1. Sección transversal de microcable de par trenzado.

En este dibujo la separación entre los centros de los conductores es de 145 μm . Una vez se cuenta con el esquema se ejecuta el programa ATLC con el nombre del archivo desde un terminal. El programa toma un tiempo en desplegar los resultados, entre los cuales se encuentran la impedancia en modo impar y diferencial. Esta última es la de mayor interés ya que las señales enviadas por el microcable serán en forma diferencial y por lo tanto es la impedancia característica del microcable. El tiempo de ejecución del programa dependerá del número de píxeles (resolución) que se use, tardando desde 3 minutos (400 x 400 píxeles) hasta 3 horas (2500 x 2500 píxeles). Se comienza con un número pequeño de píxeles y se aumenta ese número. Para resoluciones bajas los resultados cambian. Este es un efecto artificial de la simulación. Aumentamos la resolución hasta que se consiguen resultados estables. Usando la resolución mínima necesaria para la estabilidad de los resultados, estudiamos la impedancia como función de la distancia entre los conductores.

6.2. Medidas de las propiedades eléctricas del microcable de par trenzado

La caracterización del microcable de par trenzado conlleva medir sus propiedades eléctricas. Las características más importantes que se requiere conocer son la impedancia y el tiempo de retraso de una señal ya que, a partir de ellas, puede determinarse otras propiedades eléctricas. La impedancia fue determinada mediante una simulación en ATLC. Para medir el tiempo de retraso de una señal de pulso propagándose a través del microcable se configuró un montaje experimental (figura 6.2). Se envía un pulso diferencial a través de la tarjeta de pruebas de una amplitud de $66.8 \pm 0.3 \text{ mV}$ y ancho de 25 ns por el microcable de par trenzado de 2.0 m de longitud. En el otro extremo del microcable se fija una resistencia de terminación en la terminal de cada línea. Se mide la amplitud diferencial del pulso tanto en el inicio como en la terminación del microcable por medio de un osciloscopio, usando sondas diferenciales. El desfase (eje horizontal del osciloscopio) entre los dos pulsos proporcionará el tiempo de retraso y por consiguiente también se conocerá la velocidad de propagación del pulso.

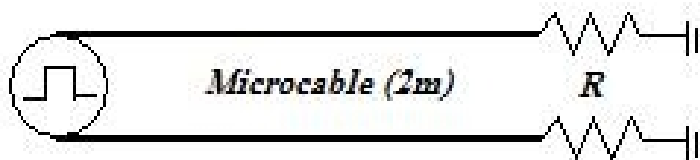


Figura 6.2. Configuración experimental para determinar las propiedades eléctricas del microcable de par trenzado.

Habiendo medido la velocidad de la señal, se pueden calcular otras propiedades eléctricas del microcable de par trenzado como la inductancia y la capacitancia por unidad de longitud usando las ecuaciones 2.1 y 2.15 del capítulo 2.

6.3. Montaje experimental

Una vez conocidas las propiedades eléctricas del microcable de par trenzado se procede a verificar su optimización mediante las pruebas de operación que se realizan al módulo de píxeles. La configuración experimental para las pruebas del módulo consiste en la conexión del módulo de píxeles a la tarjeta de pruebas. Ésta se conecta al ordenador por medio de un cable USB y se conecta a una fuente de alto voltaje (-150V) para la realización de algunas pruebas. Para llevar a cabo las pruebas de operación del módulo de píxeles se adaptaron los microcables de par trenzado a la conexión estándar del módulo. Para ello se requirió de unas tarjetas de circuito impreso (PCB) especiales para la conexión entre el cable de kapton y los microcables; una para la conexión con la tarjeta de pruebas y otra para la conexión con el cable de kapton del módulo. La figura 6.3 muestra la configuración final del montaje.

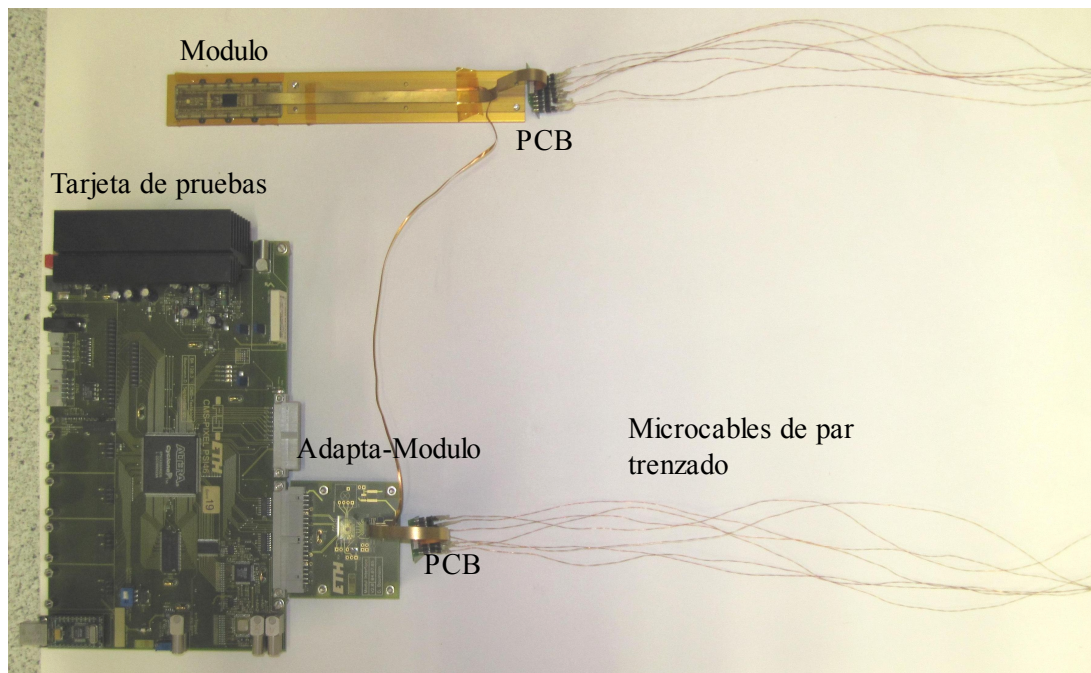


Figura 6.3. Configuración experimental de la conexión del módulo por medio de microcables de par trenzado.

La tarjeta de pruebas es conectada a un ordenador el cual tiene instalado el paquete de software “PSI46EXPERT” que contiene todos los programas necesarios para realizar las pruebas de operación del módulo de píxeles. Las pruebas fueron realizadas con diferentes longitudes de microcables de par trenzado. Se emplearon microcables de 1.0, 1.5 y 2.0 metros. En la figura 6.4 se presenta un diagrama detallado de las líneas que componen el cable de *kapton*. Consta de 21 líneas o trazas de las cuales seis (6) corresponden a tierra.

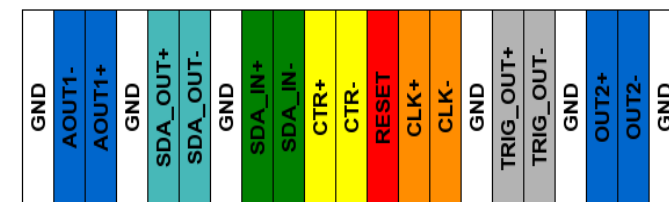


Figura 6.4. Diagrama del cable de *kapton*.

Los pares de trazas que se utilizan para el envío de señales diferenciales de control son

SDA_IN $\pm$, CTR $\pm$ y CLK $\pm$. Para la lectura de la señal analógica las trazas correspondientes son AOUT1 $\pm$, AOUT2 $\pm$ y SDA_OUT $\pm$. La amplitud de las señales de control enviadas por cada línea de un microcable es de 100mV y -100mV con una señal diferencial de 200mV. Las PCBs usadas en el montaje experimental tienen una posible conexión de 8 microcables. Tres son usadas para el envío de las señales de control, tres para la lectura de las señales y una para el *reset* y tierra (figura 6.5). Las trazas correspondientes al TRI_OUT $\pm$ no son necesarias ya que para las pruebas del módulo no se requieren. Para la adaptación de impedancias se colocaron las resistencias de terminación en los respectivos puntos en la parte de atrás de las PCBs; tres resistencias de terminación en la PCB que conecta al módulo correspondientes a las trazas por las cuales se envían las señales de control al módulo y tres resistencias en la PCB que conecta a la tarjeta de pruebas para las trazas por las cuales se reciben las señales de salida del módulo.

