



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS

POSGRADO EN FÍSICA APLICADA

Optimización del sistema de disparo de rayos cósmicos del
experimento ALICE

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA:

Luis Alberto Pérez Moreno

ASESORADO POR:

Dr. Mario Iván Martínez Hernández

Dr. Guillermo Tejeda Muñoz

Puebla, México

12 de Diciembre de 2014

AGRADECIMIENTOS

Es justo mencionar a todas las personas que me han apoyado y brindado su amistad durante el tiempo que he sido estudiante de la Facultad Físico Matemáticas de la BUAP, sin embargo tendré que ser injusto y no podré nombrar a muchos, pero no por eso dejan de ser relevantes para mí.

A mis asesores, Dr Mario Iván Martínez y Dr. Guillermo Tejeda Muñoz por todo su apoyo incondicional, consejos orientación y paciencia que me han brindado durante el tiempo que he sido su estudiante.

Al Dr. Arturo Fernández Téllez, quien desde hace tiempo ha confiado en mí dando apoyo humano y profesional a lo largo de mi etapa de estudiante tanto de licenciatura y maestría. Gracias por su tiempo y enseñanza.

Así mismo agradezco muy en especial las aportaciones, observaciones y sugerencias a este trabajo por parte del Dr. Mario Rodríguez Cahuantzi. Gracias por su tiempo y enseñanza.

Al Dr. Humberto Salazar, Dr. Oscar M. Martínez, Dr. Arturo Fernández por sus comentarios tanto en los avances de tesis como en la presentación final de esta tesis. Gracias por su retroalimentación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado durante mis estudios de maestría y estancia en CERN.

Resumen

ACORDE (ALICE COsmic Ray Detector) es un detector de partículas cargadas eléctricamente, compuesto por una red de contadores de centelleo que registra el paso de muones atmosféricos, asociados a rayos cósmicos de alta energía. Este arreglo de contadores está colocado en las tres caras superiores del magneto del experimento ALICE, a 40 metros de profundidad. La función principal de ACORDE consiste en generar una señal de disparo cuando una partícula cósmica impacta al menos uno de los 60 contadores de centelleo de ACORDE. Esta señal permite a los detectores centrales de ALICE (TPC, ITS etc) realizar pruebas de caracterización, calibración y alineamiento. Además aprovechando la alta resolución de estos detectores de trazas ACORDE es capaz de detectar eventos de rayos cósmicos de muy alta energía. Este sistema de detectores ha permitido hacer aportaciones originales en la física de astropartículas.

En este trabajo se presenta la actualización del sistema electrónico del detector ACORDE para la LHC-Run2. Como primer punto, se ha desarrollado el nuevo firmware de la electrónica del detector ACORDE basado en las nuevas especificaciones del sistema central de disparo (CTP) y el sistema de adquisición de datos (DAQ) del experimento ALICE. En segundo lugar, originalmente el sistema electrónico de ACORDE no contaba con un sistema de simulación, fue necesario implementar un sistema de simulación, basado en el lenguaje de programación VHDL, que fuera capaz de reproducir los diferentes tipos de mensajes de disparo que maneja el CTP y del protocolo de comunicación entre la electrónica y el DAQ, lo que permitió realizar un proceso de simulación integral de la adquisición de resultados similar al que se realiza durante la operación del experimento ALICE. Dando como resultado un mejor entendimiento de la manera de operación del detector ACORDE. En tercer lugar, se verificó el funcionamiento del sistema electrónico, poniendo en marcha un laboratorio de CTP-ACORDE-DAQ, para posteriormente incorporar ACORDE a las primeras corridas de integración con los demás detectores y sistemas que componen ALICE, en el periodo septiembre-noviembre del presente año. Al mismo tiempo se realizó el proceso de calibración de los 60 módulos que constituyen a ACORDE; finalmente el proceso de verificación concluye con la visualización de los datos registrados por ACORDE durante las pruebas de integración y en corridas denominadas "standalone".

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	ii
RESUMEN	iv
ÍNDICE GENERAL	vi
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
INTRODUCCIÓN	xvi
1 Física de partículas	1
1.1 Partículas elementales	1
1.2 Modelo estándar	2
1.3 Rayos Cósmicos (Historia)	4
1.3.1 Cascada de rayos cósmicos	5
1.4 Detectores de partículas	7
1.4.1 Propiedades Generales de los detectores	8
1.4.2 Detectores de Centelleo	11
1.5 Fotomultiplicador	12
1.5.1 Principio de Funcionamiento	13
2 ACORDE (Detector de Rayos Cósmicos de ALICE)	15
2.1 Gran colisionador de hadrones (LHC)	15
2.2 Experimento ALICE	15
2.3 Ambiente de ACORDE en ALICE	18
2.4 Detector ACORDE	19
2.5 Electrónica del detector ACORDE	20
2.5.1 Sistema Electrónico de ACORDE	22
3 Sistema de comunicación y control de ACORDE	24
3.1 Actualización de los sistema de ALICE	24
3.2 Sistema de control de tiempos y disparo (TTC-LHC)	26

3.3	TTCrx	27
3.3.1	Sistema de disparo de ALICE	28
3.4	Circuito de aplicación específico TTCrx	31
3.4.1	Formato del sistema TTC	34
3.5	Sistema de adquisición de datos de ALICE	36
3.5.1	Enlace de datos del detector	37
3.5.2	Región de interés. (RoI)	41
3.6	SIU (Source Interface Unit)	42
3.6.1	Interfaz con la tarjeta SIU	42
3.7	Comandos(FECMDs)	44
4	Diseño del Sistema	51
4.1	Acercamiento al entorno	51
4.1.1	FPGA	51
4.1.2	Método de diseño en FPGA	52
4.1.3	Implementación	52
4.2	Características Generales	53
4.3	Electrónica de ACORDE	54
4.3.1	Decodificador TTCrx	55
4.3.2	FEE_SIU_INTERFACE	57
4.4	Comunicación con el FPGA2	60
4.5	FEE_RESETN	61
4.6	Decodificar de disparos L0/L1	63
4.7	Generador de eventos	65
4.8	Generador de la señal de busy	66
4.9	Generador de la señal de trigger	67
5	Simulación y resultados del proceso de adquisición de datos	68
5.1	Simulación	68
5.1.1	Simulación TTCrx_Decoder	68
5.1.2	Decodificador de mensajes y señal de ocupado	72
5.1.3	Simulación FEE_SIU_Interface	73
5.1.4	Simulación Comunicación entre los dos FPGA	77
5.1.5	Simulación global del sistema	80
5.2	Laboratorio CTP-ACORDE-DAQ	80
5.2.1	Unidad Local de Disparo	83
5.2.2	Sistema de Adquisición de datos	83
5.3	Verificación del funcionamiento del detector ACORDE)	87
5.3.1	Información registrada por ACORDE	88
5.3.2	Estructura de los datos en ACORDE	89
6	Discusión de resultados y Conclusiones	92
6.1	Conclusiones	92

BIBLIOGRAFÍA

ÍNDICE DE TABLAS

2.1	Parámetros nominales del LHC	16
3.1	Formato de mensaje de la TTC	28
3.2	Distribución de los 16 bits del mensaje de la TTC	29
3.3	Distribución de las direcciones de la TTC	29
3.4	Contenido del mensaje de disparo L1	30
3.5	Contenido del mensaje de disparo L2a	30
3.6	Contenido del mensaje L2r	31
3.7	Contenido del mensaje RoI	31
3.8	Bits calificadores de datos.	33
3.9	Registro de control	34
3.10	Estructura de un comando de prueba	35
3.11	Estructura de un comando direccionado individualmente	35
3.12	Estructura de la información del mensaje nivel 1	40
3.13	Definición de los bits de estado y error	41
3.14	Estructura de la clases de trigger	42
4.1	Características del FPGA Cyclone III	54
4.2	Mensajes disponible de acuerdo al código en la señal SubA.	56
4.3	Lista de palabras de estado disponibles de ACORDE.	60
4.4	Comandos a transmitir al FPGA2.	63

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Partículas del Modelo Estándar	2
1.2	Espectro de energía de los rayos cósmicos primarios medidos por varios experimentos)	6
1.3	Vista esquemática del desarrollo de una cascada EAS (Extensive Air Shower)	7
1.4	Variedad de detectores.	8
1.5	Medida de la resolución en Energía	9
1.6	Eficiencia de detección	10
1.7	Tiempo de Muerto	11
1.8	Proceso de detección centellador y PMT	12
1.9	Tubo Fotomultiplicador	14
2.1	Gran Colisionador de Hadrones (LHC)	16
2.2	Esquema general del detector ALICE	17
2.3	Vista general del punto2: mostrando el espacio geométrico	18
2.4	Configuración del detector ACORDE	19
2.5	Esquema de un módulo de ACORDE	20
2.6	Eventos de rayos cósmicos	20
2.7	Diagrama a bloques de FEE de ACORDE	22
2.8	Diagrama a bloques de FEE de ACORDE	23
3.1	Diagrama a bloques del sistema de control de ALICE.	25
3.2	Arquitectura de la red TTC	26
3.3	Diagrama del sistema central de disparo de ALICE	27
3.4	Diagrama a bloques de circuito integrado TTCrx	32
3.5	Diagrama de tiempos de los comandos direccionados individualmente	36
3.6	Arquitectura del sistema de adquisición de ALICE	37
3.7	Arquitectura del enlace de datos del detector	37
3.8	Encabezado del formato común de datos	39
3.9	Diagrama a bloques del sistema de control de ALICE.	43
3.10	Comandos (FECMDs)	45
3.11	Transferencia de una palabra de control	46
3.12	Estructura de la palabra de estados	46

3.13	Transferencia de palabras de estado	47
3.14	Diagrama de tiempos de una transmisión de datos.	48
3.15	Diagrama de tiempos de una transmisión de datos.	48
3.16	Diagrama de tiempos de una transmisión de datos.	49
3.17	Flujo de control de la comunicación SIU-FEE.	49
3.18	Control de flujo de información (FEE-SIU)	50
4.1	Diagrama a bloques de la tarjeta principal de ACORDE	55
4.2	Diagrama esquemático del bloque <i>TTCrx_Decoder</i> "	56
4.3	Máquina de estados finitos correspondiente al módulo "decoder_TTCrx".	57
4.4	Diagrama esquemático del módulo de "FEE_SIU_Interface"	58
4.5	Máquina de estados finitos correspondiente al módulo "FEE_SIU_Interface"	59
4.6	Diagrama Esquemático del módulo "FEECMDS & Configuration"	61
4.7	Máquina de estados finitos correspondiente al módulo "FEECMDS & Configuration"	62
4.8	Diagrama esquemático del módulo "Feeresetn"	62
4.9	Máquina de estados finitos correspondiente al módulo "Feeresetn"	64
4.10	Diagrama esquemático del módulo "decoder_L0"	64
4.11	Máquina de estados finitos correspondiente al módulo "decoder_L0"	64
4.12	Diagrama esquemático del módulo "EventGenerator"	65
4.13	Diagrama esquemático del módulo "BusyGenerator"	66
4.14	Máquina de estados finitos correspondiente al módulo "BusyGenerator"	66
4.15	Diagrama esquemático del módulo "TriggerGenerator"	67
5.1	Diagrama a bloques del proceso de simulación del módulo (TTCrx_ Decoder	69
5.2	Proceso de adquisición del primer dato enviado por el CTP (Bunch_ID).	70
5.3	Procesamiento del mensaje de disparo L2A.	70
5.4	Procesamiento del mensaje de la region de interes (RoI).	71
5.5	Procesamiento del mensaje L2r.	71
5.6	Diagrama a bloques del proceso de simulación del módulo (L0-L1- Decoder & Busy).	72
5.7	Proceso de decodificación de los disparos "L0 y L1" y manejo de la señal de "Busy"	73
5.8	Proceso del manejo de la señal de "Busy" a la llegada de un disparo "L2r".	74
5.9	Diagrama a bloques del proceso de simulación del módulo (FEE_SIU_Interface).	74
5.10	Transmisión (SIU-FEE) de un comando de configuración.	75

5.11 Transmisión (FEE-SIU) de una palabra de estado.	76
5.12 Inicio del proceso de transmisión de información.	77
5.13 Fin del proceso de transmisión de información.	78
5.14 Inicio del proceso comunicación (FPGA1-FPGA2).	78
5.15 Fin del proceso de comunicación (FPGA1-FPGA2).	79
5.16 Proceso de comunicación (FPGA2-FPGA1).	79
5.17 Biagrama a bloques del proceso global de simulación del sistema de ACORDE.	81
5.18 Resultados del proceso global de simulación del firmware de ACORDE.	81
5.19 Electrónica principal de ACORDE.	82
5.20 Configuración entre el LTU y ACORDE.	83
5.21 Monitoreo de las señales transmitidas entre CTP-ACORDE	84
5.22 Configuración de las base de datos de DATE.	85
5.23 ACORDE - Agente de control del detector.	85
5.24 ACORDE - Sistema de Adquisición de datos.	86
5.25 Visualización del flujo de información (CTP-ACORDE-DAQ).	86
5.26 Resultado del proceso de calibración del detector ACORDE.	87
5.27 Participación en las primeras "Global runs".	88
5.28 Resultado de la participación las primeras "Global runs".	90
5.29 Distribución de módulos impactados registrados por ACORDE (SL0).	90
5.30 Distribución de la multiplicidad registrada por los módulos de ACORDE (SL0).	91
5.31 Visualización de un evento con multiplicidad igual a 15 en la sesión de toma de datos.	91

Introducción

El experimento ALICE (A Large Ion Collider Experiment) es uno de los cuatro experimentos más importantes que se lleva a cabo en el LHC (Large Hadron Collider), este último se encuentra en el CERN (European Organization for Nuclear Research) situado en la frontera entre Francia y Suiza. El propósito principal de ALICE es explorar los fenómenos que se registran en las colisiones entre iones pesados a las energías que ha alcanzado el LHC del CERN para estudiar la física de las interacciones fuertes en la materia a energías que no se habían explorado antes. Es conformado por 18 detectores entre los cuales se encuentra ACORDE (ALICE COsmic Ray Detector) responsabilidad de la colaboración mexicana.

