

PALABRAS CLAVE:

ELECTRÓNICA, CÁMARAS DE MUONES, SISTEMA DE PRUEBAS, MINICRATE,
CMS

Development of a Test System for the Cabling of the Minicrates for the CMS Drift Tube Chambers.

Fernández Bedoya, C., Montero, M., Willmott, C.
18 pp. 11 figs. 12 refs.

Abstract

A test system has been developed for the analysis of the read-out electronics cabling for the CMS drift tube chambers. The read-out electronics will be placed inside some aluminium boxes, so-called Minicrates, which are going to be produced soon at CIEMAT. Due to the difficulty of detecting and repairing errors in the cables once they have been installed and recalling also to the large number of Minicrates that are going to be produced, it was decided to design and develop a test system for testing the cabling before its installation.

Desarrollo de un Sistema de Pruebas para el Cableado de los Minicrates de la Electrónica de Lectura de las Cámaras de Deriva de CMS.

Fernández Bedoya, C., Montero, M., Willmott, C.
18 pp. 11 figs. 12 refs.

Resumen

Se ha desarrollado un sistema de pruebas para la validación de la fabricación de los cables de la electrónica de lectura de las cámaras de deriva de CMS. La electrónica de lectura estará contenida en unas cajas de aluminio, Minicrates, cuya producción está a punto de comenzar en el CIEMAT. Dicho sistema se ha desarrollado debido a la dificultad de detectar los errores en los cables una vez instalados en los Minicrates y de su posterior reparación, y atendiendo también al volumen de Minicrates que es necesario realizar.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE LECTURA Y DE LOS MINICRATES	1
	2.1. Interfaz de Control y Monitorización de la ROB	3
	2.2. Descripción de los Cables Empleados.....	4
	2.2.1. Cable ROBUS.....	4
	2.2.2. Cable de reloj.....	5
3.	DESCRIPCIÓN DE LA TARJETA MCC.....	6
4.	CONCLUSIONES Y RESULTADOS.....	8
5.	REFERENCIAS	9

1. INTRODUCCIÓN

El experimento CMS (Compact Muon Solenoid) es uno de los cuatro grandes detectores que se instalarán en el anillo del nuevo acelerador de partículas, LHC (Large Hadron Collider) [1] que se está construyendo en el CERN.

El detector CMS [2] está formado por un gran solenoide superconductor [3] y por una serie de subdetectores repartidos tanto en el interior del solenoide: el calorímetro hadrónico HCAL [4], el calorímetro electromagnético ECAL [5], y el Tracker [6], como en el exterior del solenoide: el detector de muones [7], formado a su vez por las cámaras de deriva DT (Drift Tube), las RPC (Resistive Plate Chambers) y las CSC (Cathode Strip Chambers).

Son de particular interés en este caso las cámaras de deriva situadas en el barril del detector para las cuales en el Ciemat se está desarrollando la electrónica de lectura. El barril de CMS que rodea al solenoide está formado por una estructura de hierro que aloja el sistema de detección de muones y permite el retorno del flujo magnético. Esta estructura está dividida en cinco ruedas, cada una de las cuales está formada por cuatro capas concéntricas, que a su vez se dividen en 12 sectores, donde se sitúan las cámaras de muones. Hay un total de 250 cámaras ya que los sectores inferior y superior de la capa más externa alojan dos cámaras cada uno. Una representación de esta disposición se puede ver en la figura 1.

Cada cámara está formada por tres supercapas cada una de las cuales contiene a su vez cuatro niveles de celdas de deriva que son las que permiten medir el punto de paso de una partícula cargada. Entre las supercapas se sitúa una estructura de aluminio llamada honeycomb debido a su estructura hexagonal que proporciona una gran rigidez con un mínimo peso. En el perfil del honeycomb es dónde se insertarán los Minicrates que se conectarán a la cámara. Por tanto la electrónica de lectura se situará en el interior de las ruedas de CMS y estará expuesto a las condiciones medioambientales y de radiación de la zona. En la figura 2 se puede ver la localización en CMS de la electrónica de lectura de las cámaras de deriva.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE LECTURA Y DE LOS MINICRATES

La electrónica de lectura de las cámaras de deriva de CMS tiene como misión la digitalización temporal de las señales procedentes de la electrónica frontal de las cámaras con respecto a una señal global de referencia (disparo) generada por el sistema de disparo de CMS [8]. Para ello se han desarrollado unas tarjetas de adquisición de datos de propósito particular, llamadas ROB (Read Out Boards) [9].

En estas tarjetas se emplea un ASIC desarrollado en el Laboratorio de Microelectrónica del CERN, CERN/EP-MIC, el HPTDC (High Performance Time to Digital Converter) [10]. Este circuito integrado, altamente programable, permite la digitalización temporal de las señales procedentes de las cámaras en un sistema como el de CMS, en el que las latencias serán muy elevadas (3.2 μ ms) mientras que la frecuencia de operación es de 40 MHz, existiendo por tanto solapamiento de sucesos.

Cada tarjeta ROB permite la digitalización de 128 canales, transmitiéndose los datos posteriormente a través de un enlace serie a las tarjetas ROS (Read Out Server boards) situadas en las torres a ambos lados del detector.

Estas tarjetas ROB se situarán en el interior de los minicrates, cerca de las cámaras de muones cuyos datos deben procesar. El número de ROB's por minicrate es de 3 a 7, y depende del número de canales que tenga cada cámara, pues no todas son iguales en el detector.

Como se indicó anteriormente, la estructura de hierro que rodea el solenoide de CMS y que contiene las cámaras de deriva está dividido en cuatro capas concéntricas (de MB1 a MB4), que a su vez se subdividen en 12 sectores, denominados de S1 a S12. En líneas generales los minicrates de la misma capa son idénticos exceptuando el caso de MB4 en el que se tienen tres tipos de minicrates diferentes. En los sectores S4 y S10 son dobles y por tanto cada cámara es más pequeña. En los sectores S9 y S11, han de ser más pequeños pues coinciden con las sujeciones de la rueda.

En la siguiente tabla se puede ver el número de ROB's que contiene cada uno de los 6 tipos diferentes de minicrates:

Minicrate	# ROB
MB1	6
MB2	6
MB3	7
MB4 (S4)	5
MB4 (S10)	4
MB4 (S9, S11)	3
MB4 (resto)	6

Tabla 1: Número de ROB's para cada tipo de Minicrate.