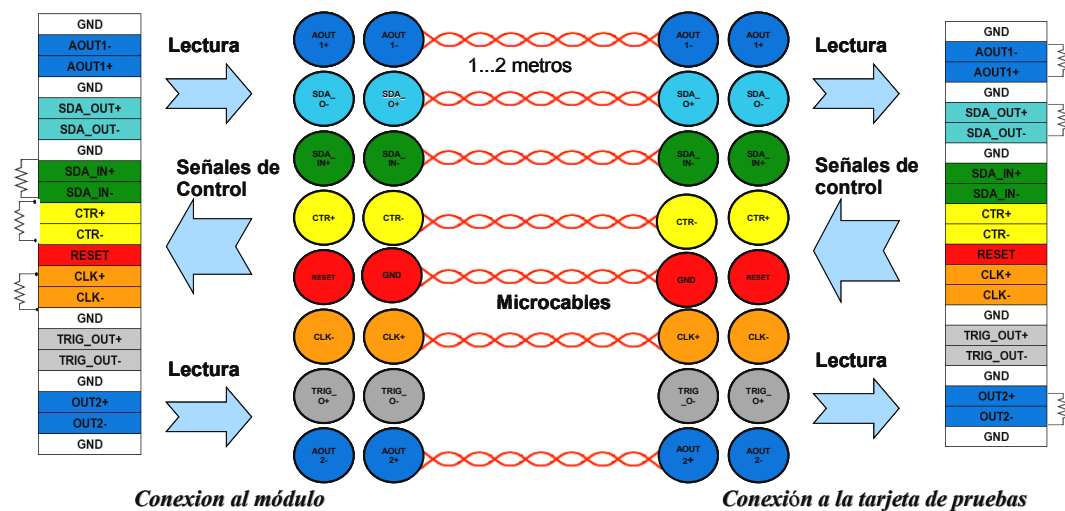


Figura 6.5. Conexión de las resistencias de terminación en las PCBs.

6.4. Lectura de los *address levels* del módulo de píxeles

La figura 6.6 muestra la interfaz gráfica del software PSI46EXPERT con el cual se realizan las diferentes pruebas al módulo de píxeles entre las que se encuentra la prueba de la lectura de los *address levels* de los píxeles en un ROC. Los seis niveles que identifican las direcciones de todos los píxeles en un ROC deben estar bien separados. Esta prueba es fundamental ya que una separación satisfactoria es necesaria para la lectura correcta de los datos. Para evaluar la calidad

de la separación, calculamos una razón de calidad dividiendo el valor promedio del RMS de los niveles entre la distancia de separación entre ellos. Entre más pequeña sea esa razón mejor será la calidad de las distribuciones de los niveles. Se realizó el siguiente procedimiento:

- Se utilizaron tres diferentes longitudes (1.0, 1.5 y 2.0 metros).
- Se probaron diferentes resistencias de terminación para cada conjunto de líneas de datos para las diferentes longitudes.
- Se realizó la prueba de *address levels* con las diferentes resistencias de terminación y diferentes longitudes.
- Para cada medida se obtuvo la razón de calidad.
- Para cada longitud la terminación óptima es la que brinda la razón mínima.

6.5. Atenuación de señales a través de los microcables de par trenzado

a) Atenuación de la separación promedio entre los *address levels* para un ROC: Dado que la señal de los *address levels* es leída a través de los microcables igual que el *pulse height*, se espera que sufra el mismo grado de atenuación. Para calcular esta atenuación, se determina la separación promedio de los *address levels* obtenidos sin microcables y con microcables de diferente longitud. Luego se relaciona esta separación en función de la longitud en una gráfica. La constante de atenuación se determina haciendo un ajuste a la gráfica resultante.

b) Atenuación de *pulse height*: Otro estudio que se realiza está relacionado con la atenuación del valor de *pulse height* con la longitud. El valor de *pulse height* es extraído a partir de una optimización del mismo, la cual consiste en adicionar un tiempo de retraso, en intervalos de 1 ns (0..24 ns), entre el *clock* del módulo y el *clock* del ADC (Conversor Analógico Digital) de la tarjeta de pruebas. Para cada intervalo el valor de *pulse height* es leído y se establece el tiempo óptimo de retraso para el cual el valor máximo es obtenido. Esta optimización (estándar) se realiza para un píxel de un ROC y el tiempo de retraso es fijado dentro de uno de los archivos de configuración (Parámetros TB - CLOCK) del módulo de píxeles. La prueba de optimización es realizada con las diferentes longitudes de microcables y de allí se toma los correspondientes valores óptimos de *pulse height*.

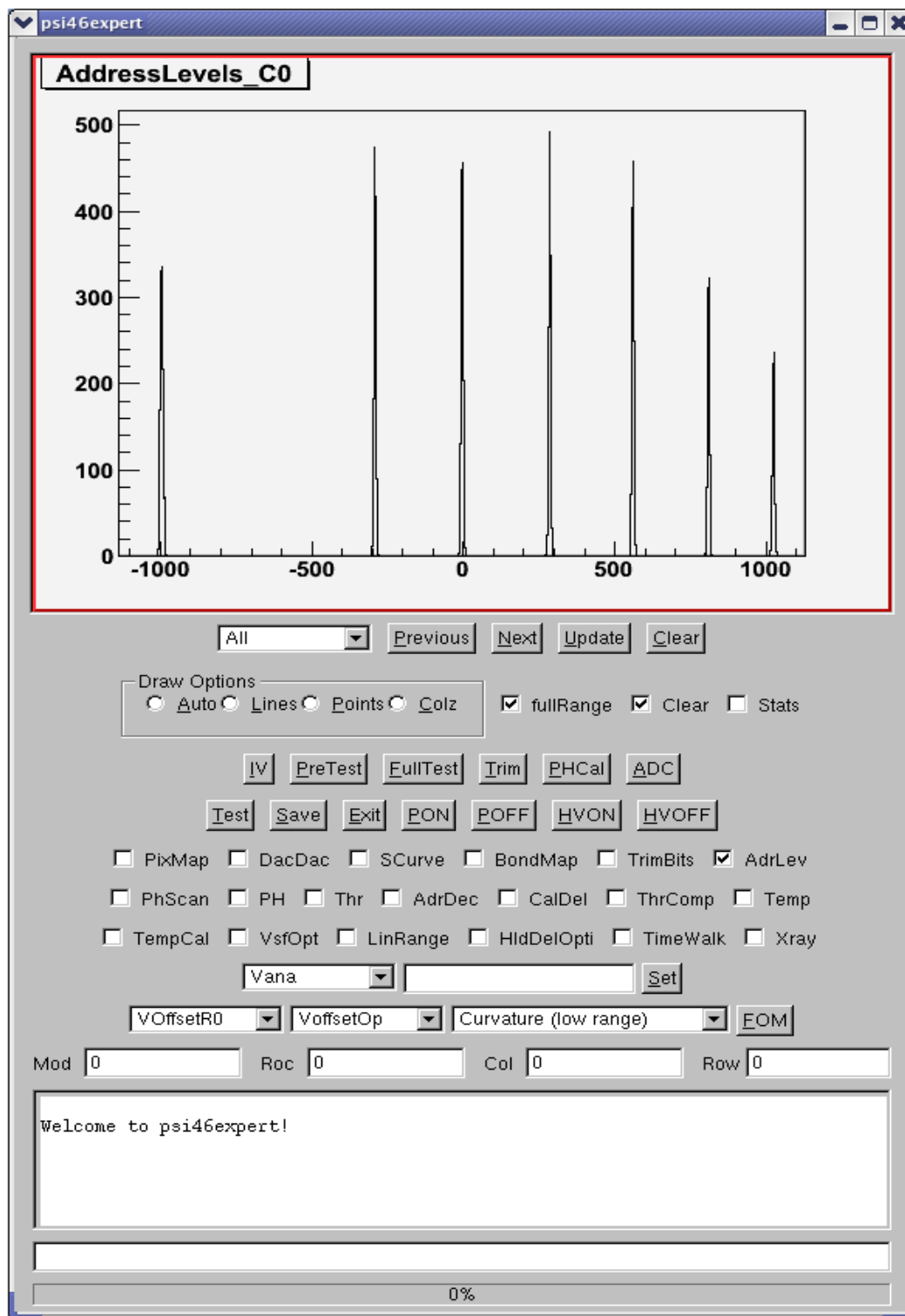


Figura 6.6. Interfaz gráfica del software PSI46EXPERT para la realización de las pruebas a los módulos de píxeles.