El desarrollo de detectores para la medición de diferentes variables cinemáticas, es muy importante para el estudio de la física de partículas. Un detector debe estar bien caracterizado para obtener el máximo provecho del mismo, uno de los objetivos que tiene el detector ACORDE es mandar una señal de nivel cero para los procedimientos de alineación y calibración de algunos detectores de trazas de ALICE. Otro de los objetivos del detector ACORDE es detectar eventos de muones atmosféricos en combinación de algunos otros detectores para llevar a cabo estudios de física de rayos cósmicos.

Desde mayo de 2006, ACORDE inició operaciones y ha funcionado de forma continua hasta Marzo de 2013. Se ha podido generar las señales de disparo "Single muón" y "Multicoincidencia" y enviarlas al sistema central de disparo de ALICE, para que este sistema la distribuya a los demás detectores de ALICE. Se ha participado en los periodos de toma de datos denominados "ALICE Cosmic Ray Run" de diciembre 2007, marzo 2008, mayo 2009 y de 2010 a 2013 con resultados satisfactorios para la colaboración ALICE.

Debido a las diversas actualizaciones en los diferentes detectores que componen al experimento ALICE, las nuevas decodificaciones del sistema central de disparo y a la actualización en la interfaz de comunicación con el sistema de adquisición de datos que se están realizando en ALICE durante el periodo LS1, es muy importante actualizar al sistema electrónico del detector ACORDE para poder participar durante la toma de datos en el periodo LHC-Run 2.

El presente trabajo reporta el diseño, implementación y verificación del sistema electrónico del detector ACORDE para la RUN-2 del LHC. El desarrollo del presente trabajo está desglosado de la siguiente forma: en el *capítulo 1* se pretende dar un panorama general de la física de partículas, se realiza una muy breve explicación del modelo estándar y se hace un acercamiento a la física de los rayos cósmicos y a los detectores de partículas. El *capítulo 2* muestra un panorama general del acelerador LHC y de los detectores que componen al experimento ALICE haciendo énfasis en el detector ACORDE, así mismo, se muestran las características principales del detector ACORDE, sus objetivos y metas a alcanzar. En el *capítulo 3* se hace una profunda revisión y análisis de los diferentes protocolos de comunicación y sistemas de control que maneja el sistema central de disparo y el sistema de adquisición de

datos de ALICE. En el *capítulo 4* se presenta a detalle el diseño del sistema electrónico del detector ACORDE, haciendo hincapié en cumplir cada una de los requerimientos analizados en el capítulo 3. Finalmente en el *capítulo 5* se muestra la simulación de un proceso de adquisición de datos con el nuevo sistema, la verificación del correcto funcionamiento en pruebas del laboratorio e integración con el sistema global de ALICE. Para concluir a lo largo del *capítulo 6* se presenta una discusión y conclusión de los resultados obtenidos en este trabajo de tesis.

CAPÍTULO 1

Física de partículas

1.1 Partículas elementales

El hombre desde la antigüedad ya imaginaba que el universo estaba compuesto de varios elementos tales como agua, tierra, fuego, aire. En los siglos IV y V a.c. la teoría griega acerca del átomo introducía sin base experimental, objetos idénticos e indivisibles llamados *átomos*. Así nace la noción del átomo como una especie de elementos indivisibles que formaban toda la materia lo que hoy sabemos que tal noción, no es verdad.

A través de los años, las partículas consideradas como fundamentales han ido cambiando y esto ha estado siempre aunado al desarrollo de experimentos, el gran avance tecnológico del siglo XX ha permitido profundizar el estudio de las partículas y sus interacciones.

El origen de la física de partículas, se remonta al año 1897 cuando por primera vez se explicó la naturaleza de los llamados rayos catódicos. Actualmente sabemos que estos tipos de rayos en realidad son un flujo de electrones, Joseph John Thomson les dio el nombre de corpúsculos y llamó electrón a su correspondiente carga, posteriormente se adoptaría el nombre de partícula. Además él midió por primera vez la relación carga-masa de los electrones, por lo cual se considera la primera partícula descubierta. A este descubrimiento le siguieron una serie de modelos propuestos para describir la estructura interna del átomo. El mismo Thomson propuso un modelo en 1904 (Panqué de pasas), como sabía que la masa de un electrón es de $(9.1 \times 10^{-31} Kg)$ él se imaginó que el panqué correspondía a una carga positiva cuyo valor es Ne , la cual le contribuía en mayor medida a la masa del átomo y por otro lado los electrones serían las pasas, cuya carga total de igual forma es Ne pero negativa, así lograba que el átomo fuera neutro; sin embargo este modelo era ineficiente al describir los espectros de la luz observados cuando los átomos eran excitados. Tiempo después Ernest Rutherford, Marsden y Geiger realizaron un experimento el cual consistía en: bombardear una fina lámina de oro con partículas α y medir el ángulo de dispersión de dichas partículas, los resultados de dicho experimento demostraron que la mayoría de las partículas no se defleca y algunas son deflectadas a ángulos incluso mayor a los 90° . Basando sus argumentos en estas evidencias experimentales, en 1911 Rutherford explicó que la carga positiva está concentrada

en el centro e investigó sobre la dispersión debida a la fuerza de coulomb, con la cual se explicaba el comportamiento de las partículas α . Siguiendo con el descubrimiento de las partículas, la siguiente fue el protón. Rutherford propuso un modelo semejante al planetario para explicar el comportamiento del átomo, en este caso los electrones (planetas) se encuentran en órbitas y el núcleo positivo (sol) en el centro. Los electrones al girar emiten fotones de una energía definida, esto explicó en un principio la naturaleza discreta del espectro observado. Sin embargo, de la mecánica clásica se conoce que cuando un electrón emite fotones está perdiendo energía, entonces en algún momento radían toda su energía colapsándose al núcleo del átomo, situación que evidentemente no pasa ya que de ser así el átomo no sería estable. En 1914, Niels Bohr fue capaz de calcular el espectro del átomo de hidrógeno, y así dar origen a la siguiente pregunta ¿ es posible explicar los demás elementos?. Además dicha teoría indicaba que el peso del helio debería ser dos veces el del hidrógeno, el del litio tres veces y así sucesivamente; sin embargo el helio pesa cuatro veces más y el litio siete veces más. Esta aparente misterio fue resuelto por Chadwick en el año 1932, con el descubrimiento del neutrón.

1.2 Modelo estándar

El Modelo Estándar (ME) es una teoría de la física que explica las interacciones entre las partículas subatómicas, en la que se incluyen tres de las cuatro fuerzas fundamentales; la fuerza electromagnética, la fuerza nuclear débil y la fuerza nuclear fuerte, la fuerza gravitacional queda excluida de esta teoría, siendo esto uno de los problemas que se intentan resolver hoy en día. El ME se comenzó a desarrollar a mediados del siglo XX por un amplio grupo de científicos al rededor de todo el mundo.

Tres generaciones
de la materia (fermiones)

	I	II	III	
masa →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
carga →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
espín →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nombre →	u arriba	c encanto	t cima	γ fotón
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Quarks	d abajo	s extraño	b fondo	g gluón
	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e neutrino electrónico	ν_μ neutrino muónico	ν_τ neutrino tauónico	Z^0 bosón Z
Leptones	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e electrón	μ muón	τ tauón	W^\pm bosón W

Bosones de gauge

Figura 1.1: Partículas del Modelo Estándar

Fue a principio de los años 60 cuando Sheldon Lee Glashow propuso una forma de unificar las fuerzas electromagnética y débil en una misma estructura. Mas tarde a finales de esa misma década, con trabajos en el tema por parte de Steven Weinberg y Abdus Salam se incorporó el mecanismo de Higgs a la teoría de Glashow. En este punto se contaba con la base de lo que hoy se conoce como "Modelos Estándar" ó la "Teoría de casi todo" debido a su gran éxito en la predicción de algunos constituyentes del modelo y parámetros con gran exactitud, sin embargo aun hay varios aspectos importantes como lo es la existencia de masa oscura y energía oscura, o la diferencia en masa de los constituyentes elementales de la teoría que no son explicados por la misma; por otra parte una partícula es considerada fundamental cuando no tiene estructura interna y en ese sentido es una partícula puntual. Estas partículas pueden ser de dos tipos, *bosones de norma* y *fermiones*.

Los fermiones son partículas de espín 1/2, se dividen a su vez en dos tipos: *quarks* y *leptones*, estos son los bloques fundamentales que conforman a toda la materia y por ello son denominados partículas materiales. Cada partícula material tiene su antipartícula, si la partícula es cargada su antipartícula posee el mismo espín y masa pero carga opuesta. Para partículas neutras, en algunos casos su antipartícula es ella misma.

En la figura 1.1 se observa que el electrón e , múon μ y tau τ son leptones y tienen carga eléctrica negativa y entera¹, cada uno de ellos pertenece a una familia diferente indicada con números romanos en la parte superior de las columnas, estas familias se clasifican según la masa que tienen las partículas desde las más ligera a la más pesada. A diferencia del electrón, el múon y el tau son partículas inestables, su tiempo de vida es de $2.2 \times 10^{-6}s$ y 2.9×10^{-13} respectivamente. Los otros tres leptones ν_e , ν_μ y ν_τ son los neutrinos respectivos a e , μ y τ , se sabe que tienen masas muy pequeñas y carga eléctrica nula, actualmente siguen en investigación. Los neutrinos fueron propuestos en el año de 1930 por Pauli, quien explicó el decaimiento β .

A mediados de 1960, el desarrollo de las computadoras unido a los experimentos existentes en esa época permitió el descubrimiento de una gran cantidad de partículas; con ello surgió el modelo de quarks propuesto por *Gell-Mann* e independientemente por *Zweig*. Como se muestra en la figura 1.1, hay seis quarks diferentes (arriba, abajo, encanto, extraña, cima, abajo).

Los quarks tienen carga de color, la cual puede ser de tres tipos (azul, verde y rojo) pero esta características no se observa en la naturaleza debido a que los quarks están confinados en partículas llamadas hadrones, cuya carga de color es neutra. Los hadrones se clasifican en *bariones*, compuestos por tres quarks, y en *mesones* los cuales son bosones, compuestos por un quark y un antiquark, Los bosones de norma son partículas portadores de cada una de las fuerzas fundamentales antes mencionadas, cuyo espín es $s = 1$.