Aparte de las ROB's, en el interior del minicrate se situarán también las tarjetas de la electrónica de disparo de las cámaras de muones, las TRB's (Trigger Read-Out Board), que se colocan encima de las ROB's conectadas a ellas para recibir igualmente las señales de las cámaras. Asimismo se encuentra la tarjeta CCB (Chamber Control Board) que es la encargada, entre otras tareas, de la configuración y monitorización tanto de las ROB's como de las TRB's. Esta tarjeta se sitúa en el centro del minicrate y se conecta a las ROB's a través de un bus de control que se denomina ROBUS. También es la encargada de suministrar el reloj de 40 MHz procedente del sistema TTC (Timing and Trigger Control system) [11], a cada una de las tarjetas a través de conexiones punto a punto. Por encima de

la CCB se sitúa la SB (Server Board), que realiza la recolección de los datos de las distintas TRB's y los transmite a los siguientes niveles de la cadena de adquisición de datos del sistema de disparo.

Por último en el minicrate se situarán también una tarjeta de enlace para la CCB, que recibe tanto información del Sistema de Control (Slow Control) como del sistema TTC, y una tarjeta de enlace de las ROB's para integrar los distintos enlaces individuales en dos cables FTP que van hasta las tarjetas ROS. En la figura 3 se puede observar un minicrate durante el proceso de montaje con los distintos elementos indicados.

En la figura 4 se puede observar los distintos tipos de minicrate y la disposición de las distintas tarjetas. Dependiendo de dónde esté situado el acceso a cada minicrate se distinguirán a su vez minicrates de tipo derecha e izquierda. También se hace notar que en el caso de MB1, debido al escaso espacio disponible, se utiliza una ROB de 32 canales para cubrir toda la cámara evitando aumentar más de lo permitido la longitud total del minicrate.

2.1. Interfaz de Control y Monitorización de la ROB

Como ya se ha dicho, dentro del minicrate, la ROB se configura y monitoriza a través de la CCB, que realiza una configuración automática pero que asimismo, permite la comunicación entre el sistema de software externo del Slow Control y la ROB con el fin de modificar los parámetros requeridos en cada momento así como monitorizar el estado de las tarjetas desde la sala de control.

Las señales necesarias para realizar estas tareas son:

- Señal de encendido para cada tarjeta. Dado que el número máximo de ROB's dentro de un minicrate son 7, este es el número de señales que se utilizan. Estas señales son TTL.
- Señales de direccionamiento. Las ROB's comparten el espacio de direcciones con el resto de las tarjetas en el Minicrate, y como el número máximo de estas es 15, se utilizarán 4 líneas de direcciones para que la CCB se dirija independientemente a cada una de ellas. Estas señales son TTL.
- Líneas del interfaz JTAG. Las ROB se configuran mediante un interfaz JTAG que enlaza en un anillo los 4 HPTDC's de cada ROB. Por ello son necesarias las cuatro líneas básicas JTAG: TCK, TMS, TDI, TDO. Estas señales son TTL.
- Señal de error de la ROB. Señal TTL.
- Señal de estado del sistema de alimentación. Existe en cada ROB un sistema de protección frente a cortocircuitos que desconecta la alimentación de la tarjeta cuando la corriente de 2,5 V es superior a 1,5 A o la de 3,3 V es superior a 1 A. Esta desconexión se realiza en ciclos de 700 ms, tras lo cual sigue un encendido

automático con el fin de comprobar si se ha solucionado el problema que ocasionó el cortocircuito, que en la mayoría de los casos se supondrá debido a un latch-up en algún componente como consecuencia del ambiente radiactivo en el que van a operar las tarjetas. Existe una señal que se activa cuando así lo hace el sistema de protección de la ROB, notificando así a la CCB que esa tarjeta presenta un problema. Esta señal es TTL.

- Señales procedentes del sistema de TTC. El funcionamiento del HPTDC requiere las señales de disparo de primer nivel de CMS, de inicialización del contador de eventos y de inicialización del contador de cruce de haces, todas ellas proporcionadas por el TTC a través de la CCB. Estas señales son diferenciales LVDS, pues son señales rápidas que deben estar sincronizadas con el reloj de 40 MHz.
- Señal de reset de la ROB. Esta señal es también diferencial LVDS.
- Señales para el modo de test de pulsos. La ROB tiene un modo de operación de pruebas que permite comprobar que todo el sistema electrónico (Front-end boards, ROB y TRB's) está funcionando correctamente mediante la simulación de trazas verticales en las cámaras y la lectura de las medidas temporales que se generan. El funcionamiento desde el punto de vista de la ROB es similar a una maquina de estados circular en el que en cada estado se habilitan una serie de canales determinados. Para ello se necesita una señal que indique el modo de operación en el que se encuentran, Track Mode, una de inicialización de la maquina de estados, Track Reset, y una de avance de un estado a otro, Track Advance. Estas señales son TTL.
- Línea para el sensor 1-wire. En la ROB se sitúa un circuito integrado de Maxim (DS2438) que permite medir la tensión de 2,5V, la de 3,3V, la corriente de la placa y la temperatura a la que se encuentra. Este componente se comunica mediante un interfaz denominado 1-wire [12] que necesita únicamente una línea de conexión.

2.2. Descripción de los Cables Empleados

2.2.1. Cable ROBUS

En total son 29 señales, para lo que se utilizará un bus de 40 líneas, que será de paso fino para minimizar el espacio empleado. Este bus puede ser un cable paralelo pues al no tener ninguna señal periódica de alta frecuencia las interferencias entre canales serán mínimas.

Se ha elegido un cable de Amphenol Spectra-Strip (191-3005-040) de 0.025 pulgadas entre hilos. Esta alta densidad hace que el cable tenga un ancho de 2,54 cm,

adecuado para el espacio disponible en el minicrate, que es inferior a 5 cm. En la tabla 2 se recogen las características más importantes de este cable.

Material aislante	PVC
Conductores	30 AWG 7/40 cobre estañado
Impedancia	70 ohms
Capacitancia	82,0 pF/m @ 1,0 MHz
Inductancia	0,46 µh/m @ 1,0 MHz
Voltaje máximo	150 V
Retardo de propagación	5,25 ns/m
Resistencia del aislante	10 ¹⁰ ohms/ 3 metros.
Interferencia entre líneas separadas por masa	3,7%
Temperatura máxima	-20 °C a 105 °C
Flamabilidad	UL 2678

Tabla 2: Características del cable ROBUS.

Los conectores que se emplearan son los ODU 515.568.035.040 de 40 pines cuya imagen puede verse en la figura 5. Estos conectores se encuentran situados en la cara inferior de las ROB y de la CCB, por lo que el cable ROBUS estará situado en la parte inferior del minicrate como puede verse en la figura 6. Dependiendo del tipo de minicrate para el que se construya el ROBUS, el número de conectores y la distancia entre ellos será diferente. En la siguiente tabla 3 se indica la distancia a la que debe situarse cada uno de los conectores dependiendo del minicrate para el que se esté fabricando:

MB1	MB2 y MB4	MB3	MB4(S4-S10)	MB4(S9-S11)
0	0	0	0	0
270	270	270	270	279
540	540	540	549	511
819	819	810	781	781
1051	1051	1089	1051	
1225	1321	1321	1321	
1495	1591	1591		
		1861		

Tabla 3: Posición en mm de los conectores en el cable ROBUS para cada minicrate.