6.6. Pruebas de operación del módulo usando microcables de par trenzado.

Una vez se cuenta con las adecuadas resistencias de terminación en ambos extremos de la conexión de los microcables de par trenzado y con las cuales se haya obtenido óptimas distribuciones de los *address levels*, se procede a realizar las pruebas de funcionalidad y rendimiento. Estas pruebas se realizan a través de la interfaz gráfica (figura 6.6). El procedimiento que ejecutan los respectivos programas se resumen a continuación para las correspondientes pruebas:

a) Prueba de lectura de píxeles: Esta prueba tiene como objetivo comprobar, mediante el envío y la lectura de señales, la funcionalidad de todos los píxeles de cada ROC. Usando el procedimiento de depositar carga en cada píxel por medio de V_{cal} se envían diez (10) señales a todos los píxeles. Luego éstas son leídas y representadas mediante un mapa. En este mapa se representa, mediante un color determinado, el número de lecturas por cada píxel para todos los píxeles en cada ROC. El mapa está conformado por un arreglo de 80 x 52 casillas. Cada casilla representa un píxel dentro del ROC.

b) Prueba $V_{threshold}$ -CalDel: El procedimiento para realizar esta prueba consiste en seleccionar un píxel de un ROC y se envían 5 señales de calibración (V_{cal} fijo de 200) por cada par de valores ($V_{thrComp}$, $CalDel$). Se determina la respuesta del píxel a esas 5 señales. En la sección 5.2.3 se explica en detalle la manera para determinar los valores óptimos de $V_{threshold}$ y $CALDEL$.

c) Prueba de ruido en los píxeles: Esta es una de las pruebas que más toma tiempo (alrededor de 30 minutos) ya que para cada píxel se construye la curva en S (figura 4.5 del capítulo 4). Mediante un programa, realizado en ROOT, se extrae el valor de sigma de cada curva en S . El valor del parámetro sigma en estas curvas es una medida del ruido en un píxel y se expresa en unidades de electrones. Luego para cada ROC se construye la distribución del ruido en todos los píxeles.

7. Resultados y análisis

7.1. Impedancia del microcable de par trenzado

El primer paso es determinar un valor apropiado para el número de píxeles a usarse en la simulación (figura 7.1). Para esta prueba se usó el caso de las líneas en contacto, es decir, con una distancia de separación entre los centros de $153\text{ }\mu\text{m}$. Con esta separación se realizó la simulación cambiando la resolución desde 300×300 píxeles hasta 2800×2800 píxeles. Los resultados se muestran en la figura 7.2. Encontramos que una resolución de 2000×2000 es suficiente para lograr una buena aproximación ya sea con una forma cuadrada o redonda para la línea de referencia.

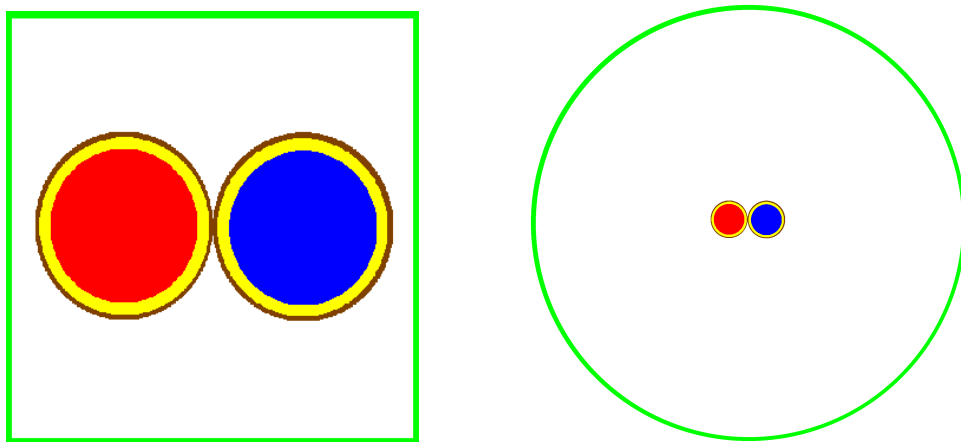


Figura 7.1. Resolución de 350×350 píxeles (cuadrado) y 1800×1800 (redondo).

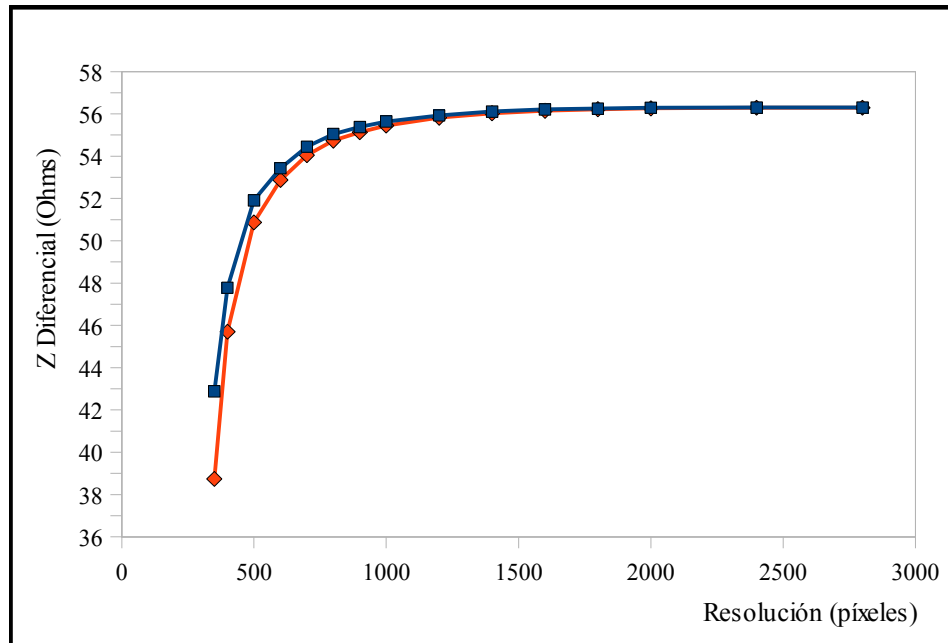


Figura 7.2. Variación del resultado de la simulación en función de la resolución. La traza roja es para una línea de referencia circular y la azul es para una cuadrada.

El valor obtenido por el programa para la impedancia diferencial es de 56Ω para una distancia de separación de $153 \mu\text{m}$ entre los conductores. Ahora dejando fija la resolución en 2000×2000 píxeles, se varió la distancia de separación de los conductores para observar el comportamiento del valor de la impedancia. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 7.3 para seis (6) diferentes valores. Se observa un comportamiento lineal, aumentando la impedancia con la separación de los conductores. Para la separación de $145 \mu\text{m}$, que corresponde a la separación real entre los conductores, los resultados que arrojó el programa ATLC son:

- Impedancia en modo impar $Z_{\text{imp}} = 24 \Omega$
- Impedancia en modo diferencial $Z_{\text{dif}} = 48 \Omega$

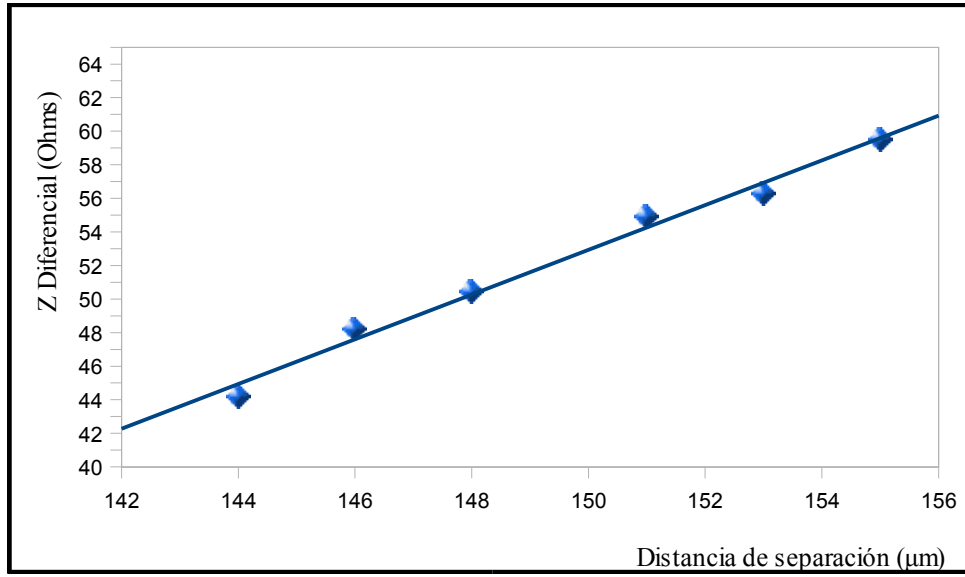


Figura 7.3. Variación de la impedancia diferencial en función de la separación de los conductores del microcable de par trenzado.

El valor de la pendiente de la relación lineal es de $1.3 \Omega/\mu\text{m}$. Esta variación del valor de la impedancia con la distancia de separación puede ser justificada en función de los parámetros de capacitancia C e Inductancia L de una línea de transmisión. A mayor separación disminuye C y aumenta L dado que la inducción es proporcional al flujo establecido entre los conductores y éste aumenta al separar las líneas, así que finalmente la impedancia aumentaría.