El fotón γ , es la partícula intercambiada en las interacciones electromagnéticas. Los 8

¹Carga entera esta en términos de la carga del electrón $1.602 \times 10^{-19}C$

gluones g_α ; $\alpha = 1, \dots, 8$ median las interacciones fuertes entre los quarks y los 3 bosones W^\pm , Z son los mediadores en las interacciones débiles. Se sabe que la fuerza electromagnética tiene un alcance infinito debido a que le corresponde un bosón sin masa, mientras que el corto alcance de las interacciones débiles cercano a 10^{-6}cm . corresponde al intercambio de un bosón de norma cuya masa es cercana a 100GeV . Por último, el rango de alcance de las interacciones fuertes no es infinito aunque los bosones de norma correspondientes carecen de masa, ya que éstos se encuentran confinados, es por ello que su alcance es finito con un valor cercano a 10^{-13}cm , el cual corresponde al tamaño típico del hadrón más ligero.

1.3 Rayos Cósmicos (Historia)

A finales del siglo XIX se observó que los electroscopios ² que previamente habían sido cuidadosamente aislados, sufrían algunas pequeñas pérdidas de carga eléctrica. Las cuales se atribuyeron a alguna radiación penetrante, que no cabía identificar como procedente de ningún elemento radioactivo conocido. En 1912 V.F. Hess y otros científicos detectaron dichas radiaciones en globos aerostáticos a una altura de 5200 metros, pusieron de manifiesto no sólo la existencia de esas radiaciones sino además que su intensidad aumentaba con la elevación respecto a la superficie de la tierra.

Las mediciones fueron repetidas en 1914 por W. Kolhörster, pero esta vez hasta alturas de 9 Km sobre el nivel del mar ratificando los resultados de Hess.

Cabe mencionar que por el descubrimiento de la radiación cósmica, Hess compartió en 1936 el premio Nobel junto con Carl Anderson, quien descubriera el *positrón* con la ayuda de la radiación cósmica hacia 1932. Así mismo otros premios Nobel en los que se han visto involucrados los rayos cósmicos fueron otorgados en 1950 a Cecil Powel por el descubrimiento del *pión* cargado realizado en 1947, además del otorgado a Patrick Blackett en 1948 por el desarrollo de la cámara de niebla.

Previo al descubrimiento del pión, en 1937 se hizo el descubrimiento de la primera partícula de distinta naturaleza a la que presentaba el protón, neutrón y electrón, conocidos y estudiados hasta ese entonces. J.C. Street y E.C. Stevenson determinaron la masa y propiedades de una misteriosa partícula observada con anterioridad por Anderson y Seth H. Neddermeyer y que no pudieron identificar. Esta partícula cuya masa la estimaron de aproximadamente doscientas veces mayor a la del electrón fue denominada de diversas formas tales como *barión*, *yukón*, *mesotrón*, y *mesón*. En la actualidad, dicha partícula es el *múon* (μ). Ayudados con la técnica de emulsiones nucleares retomadas y desarrolladas por Cecil F. Powell, hacia el año de 1947, en experimentos de alta montaña realizados en el Laboratorio de Chacaltaya, cerca de la Paz, Bolivia, Cesare M.G. Lattes, Giuseppe Occhialini y Powel llegaron al descubrimiento del *pión* cargado. Dicho pión había sido propuesto en 1935 por Hideki Yukawa como portador de la interacción nuclear fuerte. Por el descubrimiento del pión y el desarrollo de la técnica de emulsión nuclear, Powell fue galardonado por el premio Nobel en 1950.

²Dispositivo que permite la producción de iones

En conferencia de rayos c3smicos en el a1o 1953, se llevo a cabo la clasificaci3n de una serie de part3culas descubiertas con el estudio de los rayos c3smicos. Unas part3culas denominadas mesones pesados descubiertas por Bristol en 1949 y cuya masa est1 entre la del pi3n y el prot3n. Estos son lo que hoy conocemos como *Kaones*. Las otras part3culas fueron descubiertas en 1947 y fueron bautizadas como *hiperones* por su masa superior a la del prot3n. Entre estos est1n las part3culas Λ y Σ^+ . En 1954 se registraron dos eventos que se sospech3 pudieran corresponder a *antiprotones*, pero su existencia no fue confirmada sino hasta 1956 con el uso de aceleradores.

En 1971 se dio el que posiblemente fuera el 3ltimo descubrimiento de part3culas con rayos c3smicos, ya que un grupo japon3s report3 un nuevo tipo de part3cula que pod3a ser considerado como el mes3n Encanto.

1.3.1 Cascada de rayos c3smicos

En 1938 el f3sico frances Pierre Auger, al trabajar con contadores Geiger en coincidencia, pudo ver que pod3a detectar se1ales de contadores apartados hasta por 75 metros. Concluy3 que 3stos no eran eventos aislados y que por lo tanto se trataba de una cascada de part3culas cargadas que deb3an haber sido producidas por alguna part3cula primaria. De hecho, una vez hecho el an1lisis, se estim3 que la energ3a de las part3culas primarias deber3a ser del orden de 10^{15} eV. A la cascada de part3culas producidas por rayos c3smicos se les denomina *Chubascos Atmosfericos* (EAS)³.

En d3cadas recientes, las EAS originadas por colisiones de protones y n3cleos en la atm3sfera han sido estudiadas mediante extensos arreglos experimentales sobre la superficie y de nuestro planeta y bajo de ella.

Un rayo c3smico primario tendr1, en promedio, su primer interacci3n con un n3cleo de aire a 20 Km sobre la superficie terrestre, comenzando una cascada electromagn3tica y hadr3nica la cual se desarrolla en una densidad aproximada de 1000 g/cm². Los fotones, electrones y muones son las part3culas dominantes que llegar1n a la superficie; bajo tierra 3nicamente los muones no ser1n absorbidos por la roca. El flujo del rayo c3smico primario, como se ha medido por una variedad de experimentos en d3cadas recientes, se puede observar en la figura 1.2.

Los rayos c3smicos primarios principalmente est1n compuestos por electrones, protones, n3cleos de helio, carb3n, hierro y ox3geno. Por otra parte, los rayos c3smicos secundarios (resultado de la interacci3n de los primarios con el gas interestelar) se componen por n3cleos de litio, berilio y boro en menor medida.

Un rayo c3smico primario es detectado a trav3s de una cascada de part3culas creadas por su interacci3n con un n3cleo de la atmosfera,(ver figura 1.3). Las part3culas que forman la EAS pueden ser detectados con distintos tipos de detectores de part3culas, generalmente

³Extensive Air Shower en ingl3s

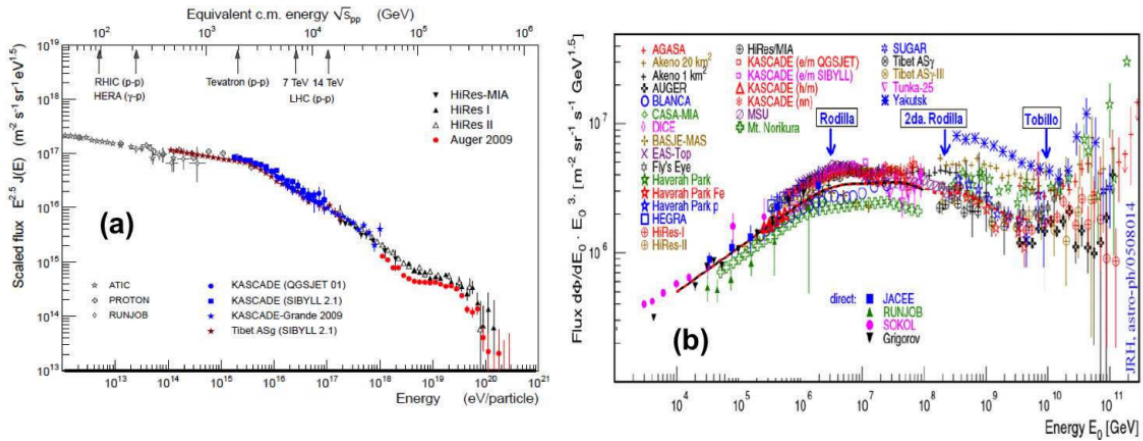


Figura 1.2: Espectro de energa de los rayos c3smicos primarios medidos por varios experimentos)

basados en la ionizaci3n de la materia o en el efecto Cherenkov.

De la figura 1.3, podemos observar que las cascadas de rayos c3smicos est3n caracterizadas por la componente electromagn3tica y mu3nica a nivel de la superficie terrestre y por distribuciones de muones a diferentes profundidades de la misma.

Como se ha mencionado anteriormente, una cascada atmosf3rica se genera cuando un rayo c3smico primario interactúa con las mol3culas de aire en la atm3sfera. El n3cleo de la cascada es de tipo hadr3nico, el cual funge como una fuente colimada de sub cascadas electromagn3ticas, generadas principalmente de los decaimientos de tipo $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$. Los electrones y positrones son partculas que se encuentran en mayor abundancia dentro de la cascada. El n3mero de muones, producidos por el decaimiento de mesones cargados, es de un orden de magnitud menor. La extensi3n de las cascadas atmosf3ricas es grande a nivel de la superficie terrestre, por lo cual, arreglos de detectores que funcionan por largos periodos de tiempo son muy 3tiles para el estudio de los rayos c3smicos con energías primarias mayores a 100 TeV .

Los muones son las partculas cargadas que llegan m3s frecuentemente a nivel del mar. La mayoría de los muones se producen a una altura de 15 kil3metros y pierden alrededor de 2 GeV debido a la ionizaci3n antes de alcanzar la superficie.

Para la detecci3n de cascadas atmosf3ricas, se han desarrollado varias t3cnicas y tipos de detectores. La medici3n precisa del espectro de energa de los rayos c3smicos, en particular, de la composici3n qu3mica del rayo c3smico primario en una vecindad de la rodilla (en el rango de 10^{15} y 10^{17}) pueden brindar un conocimiento del origen del rayo c3smico y por lo tanto del mecanismo de aceleraci3n. Esta composici3n es conocida directamente de las mediciones

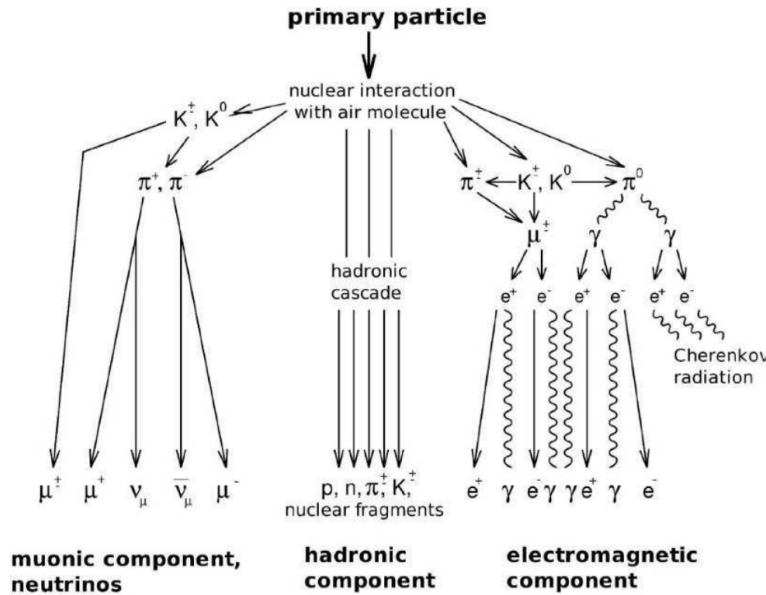


Figura 1.3: Vista esquemática del desarrollo de una cascada EAS (Extensive Air Shower)

realizadas por satélites y globos, pero solo para energías por debajo de 10^{14} eV. Para altas energías éstos deben ser estudiados por grandes detectores de superficie o bajo tierra. La determinación de la partícula primaria depende fuertemente de un entendimiento detallado de los mecanismos de interacción para las cascadas de partículas con el aire. La producción de partículas, tanto a altas energías como en la dirección frontal, hoy en día puede ser estimada por la extrapolación de aquellos modelos basados en datos provenientes de los aceleradores.

1.4 Detectores de partículas

Los detectores de partículas son dispositivos que permiten medir las características y propiedades de la interacción de las partículas con la materia, basándose en tales efectos se han desarrollado diversos tipos de detectores que permiten realizar medidas cuantitativas de sus trayectorias, tiempo de vida, energía o la identificación de su naturaleza por mencionar solo algunas. Existen tres tipos básicos de detectores de partículas de acuerdo con los principios físicos sobre los que se sustentan: *detectores de centelleo*, *detectores de estado sólido* y *detectores de ionización*. En muchos casos, el detector debe responder a las características particulares del experimento en el que se utilice, construyéndose con las especificaciones correspondientes; pero los principios físicos sobre los que se fundamentan son los mismos.