2.2.2. Cable de reloj

Con respecto al cable de reloj de 40 MHz se empleará el cable 2100/16TP de 3M cortándolo al número de conductores necesarios dependiendo del número de tarjetas por minicrate. Este cable es un cable plano de pares trenzados unidos entre sí mediante un plástico que será suprimido en nuestro caso para poder trazar de forma independiente la

ruta de cada cable a cada una de las tarjetas. Las características del cable empleado se indican en la siguiente tabla 4:

Material aislante	Polyolefin libre de halógeno
Conductores	28 AWG 7/36 cobre estañado
Impedancia	102 ohms
Capacitancia	16,9 pf/m
Inductancia	0,18 μ h/m
Voltaje máximo	150 V
Retardo de propagación	5,71 ns/m
Resistencia del aislante	10^{10} ohms/ 3 metros.
Temperatura máxima	-40 °C a 80 °C
Flamabilidad	UL VW-1

Tabla 4: Características del cable de reloj de 40 MHz.

En el extremo de la CCB se empleará el conector AMP 8-215083-6 de 16 pines, mientras que en los otros extremos se utilizará el conector de dos pines AMP 87175-6 para el caso de la ROB y el AMP 280358-0 para la TRB. La longitud de los distintos cables es diferente en cada caso: si es un reloj para las tarjetas ROB todos los cables tienen una longitud aproximada de 1 metro, sin embargo en el caso de que sea un cable para las TRB las longitudes son de 133 cm para los conectores que vayan a las TRB de tipo phi, y un incremento igual al indicado en la tabla 5 para los pares trenzados que vayan a las TRB de tipo theta (ver Figura 4). Los minicrates de la chimenea son los situados en una zona de las ruedas de CMS en la que las cámaras tienen dimensiones inferiores. El rutado de los cables de reloj se realizará en los laterales del minicrate, fijándolos al suelo del mismo, como puede verse en la figura 7.

Minicrate	Longitud del cable de TRB's theta
MB1	Long.Phi + 1,80 m (10,2 ns)
MB2	Long.Phi + 2,06 m (11,7 ns)
MB3	Long.Phi + 1,80 m (10,2 ns)
MB4	Sin cable theta
MB1 chimenea	Long.Phi + 1,54 m (8,8 ns)
MB2 chimenea	Long.Phi + 1,80 m (10,2 ns)
MB3 chimenea	Long.Phi + 1,54 m (8,8 ns)

Tabla 5: Longitudes de los distintos cables de reloj de las tarjetas TRB.

3. DESCRIPCIÓN DE LA TARJETA MCC.

Todos estos cables se sitúan en el minicrate con anterioridad a ninguna tarjeta, y sólo una vez que están todas instaladas se puede comprobar su correcto funcionamiento. Dado el tiempo que requiere el montaje de cada minicrate y sus pruebas, y el elevado número de cables que es necesario realizar, 250 de cada tipo repuestos, se consideró la

posibilidad de fabricar un sistema de pruebas de los cables que validara los mismos una vez fabricados y antes de ser instalados en el minicrate. Para ello se desarrolló la tarjeta MCC (Minicrate Cabling Control) que debía permitir la comprobación rápida de los tres tipos de cables a fabricar con independencia del minicrate al que fueran destinados.

Para ello se pensó en una tarjeta que pudiera analizar los distintos errores que se podían encontrar en la fabricación de los cables. Estos errores son principalmente dos:

- Cortocircuito entre dos conductores contiguos tras la inserción del conector.
- Algún pin dañado en el conector que impida el contacto con esa señal.

El primer problema se analiza con facilidad inyectando en un extremo del cable una señal consecutivamente por cada uno de los conductores mientras el resto está conectado a tierra, y leyendo el resultado en el otro extremo del cable. Esta comprobación se realizará por partida doble, es decir, conectando también todos los conductores a alimentación excepto uno y transmitiendo este cero por cada uno de los conductores y comprobando que se recibe correctamente en el otro extremo del cable. Para ello sólo serían necesarios dos conectores en la tarjeta MCC, sin embargo, se ha observado que en algunas situaciones el cable no está cortocircuitado pero que algún conector no hace buen contacto. Por ello se decidió utilizar tantos conectores como el número máximo de conectores existentes en los Minicrates y realizar el test anterior a cada pareja de conectores, indicando cuales de ellos lo pasaban correctamente y cuales presentaban algún problema.

Se tienen por tanto dos buses, uno de transmisión (EMIT) y otro de recepción (REC). El primero de ellos se conecta al primer conector y también al último, con el fin de evitar que el resultado sea negativo en todos los casos cuando el único conector defectuoso es el primero. El bus de transmisión se conecta a todos los conectores mediante unos interruptores de bus (IDT74CBTLV3862) habilitados mediante unas señales de control (CTRL) que permiten seleccionar el conector que se va a analizar en cada caso. Una vez analizados todos los pines de un conector se genera una señal de error o de acierto en cada caso, que enciende un led amarillo o verde en la placa para cada uno de los conectores. De esta forma se puede saber de forma inmediata qué conector está fallando.

Mediante un botón en la placa se selecciona el comienzo del test, con el fin de repetirlo las veces que se quiera, mientras que con un interruptor se selecciona el extremo por el que se inyectan las señales. También existe un puente para indicar a la FPGA si el cable es de tipo ROBUS o de reloj, dado el distinto número de conectores de cada uno de ellos.

El funcionamiento del test para el cable de reloj es el siguiente: el conector principal se conecta en un extremo a las mismas líneas que el primero del cable de ROBUS y cada par trenzado se conecta a las primeras dos líneas de cada uno de los conectores restantes del ROBUS. De esta forma la ejecución del test es la misma, con la excepción de que en cada caso sólo hay que comprobar las señales correspondientes de cada conector utilizando las máscaras necesarias.

En la figura 8 se tiene un diagrama de bloques que describe la arquitectura de la tarjeta MCC. Así mismo, la lógica de operación se describe en el diagrama de flujo de la figura 9.

Una FPGA Spartan II de Xilinx (XC2S50PQ208) de 208 pines será la que contenga toda la lógica necesaria para la realización del test. Aunque esta lógica no es muy complicada y se utiliza únicamente el 16% de la lógica disponible, fue necesario la utilización de esta FPGA debido al elevado número de pines necesitados (116).

La FPGA se alimenta con un reloj de 40 MHz que luego se reduce en un factor 2^{12} a $\sim 9,7$ kHz con el fin de asegurar la estabilidad de las señales antes de realizar la medición.