7.2. Propiedades eléctricas del microcable de par trenzado

En la figura 7.4 se muestra un ejemplo de una medida tomada con un osciloscopio, adaptando una resistencia de terminación en cada línea del microcable de acuerdo al montaje experimental de la figura 6.2. La traza azul clara (1) representa la señal diferencial medida al comienzo del microcable; la traza azul oscura (2) corresponde a la señal diferencial medida en la terminación del microcable (la cual es la suma de la señal incidente y la reflejada). Las otras señales de menor amplitud (3 y 4) son las reflexiones de las señales correspondientes.

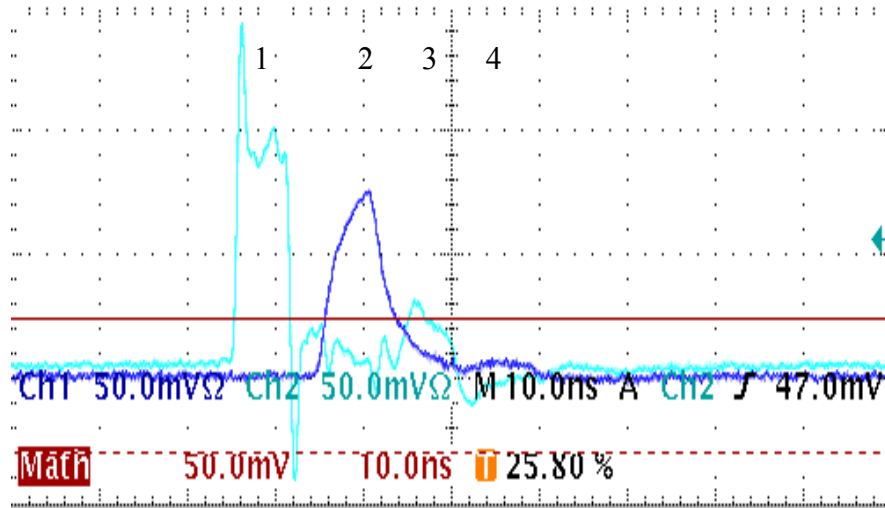


Figura 7.4. Lectura de la señal diferencial de entrada y salida medida en el microcable usando una resistencia de terminación en cada línea.

El pulso diferencial que se envió desde la tarjeta de pruebas es de 66.8 ± 0.3 mV. La tabla 7.2 resume los resultados de las propiedades eléctricas medidas y calculadas para el microcable de par trenzado de 2.0 m de longitud.

Tabla 7.1. Resultados de las propiedades eléctricas del microcable de par trenzado.

Tiempo de retraso (ns)	11.0 ± 0.4
Velocidad de propagación de la señal (m/s)	$1.81 \pm 0.06 \times 10^8$
Inductancia (nH/m)	267
Capacitancia (pF/m)	115

El tiempo de retraso para 2.0m de longitud, fue determinado tomando la señal en la entrada y en la terminación del cable. El factor de velocidad es de 0.6 el cual se encuentra entre el rango típico de los factores de velocidad en las líneas de transmisión (0.6....0.9). Los valores de la inductancia y capacitancia por unidad de longitud fueron determinados mediante las ecuaciones 2.1 y 2.15 (capítulo 2) usando el valor de la impedancia diferencial calculado en la simulación.

7.3. Prueba de los *address levels*

Esta prueba se realiza mediante la interfaz *psi46expert* (figura 6.6) y las distribuciones de los *address levels* son guardados en un archivo ROOT. La prueba se realizó con las tres longitudes de microcables y se probaron diferentes resistencias de terminación para las longitudes usadas. Resultados similares a los de la figura 7.5 fueron obtenidos antes de la optimización de las resistencias de terminación para una longitud de 2.0 m. La tabla 7.2 muestra los resultados de la razón de calidad para diferentes longitudes de microcable y diferentes resistencias de terminación. También muestra los resultados para el caso de no usar microcables. Para la razón de calidad se usó el promedio del RMS de los 6 niveles así como la separación promedio entre ellos.

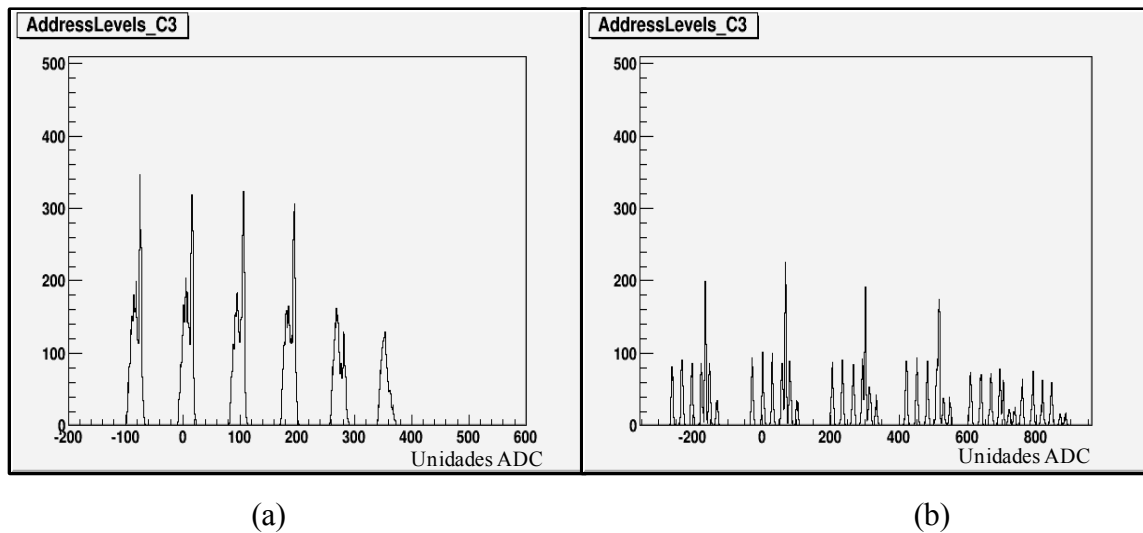


Figura 7.5. *Address Levels* preliminares con resistencias de terminación no óptimas.

Es de resaltar que se encontró para cada longitud una diferente resistencia de terminación óptima. Así para los cables de 1.0 m de longitud la resistencia óptima de terminación es de 240Ω , para 1.5 m de 180Ω y para 2.0 m de longitud 110Ω . Se notó que variando las resistencias en la parte que conecta a la tarjeta de pruebas las distribuciones no variaban significativamente, razón por la cual se dejaron tres resistencias fijas de 180Ω en la PCB que conecta al módulo, las cuales corresponden a los microcables por los que se envían las señales digitales de control al modulo. Las variaciones de resistencia de terminación se hicieron en la PCB que conecta a la tarjeta de pruebas, es decir, en las terminaciones de los tres microcables que traen la lectura analógica desde el módulo. Los niveles de los *address levels* se encuentran en unidades ADC debido al

conversor analógico digital que tiene incorporado la tarjeta de pruebas para la posible lectura.

Tabla 7.2: Resultados de la razón de calidad para diferentes longitudes de microcables y resistencias de terminación.

Longitud (m)	R_{term} (Ω)	RMS (ADC)	Separación (ADC)	Razón de Calidad
0.0	***	3.0	168.8	0.018
1.0	110	5.0	95.2	0.053
1.0	160	4.9	96.8	0.050
1.0	180	4.2	98.4	0.043
1.0	220	4.0	104.5	0.038
1.0	240	2.2	118.4	0.019
1.0	270	3.3	125.0	0.026
1.0	300	3.6	130.0	0.028
1.5	110	11.4	75.6	0.151
1.5	160	5.0	88.6	0.056
1.5	180	3.2	93.2	0.034
1.5	200	4.8	96.9	0.050
1.5	240	8.6	99.7	0.086
2.0	91	6.1	66.0	0.092
2.0	110	4.0	75.4	0.052
2.0	130	7.5	85.4	0.088
2.0	160	13.4	96.8	0.138
2.0	180	15.7	99.9	0.157

En la figura 7.6 se exponen los *address levels* de un ROC sin usar microcables y usando microcables con diferente longitud con la correspondientes resistencias de terminación óptimas. Puede observarse la clara separación entre los niveles, los cuales cuentan con distribuciones bien definidas.