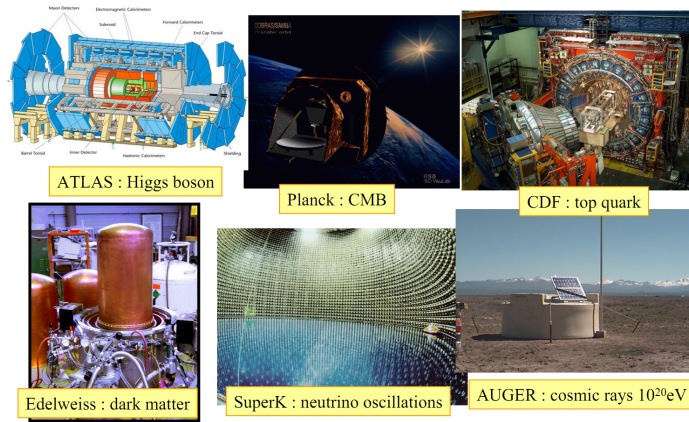


Figura 1.4: Variedad de detectores.

1.4.1 Propiedades Generales de los detectores

Resolución en Energía

Algunas aplicaciones de los detectores tienen como objetivo medir la distribución de energía de la radiación incidente. Se trata de la *espectroscopía* de radiación. Una de las principales propiedades que caracterizan a los detectores de radiación es su capacidad para discriminar entre sucesos de energías distintas. Para un detector ideal el espectro de energía correspondiente a la respuesta a un haz de radiación monoenergética sería una línea vertical, o punto en el espectro de energía, conteniendo todos los sucesos detectados. En realidad, como consecuencia de la naturaleza estadística de la desintegración radioactiva y del fenómeno de detección, esta línea se ensancha adoptando una forma que depende de la naturaleza de la radiación, y del tipo de detector, así como otros factores, entre ellos el que juega un papel muy importante, es la posición geométrica del detector.

Generalmente, el espectro de tales líneas tienen forma de campana Gaussiana, un poco deformada y la resolución de un detector se acostumbra a definirse como el ancho, a la mitad de su altura, de una línea monoenergética, habitualmente expresada como FWHM⁴; como se muestra en la Figura 1.5

Es inmediato observar que cuanto sea mejor la resolución de un sistema (o, lo que es lo mismo, menor sea el FWHM) tanto más capaz será el sistema de discriminar entre sucesos de energías cercanas pudiendo en muchos casos, variar la información espectral enormemente.

Formalmente, se define la resolución en energía como:

$$R = \frac{FWHM}{H_0} \quad (1.1)$$

donde *FWHM* representa el ancho de la distribución medida a la altura media del Pico y H_0 ,

⁴ Full Width at Half Maximum

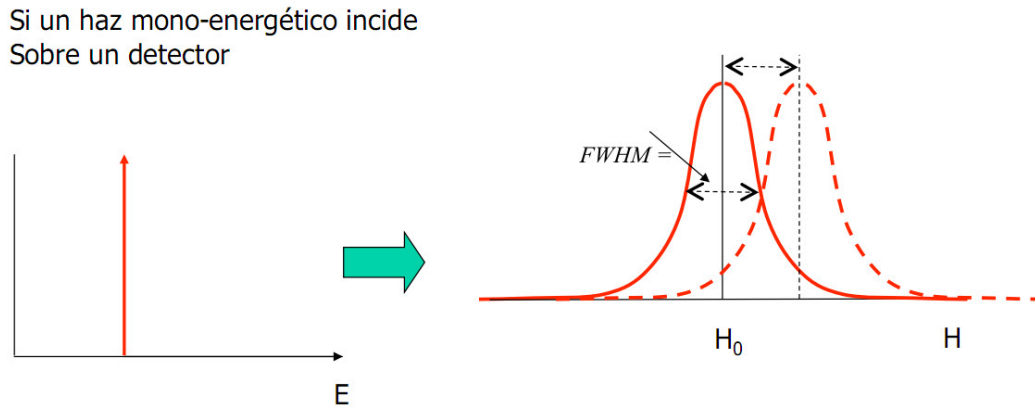


Figura 1.5: Medida de la resolución en Energía

el centro de la misma vease la Figura 1.5.

Existen diversas fuentes de ruido que provocan las fluctuaciones en la respuesta del detector, entre ellas las más comunes son: el ruido aleatorio intrínseco al propio detector, el ruido estadístico y cualquier desviación de las condiciones de medida durante la misma, y constituye la fuente más importante de fluctuaciones y se debe a la naturaleza discreta de la propia señal, por lo tanto siempre existirá una fuente mínima e irreducible de ruido, no importa cuanto se mejore el sistema del detector.

Como se puede apreciar, la resolución de un sistema de medida no depende solamente del detector, sino también del sistema electrónico de análisis de impulsos, de las características del haz de radiación incidente, como por ejemplo. El espesor de la fuente radioactiva que se mide, y de las condiciones geométricas de la medida. Por consideraciones estadísticas puede deducirse que un detector tendrá mejor resolución cuanto mayor sea el número de sucesos individuales, (fotones en un centellador) que genere.

Eficiencia del Detector

La eficiencia de detección es el segundo parámetro importante para caracterizar a un detector. Y se define como la relación entre el número de pulsos registrados por el detector y el número de partículas emitidas por la fuente de radiación.

$$\epsilon = \frac{n^{\circ} \text{ de pulsos registrados}}{n^{\circ} \text{ de partículas incidentes}} \quad (1.2)$$

La eficiencia depende de la naturaleza de la radiación que se mide, el tipo de detector que se utiliza y de la posición geométrica del sistema (*distancia fuente-detector y tamaño del detector principalmente*).

Se define también la eficiencia intrínseca como el número de pulsos registrados por el detector en relación al número de partículas que llegan al mismo.

La eficiencia intrínseca depende principalmente del material del detector, de la energía de la radiación incidente y del grosor del detector en la dirección de incidencia de la radiación como se muestra en la Figura 1.6.

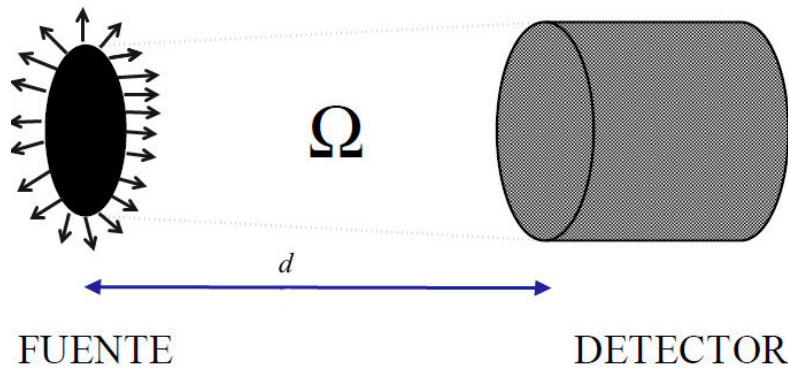


Figura 1.6: Eficiencia de detección

Ambas eficiencias están relacionadas a través de la ecuación 1.3

$$\epsilon_{int} = \epsilon \frac{4\pi}{\Omega} \quad (1.3)$$

donde Ω es el ángulo del detector visto desde enfrente.

En general se deduce que, las partículas cargadas tienden a ser detectadas con mayor eficiencia que los fotones, debido a la mayor capacidad de penetración de éstos, se requerirían detectores de volumen muy grandes para alcanzar eficiencias cercanas a uno.

Es muy importante de disponer con detectores con un nivel de eficiencia elevado, sin embargo debido a la dificultad de diseñar detectores que “envuelvan” toda la muestra radioactiva (*condición necesaria para que $\epsilon \approx 1$*) unido a otras consideraciones, hacen poco probable que se disponga con un detector cuya eficiencia total se aproxime al 100%.

Tiempo Muerto

En cualquier sistema de detección con su electrónica asociada, es necesario que transcurra cierto tiempo entre dos eventos consecutivos para que puedan ser registrados como procesos independientes. Esta separación mínima entre sucesos se denomina **tiempo muerto** del detector. En muchas de las veces este efecto se debe al propio detector y otras a la electrónica

asociada al mismo.

Atendiendo su comportamiento, los sistemas de medida se clasifican según dos grandes grupos: *de tiempo muerto no extensible* y *de tiempo muerto extensible*. En los sistemas de tiempo muerto extensible, la llegada de un suceso antes de que haya transcurrido el intervalo de tiempo (τ) provoca una paralización del sistema durante otro tiempo τ , por el contrario, en los sistemas de tiempo muerto no extensible, la llegada de sucesos durante el intervalo τ no aumenta, como se muestra en la Figura 1.7.

Dada la naturaleza aleatoria de los decaimientos radioactivos siempre existe la probabilidad de perder eventos verdaderos debido a que tienen una separación mínima respecta del evento anterior. Estas pérdidas por el tiempo muerto son muy significativas a altas tasas de recuento y se debe tener muy en cuenta las medidas pertinentes para corregir el efecto.

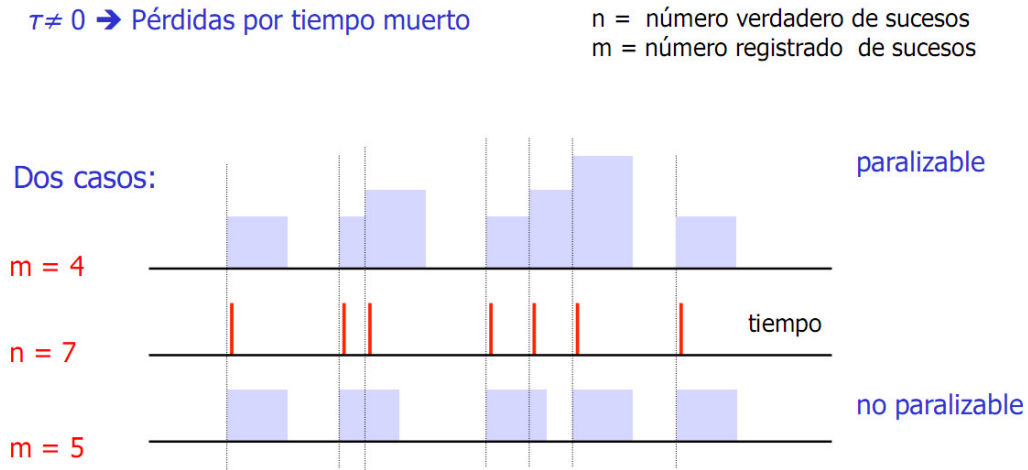


Figura 1.7: **Tiempo de Muerto**

1.4.2 Detectores de Centelleo

Los detectores de centelleo, en la actualidad es uno de los mecanismos más ampliamente usados en la física nuclear y de partículas ya que hacen uso de la propiedad de ciertos materiales. Cuando una partícula cargada o un fotón de radiación X o gamma atraviesan ciertas sustancias luminiscentes, pierden energía en excitar su luminiscencia, dando lugar a la emisión de luz visible o ultravioleta. Esta luz resultante puede alcanzar el cátodo de una fotocélula suficientemente sensible, resultando un impulso eléctrico en respuesta a la llegada de cada partícula nuclear cargada o fotón (el conjunto constituye un detector de centelleo), como se muestra en la Figura 1.8. El detector de centelleo consta, por consiguiente, de dos órganos fundamentales: la sustancia luminiscente y la fotocélula, que es en general un tubo fotomultiplicador o un fotodiodo. El conjunto se monta dentro de una envoltura opaca a la luz natural, pero a través de la cual pueda penetrar la radiación a detectar.