4. CONCLUSIONES Y RESULTADOS

La tarjeta realizada tiene 4 caras, se implementó en el programa de diseño electrónico Orcad y en la figura 10 y 11 se pueden observar unas imágenes de la misma durante la realización de una prueba de un cable de ROBUS.

Se comprueba que si el cable está correctamente fabricado, cada uno de los conectores pasa el test, encendiéndose en su caso el led verde, tanto si se inyectan las señales por un extremo del conector como por el otro. En el caso de que alguno de los conectores tenga algún defecto de conexión con el cable, el test da error en ese conector particular, encendiéndose el led amarillo asociado, mientras que los otros funcionan satisfactoriamente. También se pudo observar que si el cable tiene algún cortocircuito en algún punto, todos los conectores dan error.

El funcionamiento también es satisfactorio en el caso del cable de reloj, pudiéndose comprobar si todos los conectores están correctamente montados y en caso negativo cuál de todos es el que tiene el problema.

Esta tarjeta facilitará el montaje de los minicrates acelerando su proceso, dado que se garantiza el correcto funcionamiento de los cables instalados, reduciendo así las causas de fallo en la operación de un minicrate ya terminado.

Además, la comprobación de estos cables se realiza una forma rápida y sencilla, siendo una operación en la que el mayor consumo de tiempo se debe al proceso de conectar el cable a la tarjeta.

Por otro lado, si durante el montaje de los cables se prueba cada conector una vez instalado, se puede desechar un cable defectuoso sin que halla sido necesario montar todos los conectores, ahorrando así una cantidad sustancial de cable y de conectores. En el caso de los cables de reloj este ahorro puede ser aún mayor pues puede repararse exclusivamente el conector defectuoso y seguir empleando el cable realizado.

5. REFERENCIAS

- [1] The LHC Study Group. "The Large Hadron Collider, Conceptual Design." CERN/AC/95-05, Oct 1995
- [2] The CMS Collaboration. "CMS Technical Proposal." CERN/LHCC/94-38. LHCC/P1, Diciembre 1994
- [3] The CMS Collaboration. "The Magnet Project Technical Design Report." CERN/LHCC 97-10, Mayo 1997
- [4] The CMS Collaboration. "The Hadron Calorimeter Technical Design Report." CERN/LHCC 97-31, Junio 1997
- [5] The CMS Collaboration. "The Electromagnetic Calorimeter Technical Design Report." CERN/LHCC 97-33 Diciembre 1997
- [6] The CMS Collaboration. "Tracker Technical Design Report." CERN/LHCC 98-6, Abril 1998
- [7] The CMS Collaboration. "The Muon Project, Technical Design Report." CERN-LHCC 97-32 CMS, Diciembre 1997
- [8] N. Ellis. "First-Level Trigger Systems at LHC." Proceedings of the 8th Workshop on Electronics for LHC Experiments. CERN 2002-2003 CERN-LHCC-2002-34 LHCC-G-014 Septiembre 2002.
- [9] C. Fernández-Bedoya, J. Marín, J.C. Oller, C. Willmott. "Overview of the Read-Out System for the CMS Drift Tube Chambers." Proceedings of the 9th Workshop on Electronics for the LHC Experiments (LECC 2003), Amsterdam, Holanda. Septiembre 2003.
- [10] J. Christiansen. "High Performance Time to Digital Converter. Version 2.1." CERN/EP-MIC. Julio 2002
- [11] B.G.Taylor "RD12 Timing, Trigger and Control (TTC) Systems for LHC Detectors." <http://www.cern.ch/TTC/intro.html>
- [12] MAXIM "Overview of the 1-wire Technology and its Use." Application note 1796. Diciembre 2002.

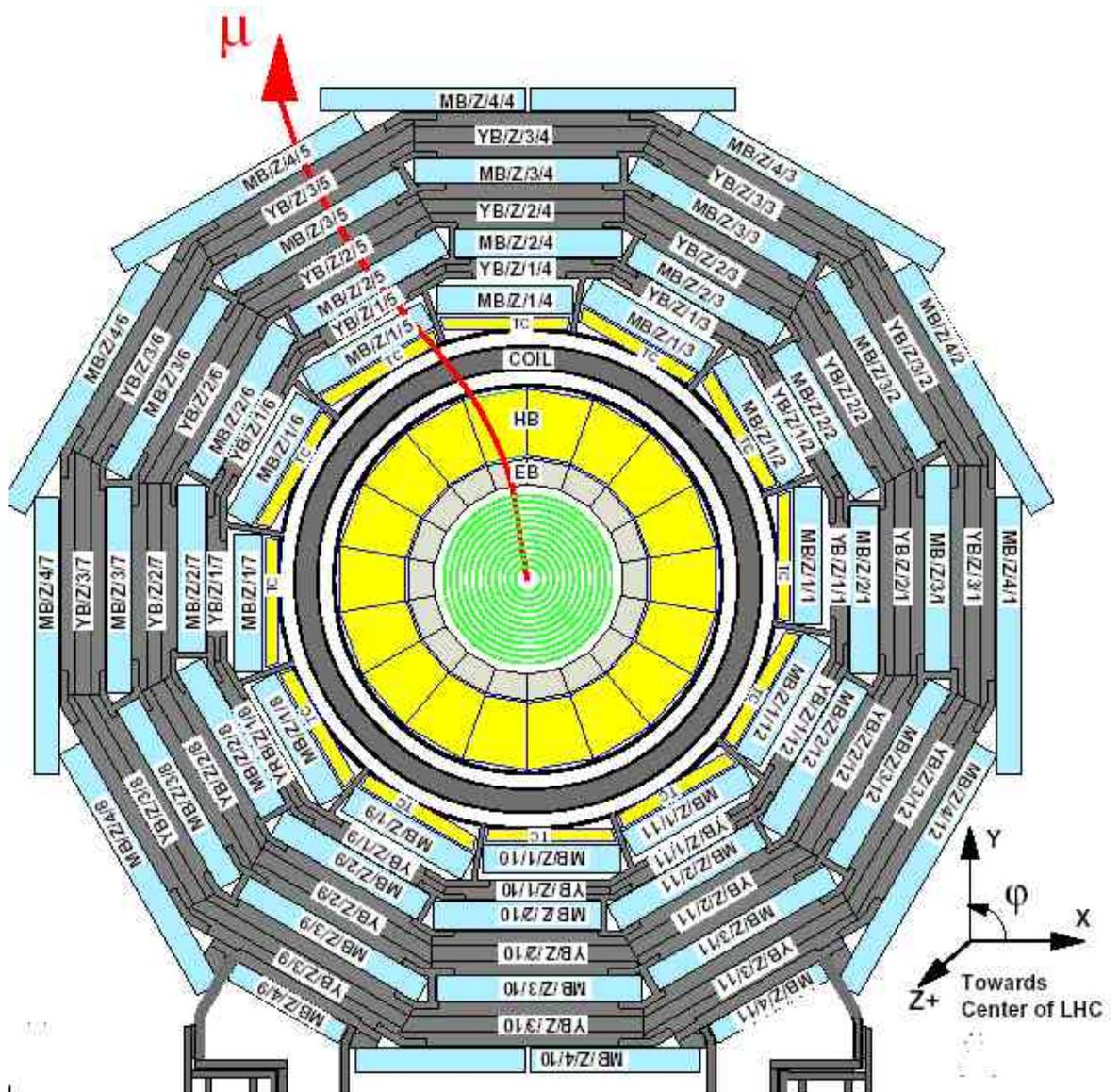


Figura 1: Corte transversal del detector CMS.