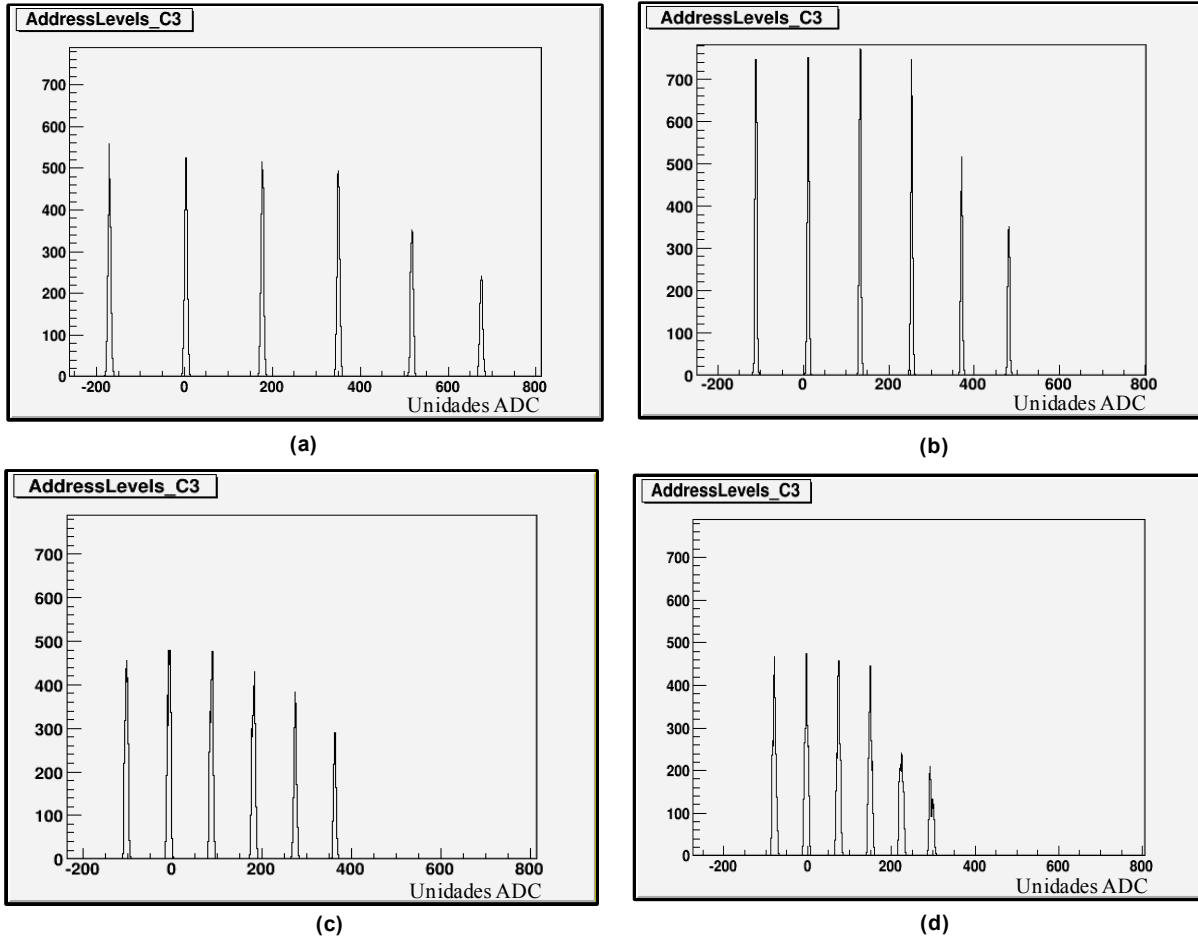


Figura 7.6. *Address levels* de los píxeles para un ROC. a) conexión sin microcables. b) microcables de 1.0 m c) microcables de 1.5m d) microcables de 2.0 m.

Una representación gráfica de los resultados de la tabla 7.2 son mostrados en la figura 7.7. Allí se observa un comportamiento de la razón de calidad con cada resistencia de terminación para las diferentes longitudes de microcables. Se encontró un valor mínimo de la razón de calidad de los *address levels* con diferentes resistencias de terminación para cada longitud. Con aquellas resistencias óptimas los niveles están muy bien separados y las distribuciones presentan un pico definido.

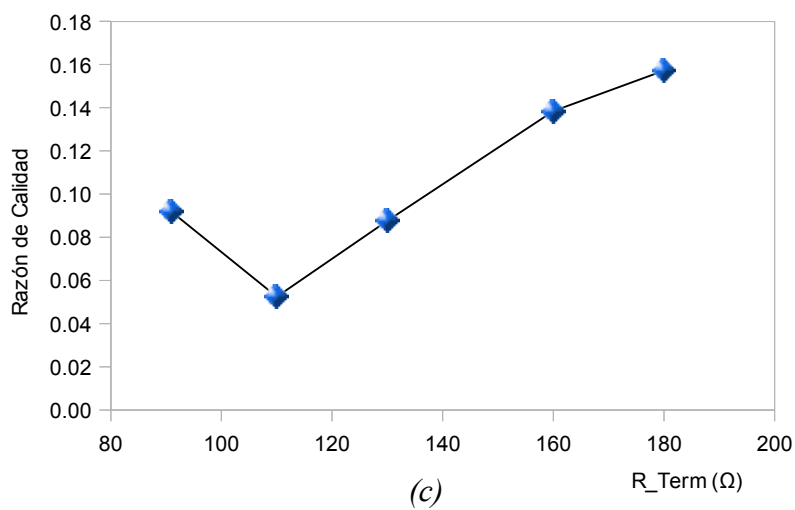
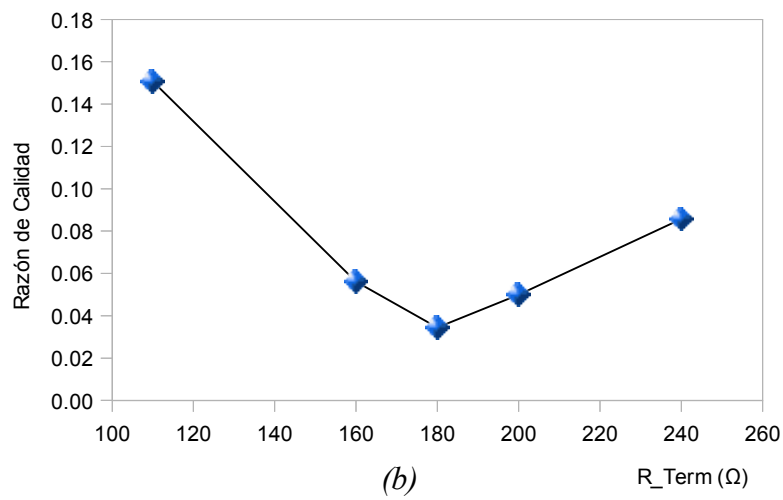
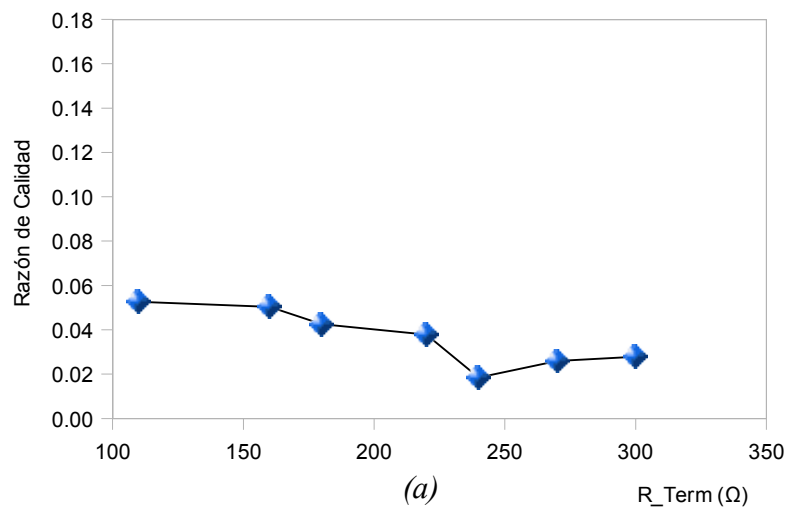


Figura 7.7. Razón de calidad de los *address levels* en función de la resistencia de terminación para cada longitud. a) microcables de 1.0 m b) microcables de 1.5 m y c) microcables de 2.0m de longitud

7.4. Atenuación de señales a través de los microcables

a) **Atenuación de la separación promedio entre los *address levels* para un ROC:** De la tabla 7.2 se puede extraer la relación que existe entre la separación promedio entre los *address levels*, obtenidos con las resistencias de terminación óptimas, con la longitud correspondiente de los microcables de par trenzado. Esta relación se expone en la figura 7.8. El primer punto en la gráfica corresponde a los datos obtenidos sin usar microcables. Se observa claramente la atenuación que experimentan la separación promedio entre los niveles con la longitud. Su representación se ajusta a una función exponencial decreciente. Relacionando la ecuación de ajuste de la gráfica con la ecuación 2.17 (capítulo 2) se tiene que la constante de atenuación es de 0.38 ± 0.02 neper/m.