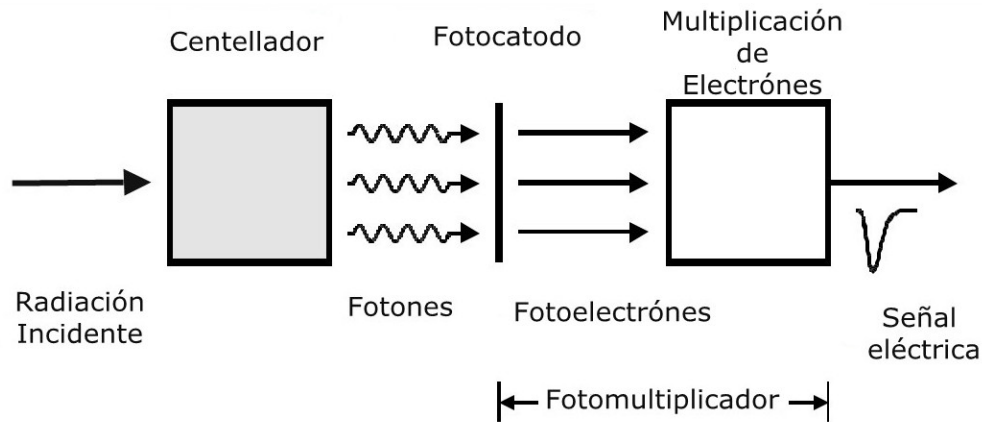


Figura 1.8: Proceso de detección centellador y PMT

Las características fundamentales de los detectores de centelleo son su alta eficiencia de detección y la gran rapidez de respuesta. Son muy utilizados para detección y análisis de radiaciones nucleares, sobre todo para la medida de la energía de radiación gamma, donde las cámaras de ionización y los contadores proporcionales no resultan adecuados por la poca densidad de la masa gaseosa empleada en la detección.

Plásticos Centelladores

Son soluciones de centelladores orgánicos en un solvente el cual polimeriza a un sólido. Los solventes plásticos mas ampliamente usados son el *pliviniltolueno* y el *pliestireno*. Estos ofrecen una señal de salida muy rápida con una constante de decaimiento entre y 2 y 3ns y una alta emisión de luz, además son fácilmente moldeables por lo que se pueden construir de cualquier forma deseada.(cilindros, paletas⁵ varas, planos, pequeñas películas, etc.). Son los mas ampliamente usados, y generalmente tienen buena resistencia, pero pueden ser fácilmente dañados por solventes orgánicos como la acetona.

1.5 Fotomultiplicador

Los fotomultiplicadores son dispositivos de detección de luz que convierte la luz recibida en un señal eléctrica medible. La gran ventaja del fotomultiplicador sobre otros detectores luminosos es la amplificación por emisión secundaria, y se pueden conseguir factores de multiplicación desde 10^3 hasta 10^9 . Además, en fotomultiplicadores rápidos se pueden conseguir respuestas del fotomultiplicador con tiempos de subida menores de un nanosegundo. En la actualidad los fotomultiplicadores son utilizados en varias disciplinas como Biología, Medicina, Bioquímica, Medio Ambiente, Fotografía, Astronomía, etc.

⁵De esta forma estan contruidos, con los que hacemos las pruebas pertinentes

1.5.1 Principio de Funcionamiento

Dentro de un fotomultiplicador los elementos esenciales son los siguientes:

- El fotocátodo, encargado de convertir el flujo luminoso en un flujo de electrones. Estos electrones producidos por efecto fotoeléctrico se conocen por fotoelectrones para remarcar su origen fotoeléctrico, en oposición a los otros electrones que se originan por emisión secundaria en los dínodos.
La eficiencia de la conversión, que se conoce como la sensibilidad del fotocátodo, varía con la longitud de onda de la luz incidente. Esta relación entre la sensibilidad del fotocátodo y la longitud de onda se llama característica de respuesta espectral.
- El sistema de focalización, encargado de acelerar y dirigir los fotoelectrones hacia la cadena de amplificación.
- La cadena de amplificación, consiste en una serie de electrodos de emisión secundaria que reciben el nombre de dínodos. Existen varios tipos principales de estructuras de dínodos. Las características de cada tipo son:
 1. Tipo de enfoque lineal: tiempo de respuesta rápido, alta linealidad de pulso.
 2. Tipo caja y reja: buena eficiencia de colección, buena uniformidad.
 3. Caja tipo enfoque lineal: buena eficiencia de colección, buena uniformidad, bajo perfil.
 4. Tipo jaula circular: tiempo rápido de respuesta, compacto.
 5. Tipo de periana veneciana: buena uniformidad, corriente de salida grande.
 6. Tipo de malla fina: Alta inmunidad a campos magnéticos, buena uniformidad, alta linealidad en el pulso, posible detección de posición.
 7. Malla tosca: Inmunidad a campos magnéticos, alta linealidad de pulso, posible detección de posición.
 8. Tipo canal de metal: Construcción de dínodos compacto, tiempo rápido de respuesta, posible detección de posición.

También han sido desarrollados los dínodos híbridos que combinan dos tipos de ellos. Estos se diseñan para sumar los méritos de cada uno de los tipos de dínodos usados.

- El ánodo, es el último de los dínodos que constituyen al fotomultiplicador, su salida es la corriente fotoeléctrica del fotocátodo más la ganancia por eso se dice que la corriente fotoeléctrica es proporcional a la intensidad de luz incidente. La ganancia se determina por el voltaje aplicado en los divisores de voltajes específicos.

Los fotoelectrones emitidos de un fotocátodo son acelerados por un campo eléctrico que los hace colisionar con el primer dínodo y producir una emisión de electrones secundaria. Estos electrones secundarios luego chocan con los próximos dínodos para

producir emisión electrónica secundaria adicional. Reemitiendo este proceso sobre los dínodos sucesivos (proceso de cascada), se obtiene una alta ganancia. Así una pequeña corriente fotoeléctrica del fotocátodo se puede ver como una corriente de salida grande en el ánodo del fotomultiplicador.

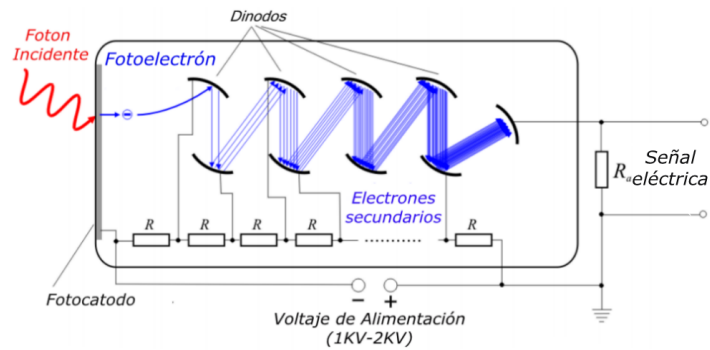


Figura 1.9: **Tubo Fotomultiplicador**

CAPÍTULO 2

ACORDE (Detector de Rayos Cósmicos de ALICE)

2.1 Gran colisionador de hadrones (LHC)

El LHC es el acelerador de partículas mas grande construido hasta nuestros días. Construido por el centro europeo para investigación nuclear (CERN). Es un anillo de 27 Km, se encuentra en el mismo túnel donde el experimento LEP (Large Electron-Positron Collider) solía estar, entre 40 y 100 metros bajo tierra. La energía que se espera alcanzar es de 14 TeV y una luminosidad de $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para protones y 11.5 TeV para iones pesados con una luminosidad de $10^{27} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, en la Tabla 2.1 se aprecian diversas especificaciones del experimento.

El acelerador está conformado por dos anillos sincrotón que hacen girar protones (iones) en sentidos opuestos haciéndoles colisionar en 4 puntos distintos de la circunferencia. Como se observa en la figura 2.1 diametralmente opuestos se encuentra ATLAS¹ y CMS², dos experimentos multi propósito que abarcan temas desde el Higgs hasta dimensiones extras y materia oscura. Los otros dos experimentos y puntos de interacción se encuentran a ambos lados de ATLAS a una distancia de 3.5 Km. cada uno. Estos experimentos son ALICE³ cuyo propósito es estudiar las colisiones de iones pesados entre otras cosas, y finalmente LHCb⁴ que tiene como objetivo el estudio de la física del quark b así como la violación de la simetría CP.

2.2 Experimento ALICE

El propósito general del experimento ALICE (A Large Ion Collider Experiment) es estudiar las colisiones de iones pesados que ocurren dentro del acelerador LHC, enfocándose principalmente en fenómenos de QCD en un medio de materia de confinada. Se diseñó principalmente para

¹A Toroidal LHC ApparatuS

²Compact Muon Solenoid

³A Large Ion Collider Experiment

⁴Large Hadron Collider beauty

2.ACORDE (Detector de Rayos C3smicos de ALICE)

2.2 Experimento ALICE

Circunferencia	[m]	26.659
Campo dipolar magn3tico	[T]	8.4
N3m de magnetos		9593
N3m de dipolos		9593
Energ3a por haz de protones	[TeV]	7
Energ3a por haz de iones	[TeV/u](energ3a por nucleon)	2.76
Luminosidad	[$cm^{-2} s^{-1}$]	10^{34}
Energ3a de inyecci3n en el LHC	[GeV]	450
Corriente por haz	[A]	0.54
Espacio entre paquetes de haces	[ns]([m])	25 (≈ 7)
N3m. de paquetes por haz de protones		2808
N3m. part3culas por paquetes de protones		1.15×10^{11}
N3m. de colisiones por segundo		6×10^8
Energ3a almacenada por haz	[MJ]	334
Tiempo de vida del haz	[h]	22
Tiempo de vida de la luminosidad	[h]	10
Perdida de energ3a por vuelta	[keV]	6.7
Potencia radiada por haz	[kW]	3.6
Temperatura de operaci3n	[K]([$^{\circ}C$])	1.9 (-271.3)

Tabla 2.1: Par3metros nominales del LHC

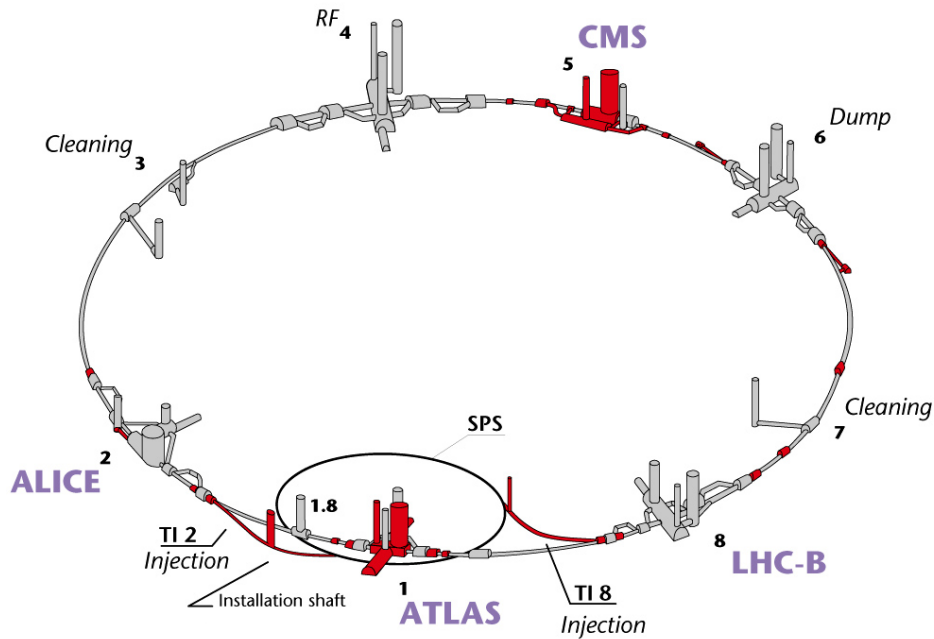


Figura 2.1: Gran Colisionador de Hadrones (LHC)

2.ACORDE (Detector de Rayos C3smicos de ALICE)

2.2 Experimento ALICE

analizar las interacciones fuertes de la materia y el plasma de quark y gluones a valores extremos de densidad de energa y temperatura en colisiones tipo n3cleo-n3cleo. Al mismo tiempo, los resultados de este experimento permitir3n tener un entendimiento m3s amplio del estudio de hadrones, electrones, muones y fotones producidos en colisiones de n3cleos pesados. Por otra parte el programa de f3sica de ALICE tambi3n contempla el estudio de colisiones entre iones ligeros a bajas energ3as.