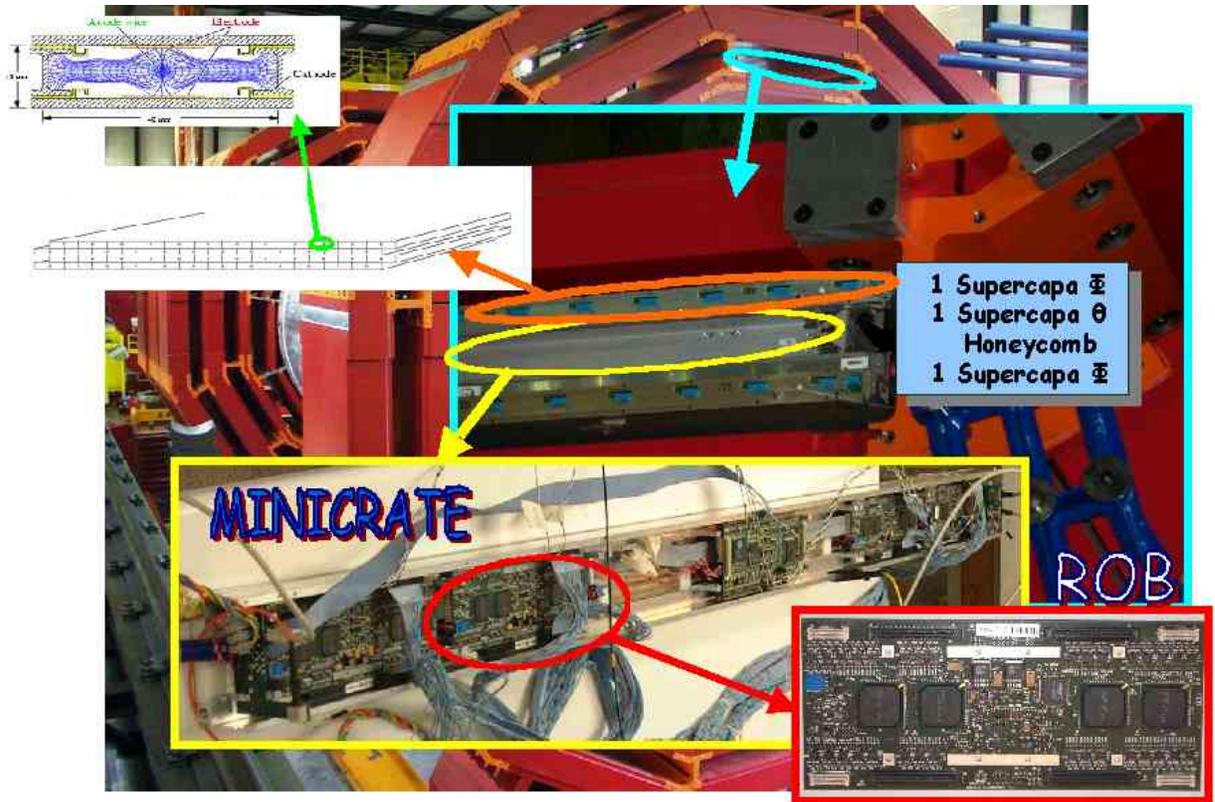


Figura 2: Localización en el detector CMS del minicrate y de la electrónica de lectura de las cámaras de deriva.



Figura 3: Imagen de un minicrate.