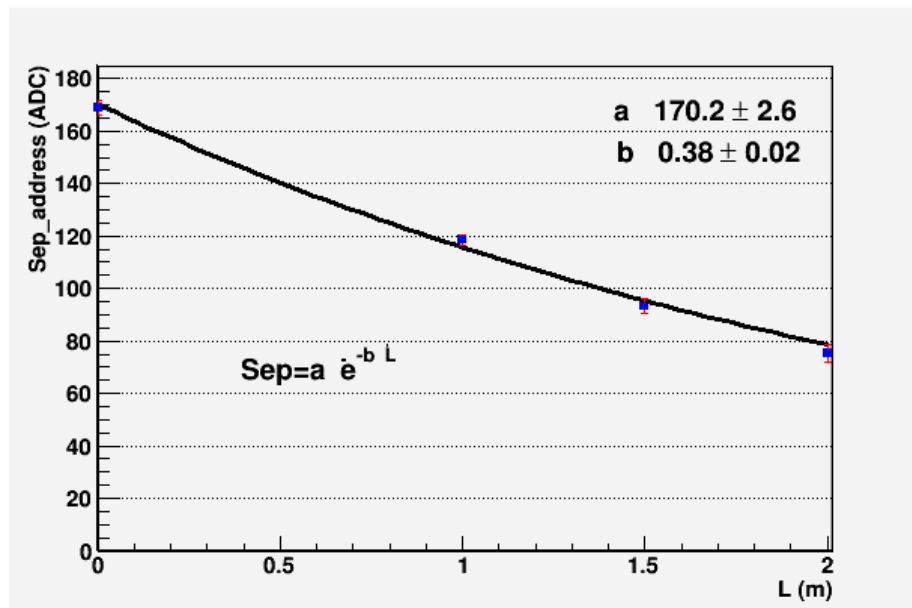


Figura 7.8. Separación promedio entre los *address levels* en función de la longitud.

b) **Atenuación de *pulse height*:** La figura 7.9 muestra los valores de *pulse height* en función del rango del parámetro CLOCK para cada longitud de microcables. Se extrae el valor máximo de *pulse height* para cada longitud y luego se representa estos datos en una gráfica. Estos resultados son expuestos en la figura 7.10. Un ajuste con una función exponencial decreciente

devuelve un valor para la constante de atenuación de 0.32 ± 0.05 Neper/m. Se tomó una muestra de 30 píxeles. Este resultado es consistente con los resultados obtenidos usando la separación entre los niveles para medir la atenuación.

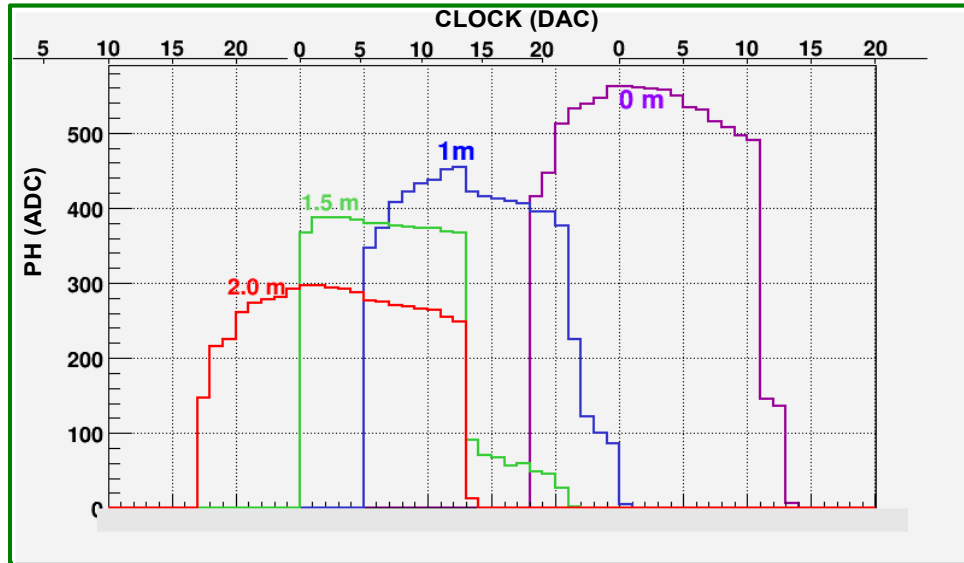


Figura 7.9. Optimización del valor de *pulse height* para cada longitud de microcables.

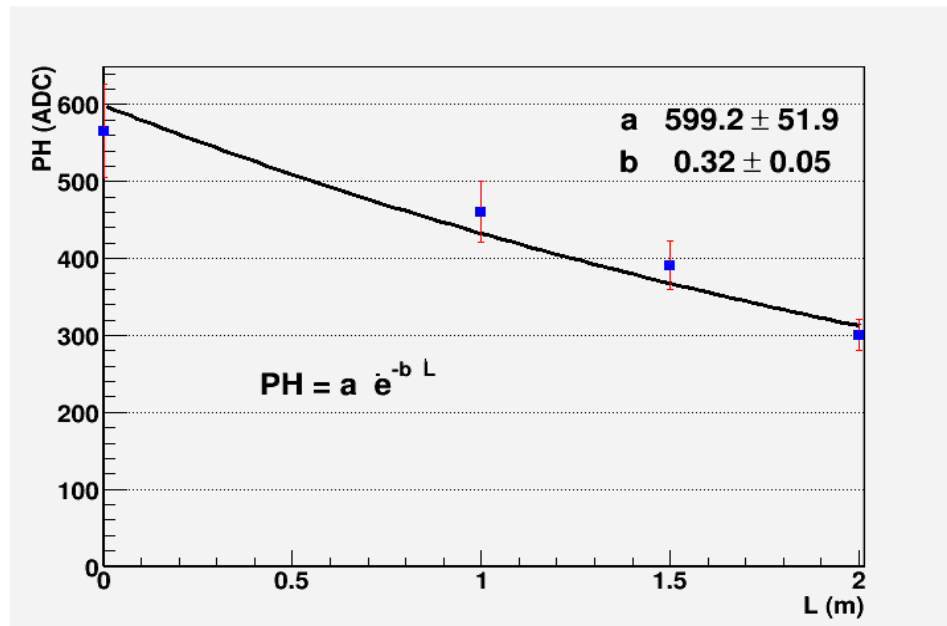


Figura 7.10. Valor de *pulse height* con diferentes longitudes de microcables de par trenzado.

7.5. Pruebas de Operación

a) Prueba de lectura de píxeles: El mapa para un ROC es mostrado en la figura 7.11 para cada longitud de microcable de par trenzado. La escala de colores en la parte derecha de cada mapa identifica el número de entradas en el mapa; el color rojo corresponde al número diez, el cual está representado en todo el mapa y demuestra que se leyeron las 10 señales en cada píxel para todo el ROC.