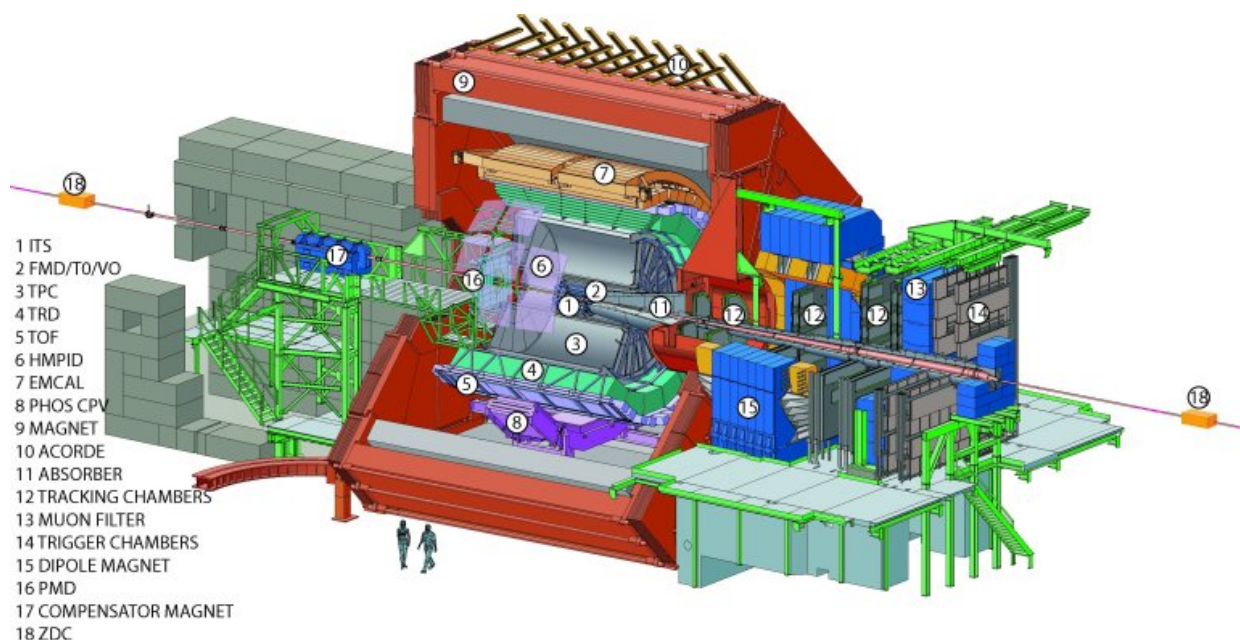


Figura 2.2: Esquema general del detector ALICE

El experimento ALICE (vea figura 2.2) ha sido dise1ado y construido por una colaboraci3n aproximada de 1300 personas provenientes de 120 institutos de 35 pa3ses de 4 continentes. La parte central consta de detectores cil3ndricos conc3ntricos en su mayor3a; tales como el sistema de trayectorias (ITS), la c3mara de proyecci3n en tiempo (TPC), el sistema que mide el tiempo de vuelo de las part3culas cargadas (TOF), detector tipo Cherenkov (HMPID), detectores de radiaci3n (TRD) y calor3metros electromagn3ticos (PHOS y EMCAL). Todos estos detectores, excepto el HMPID, EMcal y PHOS cubren totalmente el 3ngulo azimutal.

Por otra parte, ALICE posee un arreglo complejo de absorbentes: un gran dipolo magn3tico, y catorce c3maras planas de disparo para muones. Existen tambi3n varios detectores de menor tama1o a los antes mencionados: calor3metro a cero grados respecto al haz del LHC (ZDC), un detector para medir la multiplicidad de fotones (PMD), uno para medir la multiplicidad de part3culas en la regi3n frontal (FMD), detector de nivel tiempo cero (T0), detector de vertices (V0); estos detectores son usados como sistemas de disparo para diferentes tipos de configuraci3n y estudios (ayudan a caracterizar los eventos de colisiones

La medici3n bajo tierra de cantidades f3sicas en rayos c3smicos requiere de un conocimiento detallado del detector involucrado y de sus alrededores. Efectos f3sicos significantes debidos al material entre la superficie y el aparato incluyen p3rdida de energ3a en los muones y dispersi3n. Estos efectos deben ser simulados cuidadosamente para tener una buena reconstrucci3n de la informaci3n. Los aspectos relevantes del ambiente ALICE (vea fig 2.3) son:

- La estructura del sal3n principal bajo tierra, incluyendo t3neles y grandes estructuras met3licas.
- La composici3n de la roca bajo la superficie

2.4 Detector ACORDE

El detector ACORDE tiene un doble papel en el experimento ALICE, act3a como el sistema principal de disparo para muones atmosf3ricos, en combinaci3n con otros detectores de ALICE, detecta eventos multi-muones permitiendo estudios de rayos c3smicos en la regi3n de la rodilla ($\approx 3 \times 10^{15} \text{ eV}$) del espectro de energ3a de rayos c3smicos.

Los primeros en realizar estudios sobre rayos c3smicos fueron los experimentos *L3* y *ALEPH* ubicados en el colisionador LEP.

El detector ACORDE consiste de un arreglo de 60 m3dulos centelladores ubicados perpendicularmente al eje del haz sobre las tres caras superiores de magneto de ALICE. (ver fig 2.4).

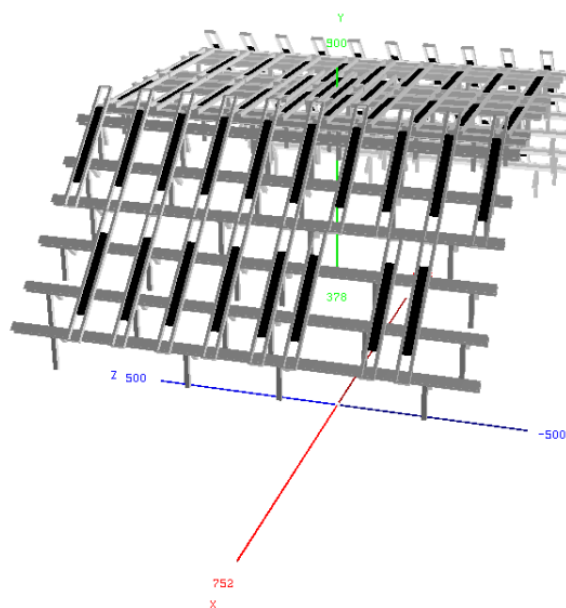


Figura 2.4: Configuraci3n del detector ACORDE

2.ACORDE (Detector de Rayos C3smicos de ALICE)

2.5 Electr3nica del detector ACORDE

Cada m3dulo consiste de dos pl3sticos centelladores superpuestos cada uno con un 3rea efectiva de 0.376 metros cuadrados. (ver fig 2.5).

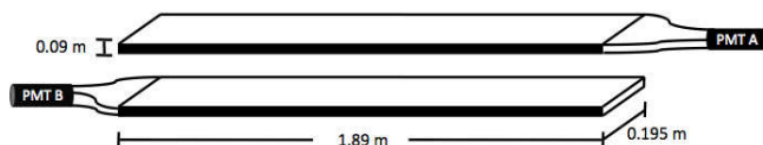


Figura 2.5: Esquema de un m3dulo de ACORDE

Tanto el detector TRD como la TPC se utilizan para identificar la trayectoria de los muones, adem3s a partir de la deflecci3n de 3stos debida al campo magn3tico presente en ALICE, es posible determinar su momento hasta $2 TeV$, a3n cuando la densidad de muones es alta. La fina granularidad de la TPC, permite la medida de trayectorias de una alta densidad de muones, llamados haces de muones como se observa en la Figura 2.6. Estos haces de muones se pueden utilizar para el estudio de las caracter3sticas de las primeras interacciones en la atm3sfera superior, por otra parte los muones que arriban tienen diferentes valores de energ3a y esto provee informaci3n sobre el desarrollo de la lluvia de part3culas que se ha generado.

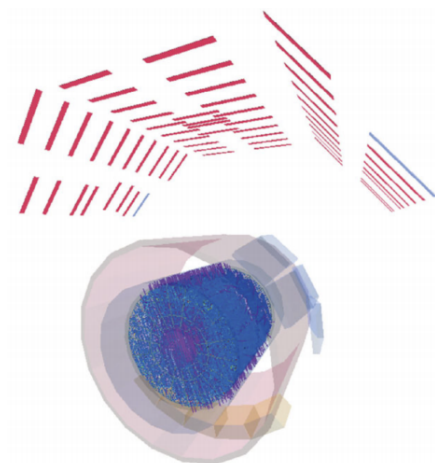


Figura 2.6: Eventos de rayos c3smicos

2.5 Electr3nica del detector ACORDE

El sistema electr3nico del detector ACORDE debe ser capaz de proveer una se3al r3pida de nivel cero al sistema central de disparo cuando los muones atmosf3ricos incidan sobre el detector ALICE. La se3al es usada para realizar pruebas de calibraci3n, alineaci3n y

2.ACORDE (Detector de Rayos C3smicos de ALICE)

2.5 Electr3nica del detector ACORDE

funcionamiento de varios detectores de trazas (TPC, ITS entre otros). A pesar de que la frecuencia t3pica para eventos *single-muon* es menor a $4 \text{ Hz}/m^2$, y la frecuencia de eventos *multi-muon* es menor a $0.0004 \text{ Hz}/m^2$, se podr3n registrar datos de los muones atmosf3ricos al mismo tiempo que la toma de datos con colisiones en el LHC.

La electr3nica de ACORDE debe cumplir con los siguientes requisitos.

- Producir la se3al de disparo de rayos c3smicos (CRT) y la posici3n espacial cuando los muones atmosf3ricos golpeen el magneto de ALICE. Dicha informaci3n es utilizada para calibrar la TPC y otros detectores de trazas.
- Estudiar eventos *multi-muon*, el detector ACORDE provee una se3al de multicoincidencia y almacena informaci3n cinem3tica de los muones atmosf3ricos.
- Supervisar el funcionamiento de los pl3sticos centelladores que conforman al detector ACORDE.

Para cumplir con los requisitos antes mencionados, el sistema electr3nico debe llevar a cabo las siguiente tareas.

- Ser capaz de escanear los 60 m3dulos de ACORDE.
- Producir una se3al de coincidencia entre los dos centelladores de cada m3dulo.
- Generar una se3al de disparo cuando los muones inciden sobre alg3n m3dulo de ACORDE.
- El tiempo que debe tardar la electr3nica en generar la se3al de disparo debe de ser de 25 ns.
- ACORDE debe recuperar el reloj del LHC y decodificar los mensajes del sistema central de disparo a trav3s de la partici3n TTC.
- Comunicar el detector ACORDE con el sistema de adquisici3n de datos (DAQ) del experimento ALICE a trav3s de los enlaces 3pticos de 2.5Gbps del enlace de detector para datos (DDL).
- Generar el encabezado de los datos para mandar la informaci3n al sistema de adquisici3n de datos ALICE.
- Sincronizar al detector ACORDE con todos los detectores que forman parte del experimento ALICE.

2.5.1 Sistema Electr3nico de ACORDE

La electr3nica de ACORDE recibe 120 se1ales en un est1andar de bajo voltaje y diferencial, que vienen de 60 tarjetas FEE (Front End Electronics de ACORDE) asociadas a cada uno de los m3dulos que componen al detector, como anteriormente se comento, cada m3dulo de ACORDE esta compuesto de dos pl1asticos, y cada tarjeta FEE recibe la se1al de los dos PMT acoplados a cada pl1astico centellador, posteriormente la se1al ingresa una etapa de discriminaci3n donde el valor del voltaje de discriminaci3n (V_{th}) es ingresado de manera manual por el usuario, a la salida de estos circuitos obtenemos un pulso digital que cumple con el est1andar de voltaje TTL, posteriormente de una etapa de acondicionamiento de la se1al, esta se1al TTL se convierten en se1ales diferenciales de bajo voltaje (LVDS) para eliminar problemas de ruido electr3nico durante su transmisi3n a la tarjeta principal de ACORDE. Tres se1ales son enviadas por las tarjetas FEE de ACORDE, dos son se1ales individuales de cada pl1astico y la tercera es la coincidencia (AND) entre los dos pl1asticos del m3dulo. Estas se1ales despu3s de pasar por la etapa de discriminaci3n tiene una duraci3n de $\approx 15ns$, para hacer mayor este tiempo y asegurar una mejor transmisi3n la FEE incluye un circuito denominado monoestable con el que se logra tener un duraci3n de 100 ns (ver figura 2.7).