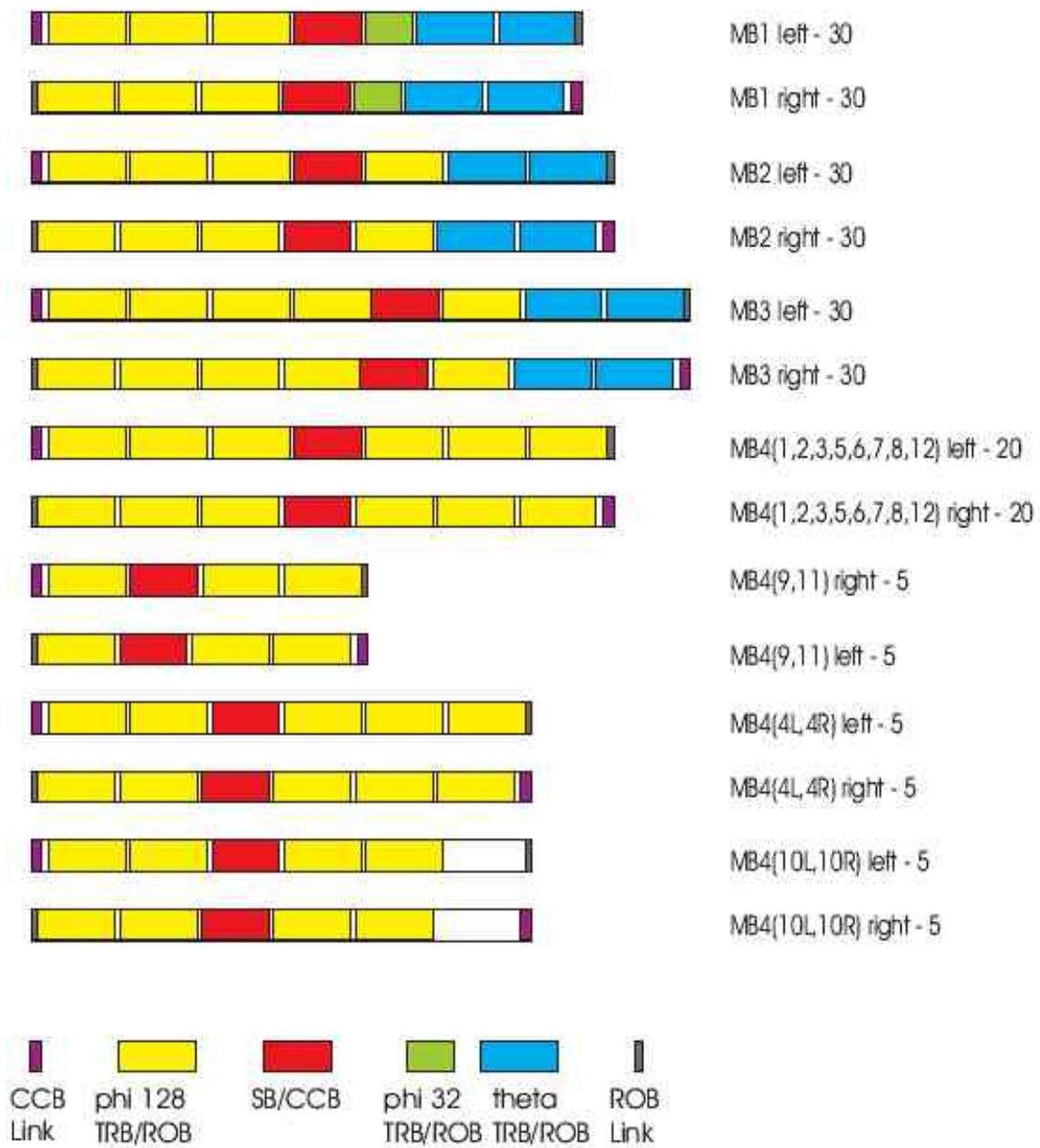


Figura 4: Representación de los distintos tipos de minicrate.

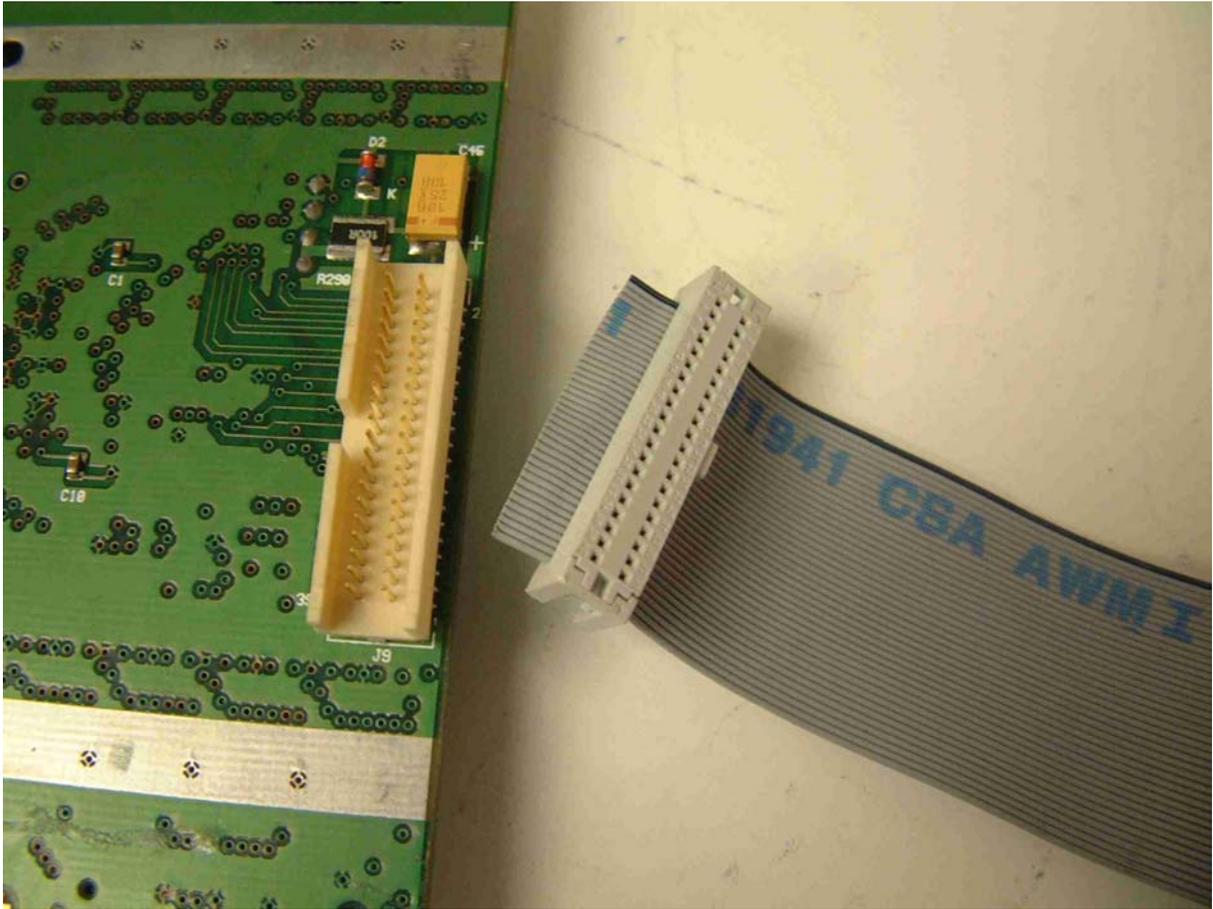


Figura 5: Imagen del conector ODU utilizado en el ROBUS.

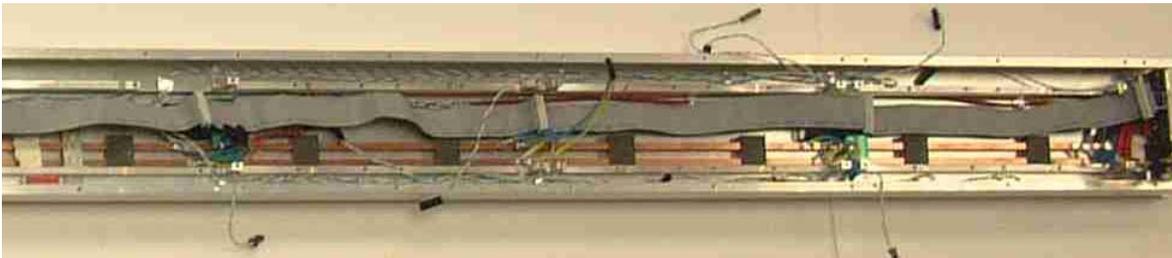


Figura 6: Situación del ROBUS en el interior del minicrate.



Figura 7: Rutado de los cables de reloj en el interior del minicrate.