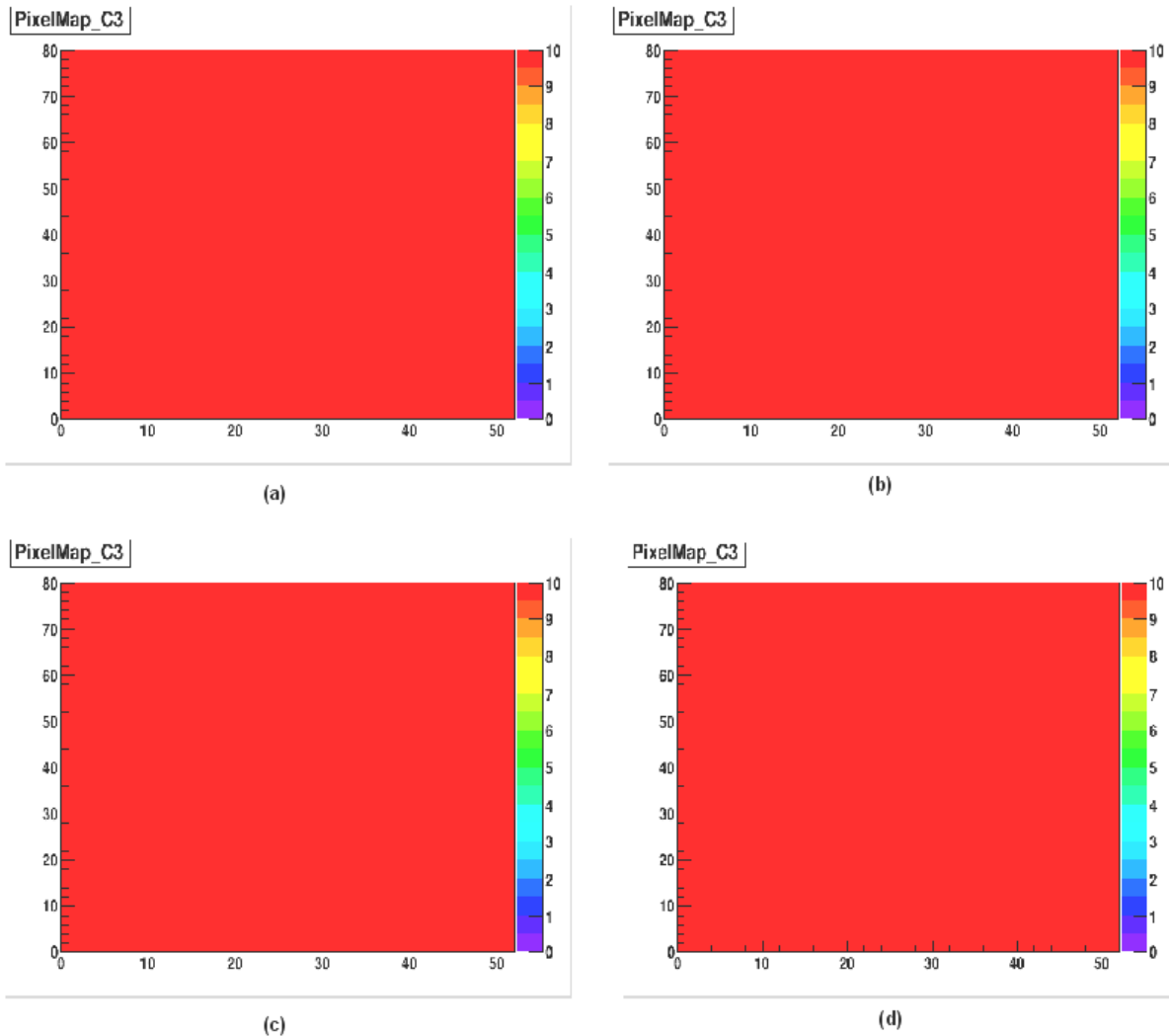


Figura 7.11. Prueba de lectura de los píxeles en un ROC. a) Prueba sin microcables b) microcables de 1.0 m c) microcables de 1.5 m d) microcables de 2.0 m.

Los resultados de esta prueba de lectura demuestran que es posible tanto la programación como la lectura de todos los píxeles dentro de un ROC, usando los microcables de par trenzado de diferentes longitudes.

b) Prueba Vthreshold-CalDel : El resultado de esta prueba se presenta en la figura 7.12 para el módulo sin usar microcables y usando diferentes longitudes de microcables de par trenzado. Se observa que el uso de estos cables no altera el rango de lectura de estos datos donde la coordenada del punto óptimo corresponde a *CalDel* 91, *VthrComp* 100 para la prueba sin microcables. El punto óptimo usando microcables de 1.0 m de longitud es *CalDel* 91, *VthrComp* 93; para microcables de 1.5m es *CalDel* 92, *VthrComp* 98 y finalmente para microcables de 2.0 m es *CalDel* 89, *VthrComp* 93.

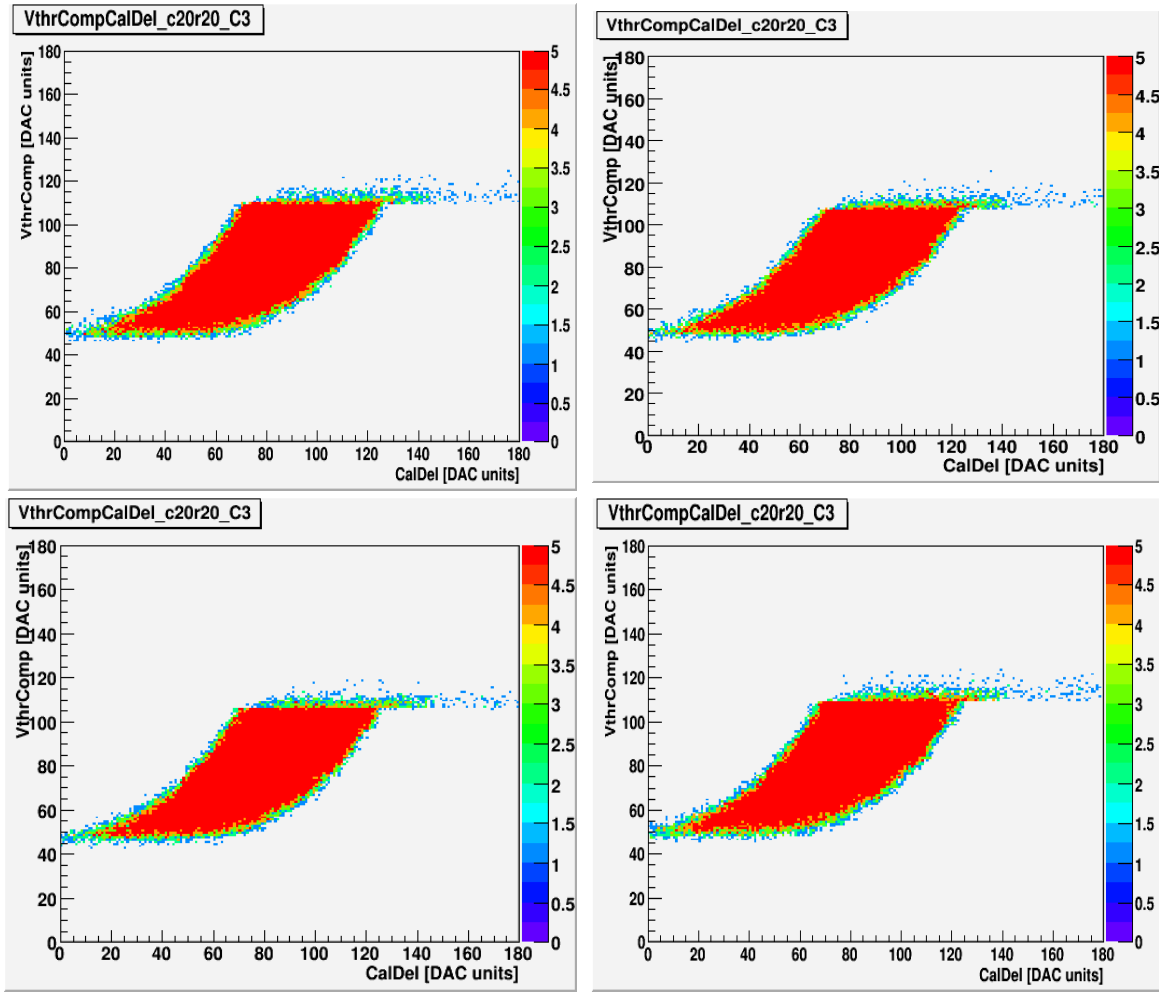


Figura 7.12. Mapa de *Vthreshold-CalDel* en un ROC. a) Prueba sin microcables b) microcables de 1.0 m c) microcables de 1.5 m d) microcables de 2.0 m.

c) Prueba de ruido en los píxeles: Para cada ROC se construyó la distribución del valor del ruido de todos los píxeles, obteniéndose una distribución gaussiana tal como muestra la figura 7.14. Allí se muestra la distribución para un ROC para la prueba sin microcables y con los microcables de diferente longitud. Los valores medios de los histogramas son iguales dentro de la incertidumbre. Con estos resultados se establece que los cables no introducen ruido apreciable al sistema.