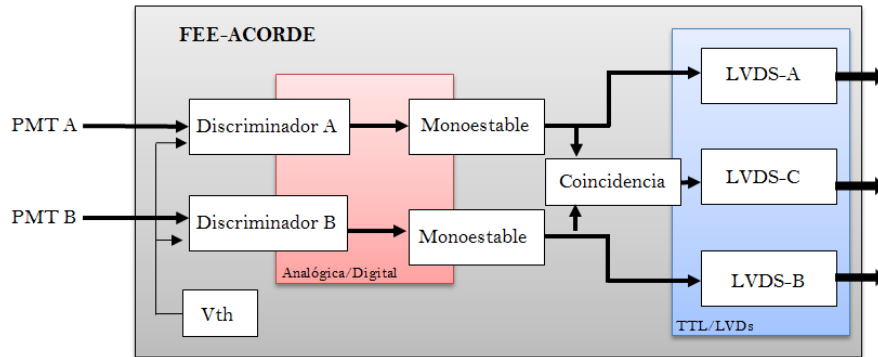


Figura 2.7: Diagrama a bloques de FEE de ACORDE

Estas se1ales son enviadas en modo diferencial por la FEE y se reciben en un panel dedicado a realizar la transici3n de niveles de voltajes de LVDS a CMOS (niveles digitales de 3.3 V), que son enviadas hacia la tarjeta de electr3nica principal, la cual las recibe y redirecciona hacia un FPGA (Campo de arreglo de compuertas l3gicas programables) Cyclone III de la empresa ALTERA el cual tiene como funci3n principal almacenar toda la informaci3n de los m3dulos impactados y producir la se1al de disparo nivel 0 (igualmente transferida en forma diferencial de bajo voltaje), en sincron3a con el reloj del LHC. La tarjeta principal de ACORDE tiene un segundo FPGA de la misma familia de dispositivos el cual est1a conectado con una tarjeta TTCrq (receptor de los mensajes de disparo y se1ales de sincronizaci3n) que en su interior contiene un QPLL que nos ayuda en la recuperaci3n de la se1al de reloj del LHC y un subtarjeta denominada TTCrx mediante la cual llegan los mensajes de disparo provenientes del sistema central de disparo de ALICE, que posteriormente la tarjeta principal de ACORDE

2.ACORDE (Detector de Rayos C3smicos de ALICE)

2.5 Electr3nica del detector ACORDE

tiene que decodificar, as3 mismo, este segundo FPGA esta conectado con una tarjeta SIU (Unidad de interfaz entre todos los detectores que componen al detector ALICE), la cual nos ayuda tanto a configurar la forma de operaci3n del detector ACORDE como a transmitir los datos generados durante su funcionamiento hacia el cuarto de almacenamiento general o local de ALICE, (ver figura 2.8).

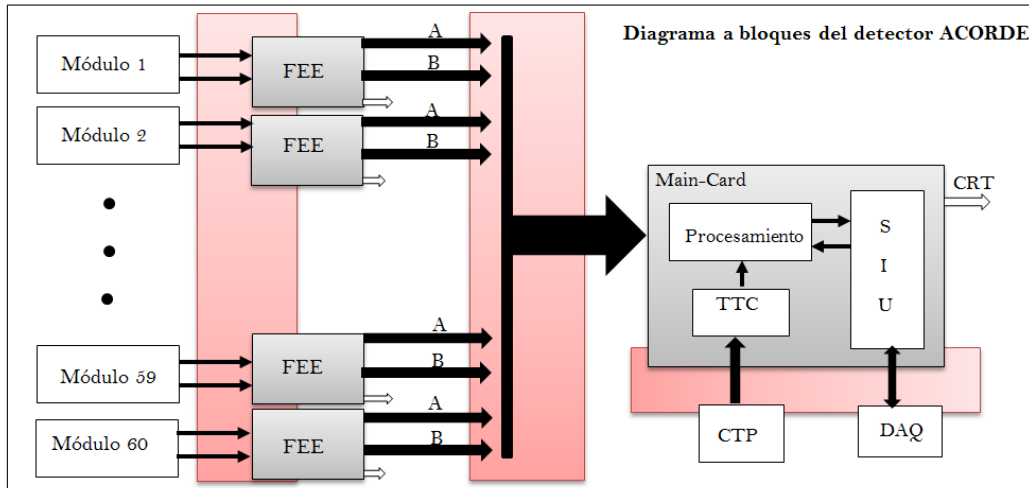


Figura 2.8: Diagrama a bloques de FEE de ACORDE

CAPÍTULO 3

Sistema de comunicación y control de ACORDE

3.1 Actualización de los sistema de ALICE

El objetivo general de las actualizaciones realizadas en ALICE es incrementar la velocidad de lectura de eventos, donde se prevé una tasa de interacción de 50 kHz en colisiones Pb-Pb, 200 kHz en eventos p-p, p-Pb. Donde la electrónica asociada a cada detector, sistema de trigger y adquisición de datos deben de mantener un funcionamiento óptimo, incluso si el ruido de fondo es mayor al antes mencionado.

El aumento en la tasa de interacción nos da como resultado un aumento en el flujo de datos de aproximadamente $\approx 1TB/s$ hacia los detectores y sistemas en línea. La reconstrucción parcial de los eventos y la compresión de información en vivo (on-line) permite tener una tasa de almacenamiento de información de $80GB/s$.

En la figura 3.1 se muestra el esquema general de control de ALICE, el cual está localizado en la caverna y se conecta al sistema central de disparo mediante la unidad de disparo local (LTU), que dependiendo del sistema electrónico de cada subdetector puede conectarse mediante un enlace rápido de disparo serial (FTL) o por un enlace de disparo controlado por tiempo (TTC).

La adquisición de información de los 18 subdetectores que conforman a ALICE es controlado por el sistema de adquisición de datos (DAQ) vía tarjetas electrónicas (Front-End Read-Out) y al rededor de 500 enlaces ópticos llamados enlaces de datos del detector (DDL) ¹

¹Por sus singlas en ingles Detector Data Link

3. Sistema de comunicación y control de ACORDE

3.1 Actualización de los sistema de ALICE

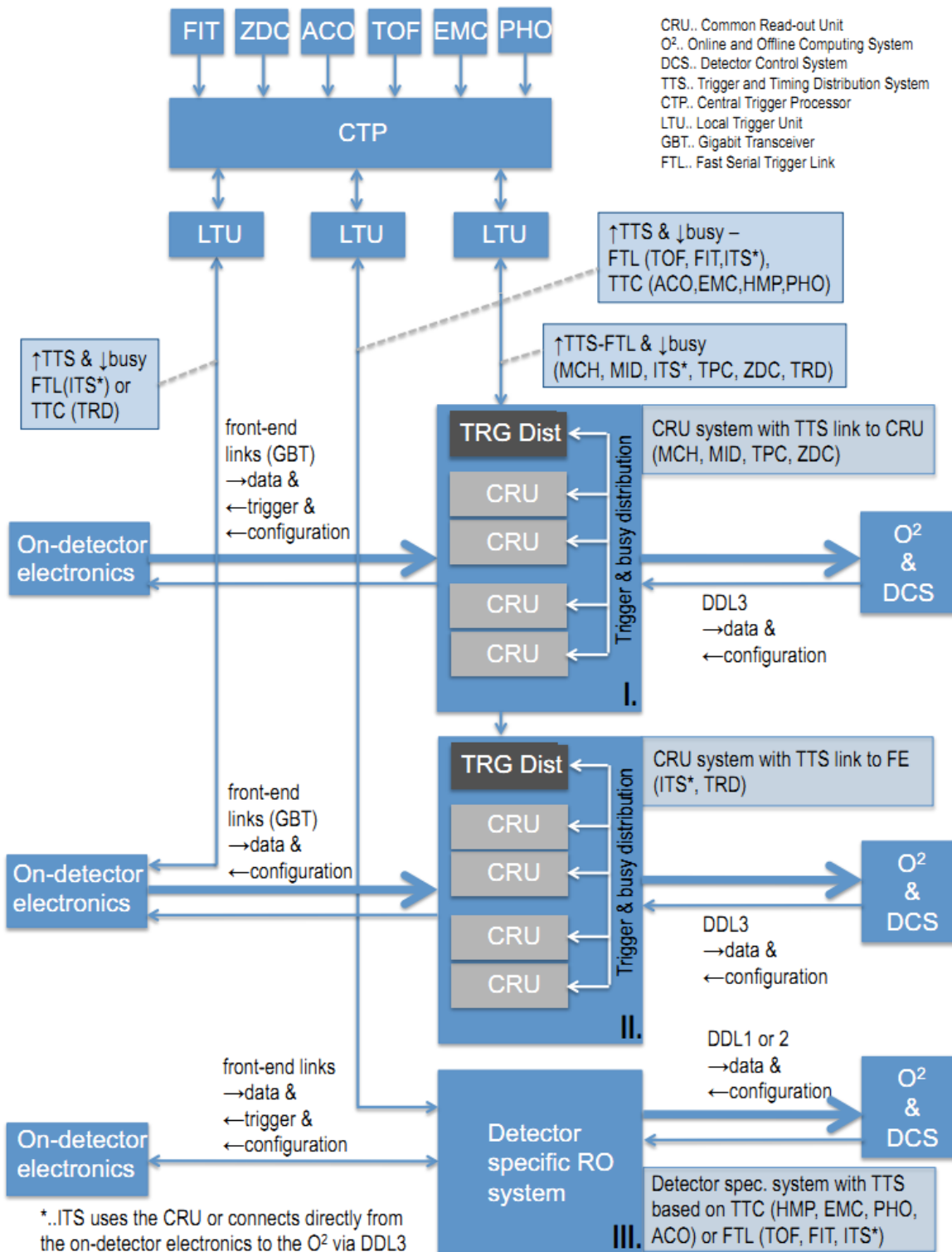


Figura 3.1: Diagrama a bloques del sistema de control de ALICE.

3. Sistema de comunicación y control de ACORDE

3.2 Sistema de control de tiempos y disparo (TTC-LHC)

3.2 Sistema de control de tiempos y disparo (TTC-LHC)

En el LHC, la señal de sincronización y de diversas cantidades físicas que definen el tipo de haz a colisionar, deben viajar por diversos kilómetros desde el centro de control hacia las áreas de los experimentos alrededor del anillo. En los mismos experimentos un sistema complejo es requerido para la transmisión de las señales de TTC hacia los diferentes subdetectores y sus correspondientes sistemas electrónicos (Ver figura 3.2).

Un sistema común de TTC para todos los experimentos ha sido diseñado en CERN con el propósito de controlar la sincronización de los detectores y entregar las señales y mensajes necesarios en sincronía con la señal de reloj del LHC. Este sistema es una serie de dispositivos específicamente diseñados tales como transmisores láser, codificadores y módulos VME para distribuir y monitorear las señales. La columna vertebral del sistema es una red de enlaces ópticos entre el control central, los experimentos y subdetectores. El sistema TTC se comunica con la electrónica de lectura de cada subdetector a través del circuito integrado de aplicación específica TTCrx que de igual forma fue desarrollado en el CERN como parte del sistema TTC del LHC.

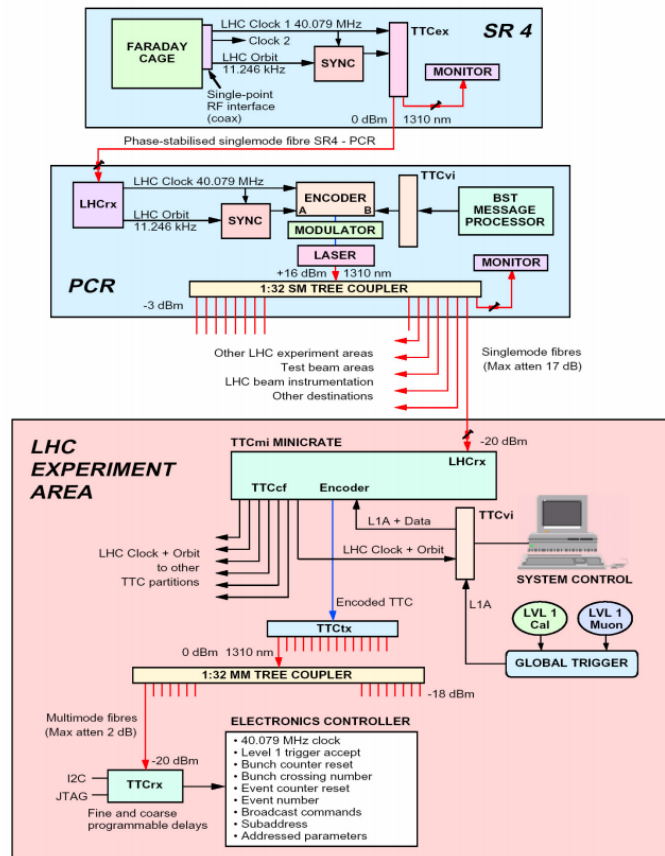


Figura 3.2: Arquitectura de la red TTC

3.3 TTCrx

Como ya se menciona anteriormente el sistema TTC provee todas las señales necesarias para la sincronización de los detectores (reloj, contador de eventos y señales de inicialización), la señales de disparo y de control, las cuales son transmitidas por medio del uso de una fibra óptica.