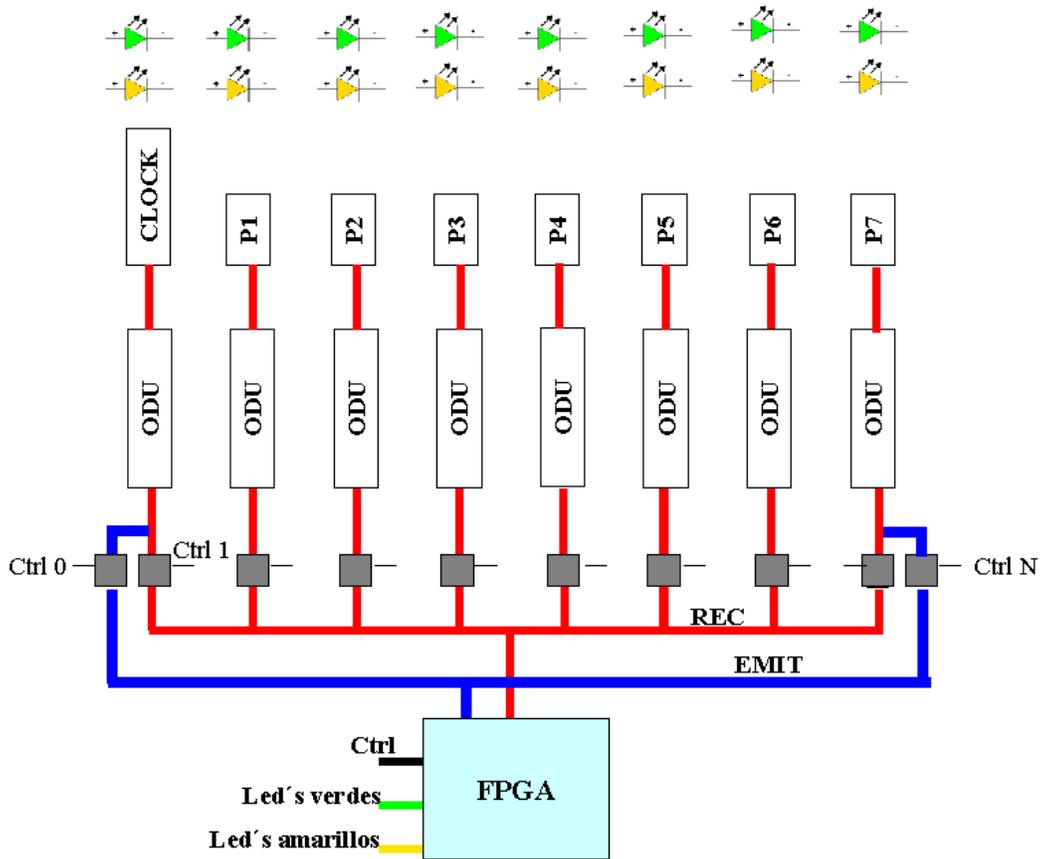


Figura 8: Representación de la arquitectura de la tarjeta MCC.

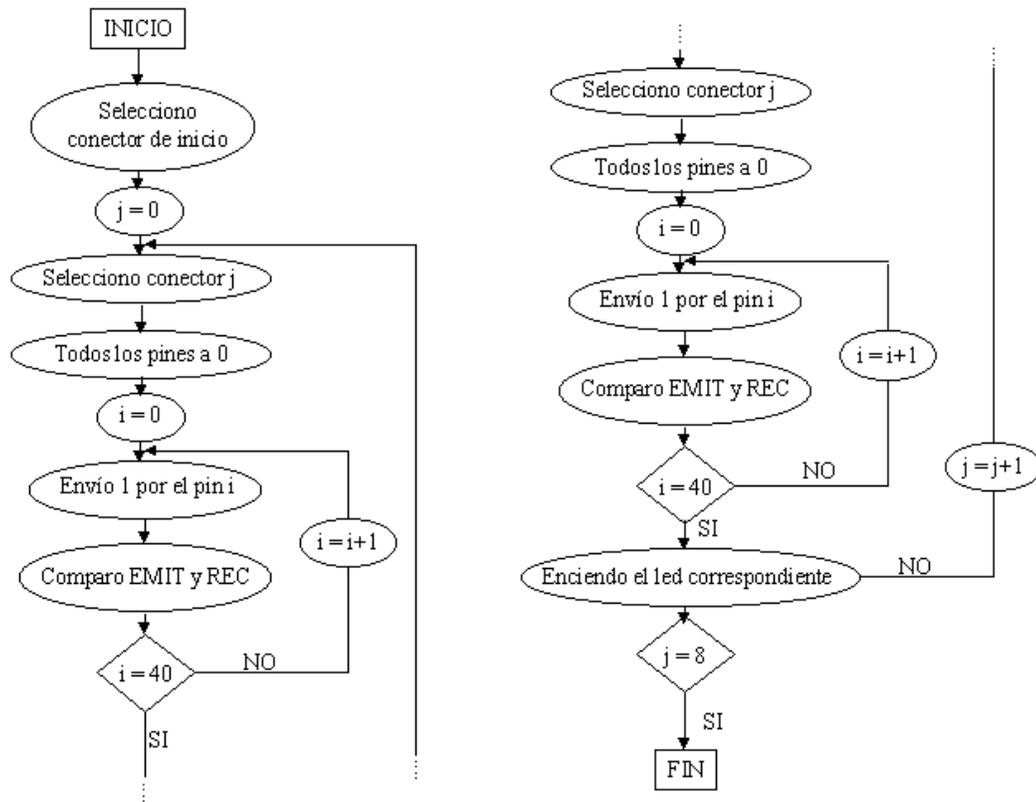


Figura 9: Diagrama de bloques de la funcionalidad de la tarjeta MCC.