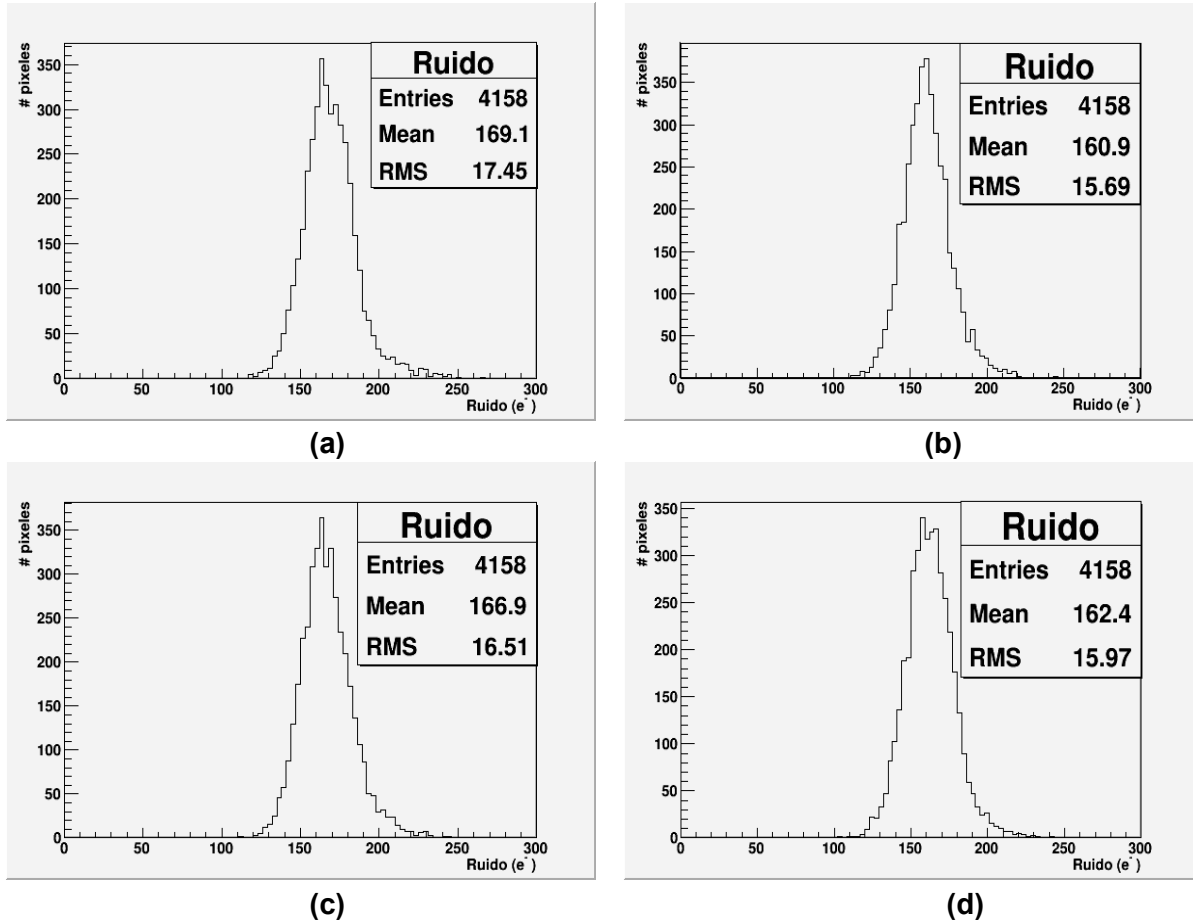


Figura 7.13. Distribución del valor de sigma de cada curva en S de todos los píxeles en un ROC.
a) Prueba sin microcables b) microcables de 1.0 m c) microcables de 1.5 m d) microcables de 2.0 m.

8. Conclusiones y trabajos futuros

En este trabajo se obtuvieron las propiedades eléctricas del microcable de par trenzado, mediante simulaciones y medidas experimentales tomando como referencia la teoría de líneas de transmisión. A través de la simulación realizada con el software ATLC, se determinó la impedancia diferencial del microcable obteniéndose un valor de $48\ \Omega$. Así mismo se determinó la variación de la impedancia en función de la separación entre las dos líneas que conforma el microcable. La relación fue lineal con una pendiente de $1.3\ \Omega/\mu\text{m}$. A partir de la medida del tiempo de retraso de un pulso viajando por un microcable de 2.0 m de longitud, el cual fue de $11.0 \pm 0.4\ \text{ns}$, se calculó una velocidad de propagación de $0.6c$. Finalmente los valores de inductancia y capacitancia por unidad de longitud fueron obtenidos a partir del valor de la impedancia diferencial y la velocidad de propagación.

Con la prueba de lectura de los *address levels*, mediante la razón de calidad de los mismos, se determinó las resistencias óptimas de terminación para cada longitud de microcables. Se encontraron diferentes valores de resistencias de terminación para cada longitud, las cuales no corresponden al valor de la impedancia diferencial del microcable, debido a la configuración del experimento para el posible empalme de los microcables. Los microcables no están conectados directamente al TBM del módulo ya que todavía cuenta con el cable de *kapton* y por ello se requirió unir los microcables al cable de *kapton* por medio de tarjetas de circuito impreso tanto en la parte que conecta al módulo como en la conexión a la tarjeta de pruebas. Allí se deben tener en cuenta las impedancias adicionales que se agregan al circuito de comunicación y al no encontrarse una apropiada simulación en un programa de circuitos (SIMetrix) que permitiera simular las condiciones reales que se tenían, fue necesario realizar la adaptación mediante la variación de resistencias de terminación.

Mediante la realización de las pruebas de operación del módulo de píxeles, se comprobó la

validez de reemplazar el actual cable de *kapton* por microcables de par trenzado para el existente sistema de lectura analógica a 40MHz. Los resultados de la prueba de lectura de píxeles y la prueba Vthr-CalDel permitieron verificar que es posible enviar y leer señales de todos los píxeles de cada ROC. Finalmente, se observó que los microcables no introducen ruido adicional a las señales. Las longitudes usadas no afectaron los resultados de las pruebas.

Estudios relacionados con la atenuación de las señales a través de los microcables fueron realizados. A partir de la prueba de optimización del *pulse height* se determinó la atenuación del valor de *pulse height* para cada longitud. Otro resultado fue obtenido con la prueba de los *address levels*, en la cual se tomó la separación promedio entre ellos y se calculó la atenuación de estas separaciones en función de la longitud de los microcables usados. La atenuación es cercana al 50% para una longitud de 2.0 m. El sistema es capaz de trabajar con tal nivel de atenuación. Estas dos pruebas arrojaron resultados consistentes.

Los microcables de par trenzado permitirán desplazar y ubicar las fibras ópticas lejos de la región de interacción de las partículas. Con la eliminación de los cables *kapton*, el anillo de conexiones será eliminado ya que se conectarán los microcables directamente a las tarjetas AOH y por consiguiente la reducción de material será apreciable en el detector. La reducción de material en el barril de píxeles dependerá del número de microcables que se utilice. Por ejemplo, para una primera fase de la posible actualización del detector se realizará el cambio de lectura analógica a digital utilizando el mismo número de líneas y para una segunda fase se utilizara un sistema digital uni/bidireccional lo cual requeriría solo usar uno o dos microcables.

La implementación de los microcables requerirá trabajos adicionales. En primer lugar, se debe diseñar el soporte mecánico para los cables para mantenerlos juntos. Deberán ser soldados directamente al TBM de los módulos y diseñar las tarjetas apropiadas para su conexión con las tarjetas AOH en caso que se mantenga la lectura analógica o usar tarjetas DOH (*Digital Optical Hybrid*) para lectura digital. La correcta adaptación de impedancias se realizará directamente en el TBM y en las tarjetas de enlace. Otros estudios que se necesitan hacer son medidas a altas frecuencias de transmisión de datos, medidas de “*crosstalk*” y pruebas con diferentes protocolos de datos, entre otros.

Bibliografía

- [1] Höerman, C. 2006. Design and performance of the Silicon Pixel Detector Modules for the CMS Experiment. Tesis Doctoral, Universidad de Zürich, Zürich, 149 pp.
- [2] The CMS Collaboration, CMS Tracker Technical Design Report LHCC 98-6, CERN, Geneva, Switzerland (1998).
- [3] Johnson, H. y M. Graham. 2002. High-Speed Signal Propagation. Prentice Hall, p. 39-43.
- [4] Tomasi, W. 2003. Sistemas de comunicaciones electrónicas. Prentice Hall S.A, p. 310-327.
- [5] ATLC: The Arbitrary Transmission Line Calculator, a free software. <http://atlc.sourceforge.net>
- [6] Cremaldi, L. 2003. CMS Pixel Detector – Overview. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research - Section A, 511 (1): 64-67.
- [7] Robert, L. 2003. Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos. Prentice Hall, p. 7-14.
- [8] Swartz, M. 2002. A detailed Simulation of the CMS Pixel Sensor. CMS Note 2002/027, 2-3.
- [9] Gabathuler, K. 2005. PSI46 Pixel Chip – External Especification. Internal document of the CMS Barrel Pixel collaboration, 27 pp.
- [10] Eggel, C. 2009. CMS Pixel Module and search for $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$. Tesis Doctoral, Universidad de Zürich, Zürich, 114 pp.
- [11] Foudas, C., R. Bainbridge, D. Ballard, I. Church y E. Corrin. 2004. The CMS Tracker Readout Front End Driver. IEEE0-7803-8700-7/04, 1304-1305.
- [12] Bruning, O., R. Cappi, R. R. Garoby, O. Grobner, W. Herr, T. Linnecar, R. Ostojic, K Potter, L. Rossi y L. Ruggiero. 2002. LHC Luminosity and Energy Upgrade: A Feasibility Study. CERN-LHC-Project-Report-626. <http://cdsweb.cern.ch/record/601847/files>.
- [13] Radicci, V. 2009. CMS Pixel Detector Upgrade. Journal of Instrumentation, 4(3): 5-6.

[14] Meier, B. 2008. Design studies of a Lower Power Serial Data Link for a possible Upgrade of the CMS Pixel Detector. CERN 2008-008. <http://cdsweb.cern.ch/record/1158656?ln=de>.

[15] ROOT: An object oriented data analysis framework. <http://root.cern.ch/>.

[16] Langenegger, U., A. Starodumov y P. Trubb. 2006. Qualification Procedures of the CMS Pixel Barrel Modules. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research - Section A, 565 (1): 67-72.

[17] Caminata, L y A. Stadorumov. 2009. Building and commissioning of the CMS pixel barrel detector. Journal of Instrumentation, 4, P03017, 20 pp.

[18] Castli, C. CMS Upgrade Requirements and Upgrade Plans. CHIPP Workshop on detector R&D. 2008.