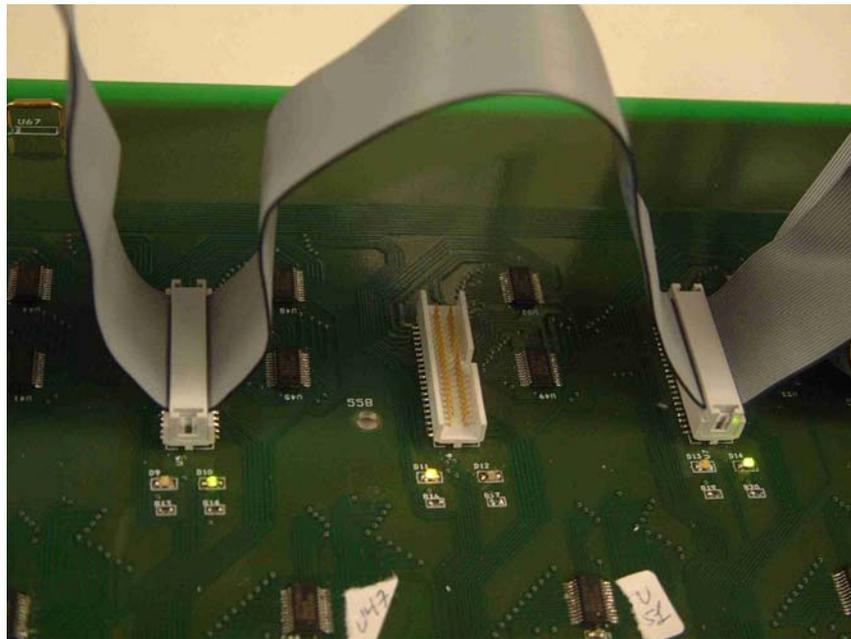
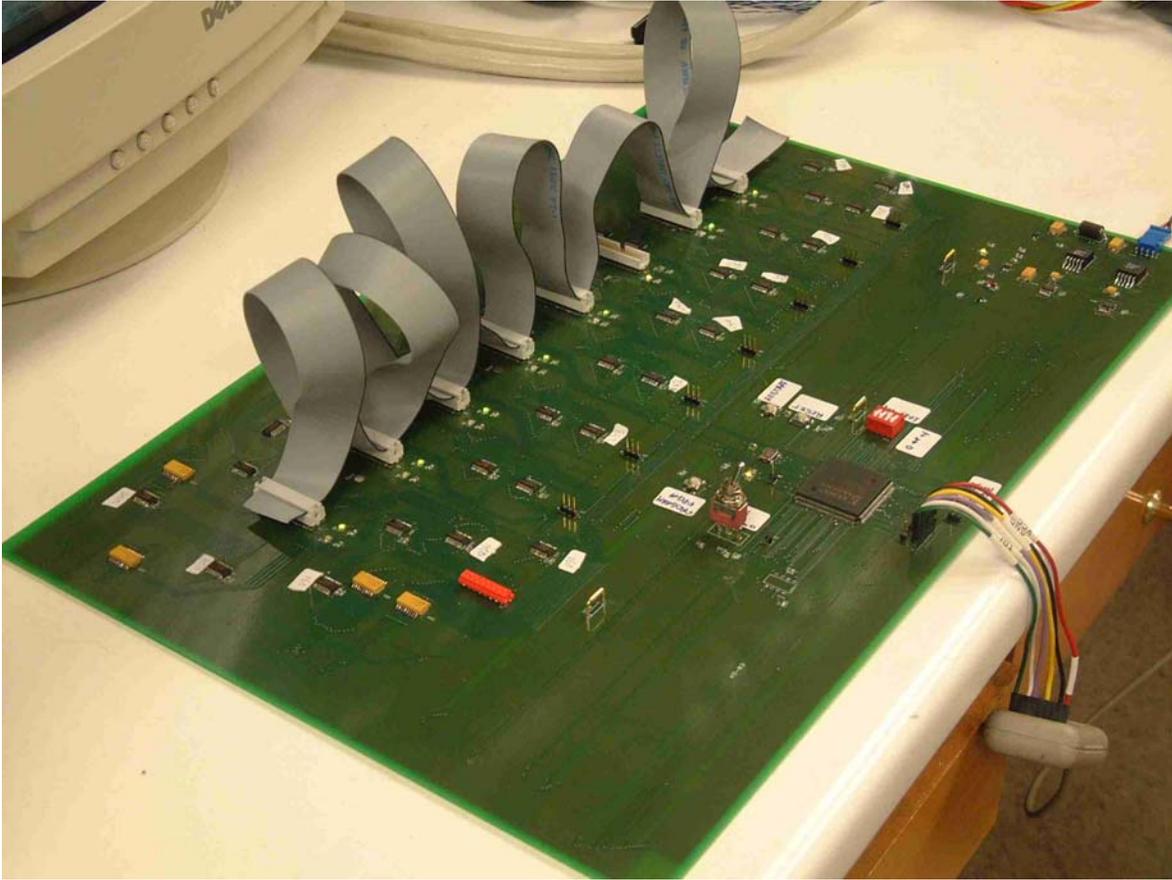


Figura 10: Imágenes de la tarjeta MCC con el ROBUS.

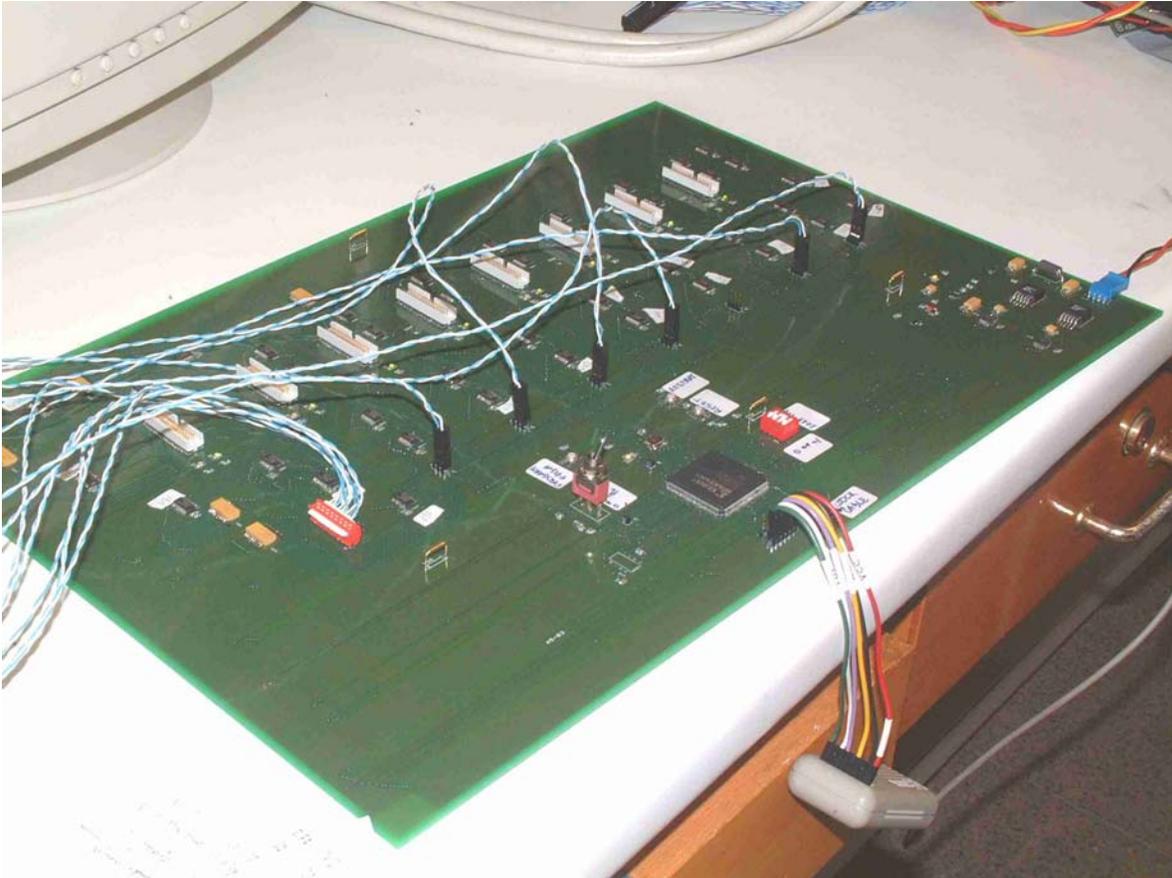


Figura 11: Imágenes de la tarjeta MCC con el cable de reloj.