La comunicación entre el sistema central de disparo de ALICE (ver figura 3.3) y un subdetector se realiza a través del sistema TTC, el cual contiene una tarjeta transmisora (TTCrx), esta tarjeta esta conectada por medio de un enlace óptico al chip receptor del sistema TTC. La electrónica de los subdetectores, a su vez, esta conectada por medio del circuito TTCrx del sistema TTC para poder recibir y decodificar la información que viene del sistema central de disparo de ALICE. Un formato de datos común se ha definido para todos los bloques de datos que son transferidos de la electrónica de cada subdetector por el DDL. Este formato de datos contiene toda la información necesaria por el DAQ para su reconstrucción, almacenamiento y posteriormente análisis de cada evento.

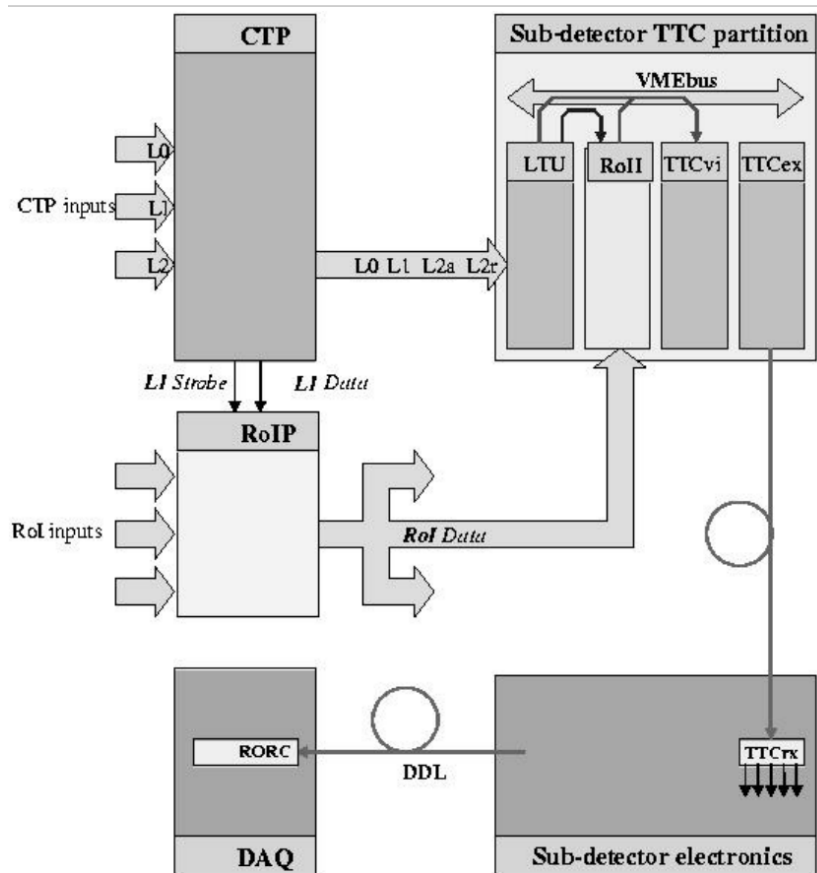


Figura 3.3: Diagrama del sistema central de disparo de ALICE

3.3.1 Sistema de disparo de ALICE

El sistema de disparo de ALICE esta diseñado para seleccionar eventos desplegando una variedad de características diferentes a frecuencias que pueden ser reducidas por los requerimientos físicos y la restricción impuesta por el ancho de banda del sistema de adquisición de datos.

El primer disparo es el nivel 0 (L0), este es el nivel mas rápido, se encarga de despertar algunos detectores para la toma de datos, después sigue el nivel de disparo 1(L1) enviando a $6.5 \mu s$ después del L0, el cual recoge todas las señales restantes.

Otra características de ALICE es debido a que la alta multiplicidad hace imposible la reconstrucción de algunos eventos, es necesario emplear un sistema de protección llamado pasado-futuro, es una parte importante del sistema de disparo de ALICE. Un nivel de disparo final (nivel 2, L2) espera por el fin del intervalo de la protección antes mencionada ($88 \mu s$) para verificar que el evento puede ser tomado y no estropear la toma de datos de otros eventos.

Los disparos son pulsos de características específicas otorgados por los detectores de disparo de ALICE sincronizados al reloj del LHC. Los disparos son enviados hacia el CTP en forma diferencial y la respuesta del CTP hacia los detectores es de igual en forma diferencial para el L0 y mediante el sistema óptico de la TTC para los otros dos niveles. La información colectada por cada detector es transmitida al DAQ ó eliminada después de recibir un disparo de nivel 2.

Por cada evento aceptado, información que definen al tipo de evento procesado es enviada a cada detector, dentro de la información que se envía se encuentra: numero de órbita, grupo, tipo de disparo (disparo por software, disparo físico), grupo de detectores participantes, lista de clases de disparos activos entre otros. Estos mensajes son enviados de forma serial (Mensajes L2a), los cuales son enviados a través del enlace óptico conectado al chip TTCrx de cada detector.

Mensajes de disparo

Los mensajes de disparo son transmitidos usando el canal B del sistema de transmisión de la TTC. En una palabra de 32 bits que es transmitida por la TTC (ver tabla 3.1), los primeros 16 bits siempre están fijos a un valor en hexadecimal igual a "8001" que nos indica un registro externo.

D31	D[30..17]	D16	D[15..8]	D[7..0]
1	14 bit TTCrx address	External address	8-bit sub-address	8 - bit data

Tabla 3.1: Formato de mensaje de la TTC

Los 16 bits restantes están divididos en dos campos como se muestra en la tabla 3.2.

D[15..12]	D[11..0]
4-bit TTC address	12-bit TTC data

Tabla 3.2: Distribución de los 16 bits del mensaje de la TTC

En ALICE se emplean 4 bits de dirección y 12 bits para datos; los 4 bits que nos indican la direcciones disponibles de la TTC están distribuidos como se muestra en la tabla 3.3.

Code	TTC Address	Application
0		Reserved
1	L1 header	L1 Message-word 1
2	L1 data	L1 Message-word 2 to 8
3	L2a header	L2a Message-word 1
4	L2a data	L2a Message-word 2 to 13
5	L2r address	L2r word
6	RoI header	RoI Data-word1
7	RoI data	RoI Data-words 2 to 4
8..11		Reserved for CTP
12..15		Available to sub-detectors

Tabla 3.3: Distribución de las direcciones de la TTC

Como se puede apreciar en la tabla 3.3, las direcciones han sido reservadas para los mensajes L1, L2a, la palabra L2r , y la transmisión del dato RoI, dejando algunas direcciones libres para uso del CTP y otros detectores.

Mensaje L1

Cada señal de disparo L1 esta acompañado por un mensaje L1, transmitido por el canal "B" de la TTC. El mensaje consiste en 9 palabras de 16 bits transmitidas de forma serial, el contenido del mensaje se puede apreciar en la tabla 3.4.

Donde CIT representa la bandera de disparo para la calibración, RoC significa lectura de control, L1SwC significa estado de la señal de disparo L1, ESR significa lectura del segmento habilitado (para usuarios de la opción RoI), y L1 Class [100..1] es el estado de la bandera de disparo L1. Algunas de estas banderas son distribuidas con determinados tipos de disparo, los bits de la señal RoC son transmitidos únicamente para el caso que se necesite alguna calibración.

3. Sistema de comunicación y control de ACORDE

3.3 TTCrx

word	15..12	11	10	9..6	5	4	3..2	1..0
1	L1 Header	Spare	CIT	RoC[4..1]	ESR	L1SwC	L1 Class[100..99]	L1 Class[98..97]
2	L1 data	L1 Class[96..85]						
3	L1 data	L1 Class [84..73]						
4	L1 data	L1 Class [72..61]						
5	L1 data	L1 Class [60..49]						
6	L1 data	L1 Class [48..37]						
7	L1 data	L1 Class [36..25]						
8	L1 data	L1 Class [24..13]						
9	L1 data	L1 Class [12..1]						Spare

Tabla 3.4: Contenido del mensaje de disparo L1

Mensaje L2

Una señal de disparo L2 válido, es indicado por la llegada de un mensaje L2a que consiste de 13 palabras de datos característicos. La primer palabra contiene la dirección del encabezado L2a, y las siguientes palabras los datos. El contenido de este mensaje es transmitido de forma serial y contiene la estructura como se muestra en la tabla 3.5.

word	15..12	11	10	9	8	7..0	
1	L2a Header	BCID[12..1]					
2	L2a data	OrbitID[24..13]					
3	L2a data	OrbitID[12..1]					
4	L2a data	Spare	ESR	CIT	L2SwC	L2 Cluster[8..1]	
5	L2a data	L2 Class[100..89]					
6	L2a data	L2 Class [88..77]					
7	L2a data	L2 Class [76..65]					
8	L2 data	L2 Class [64..53]					
9	L2 data	L2 Class [52..41](<i>Physics</i>) or Detector [24..17](<i>Software</i>)					
10	L2 data	L2 Class [40..29](<i>Physics</i>) or Detector [16..5](<i>Software</i>)					
11	L2 data	L2 Class [28..17](<i>Physics</i>) or Detector [4..1](<i>Software</i>)					
12	L2 data	L2 Class [16..5]					
13	L2 data	L2 Class [4..1]					

Tabla 3.5: Contenido del mensaje de disparo L2a

Mensaje L2r

Si un disparo L2 no es valido, una palabra es transmitida a los detectores con la finalidad eliminar la información que hallan adquirido, la palabra contiene la estructura que se muestra

3. Sistema de comunicación y control de ACORDE

3.4 Circuito de aplicación específico TTCrx

en la tabla 3.6.

Word	15..12	11..0
1	L2r address	BCID[12..1]

Tabla 3.6: Contenido del mensaje L2r

Mensaje RoI

El mensaje de región de interés (RoI) es transmitido de forma serial, y es enviado por la CTP hacia los detectores una vez concluida la transmisión del mensaje L2a, la estructura de transmisión del mensaje RoI se muestra en la tabla 3.7.

Word	15..12	11..0
1	RoI header	BCID[12..1]
2	RoI data	RoI data [36..25]
3	RoI data	RoI data [24..13]
4	RoI data	RoI data [12..1]

Tabla 3.7: Contenido del mensaje RoI

3.4 Circuito de aplicación específico TTCrx

El circuito de aplicación específico TTCrx ha sido desarrollado para facilitar la interfaz entre el sistema central de disparo y la electrónica de lectura de cada detector. El circuito TTCrx recibe dos canales de transferencia de datos y el reloj del LHC a través de un enlace óptico, teniéndolos disponibles para todos los detectores. También es posible configurar el chip, de acuerdo a las características específicas de la electrónica de lectura de cada detector.

En la figura 3.4 se puede apreciar la arquitectura del chip TTCrx. el cual contiene un fotodiodo con un preamplificador embebido que tiene la función de entregar la señales diferenciales en los pines de salida (pin In, pin In b). Posteriormente un amplificador restaura la señal diferencial a un nivel de voltaje CMOS. De aquí el chip es capaz de recuperar la señal de reloj del LHC (40.079 MHz) y la cadena de datos de 80Mbits/s. Esta cadena de datos es separada en dos canales A y B.

El canal A contiene las señales de disparo nivel 1, es retroalimentado por medio de retrasos programables por el usuario antes de su transmisión, por otra parte los datos en el canal B entran a un convertidor serial-paralelo el cual tienen la función de decodificar los dos formatos de datos y empleando el código Hamming para la detección y corrección de errores en los datos

3. Sistema de comunicación y control de ACORDE

3.4 Circuito de aplicación específico TTCrx

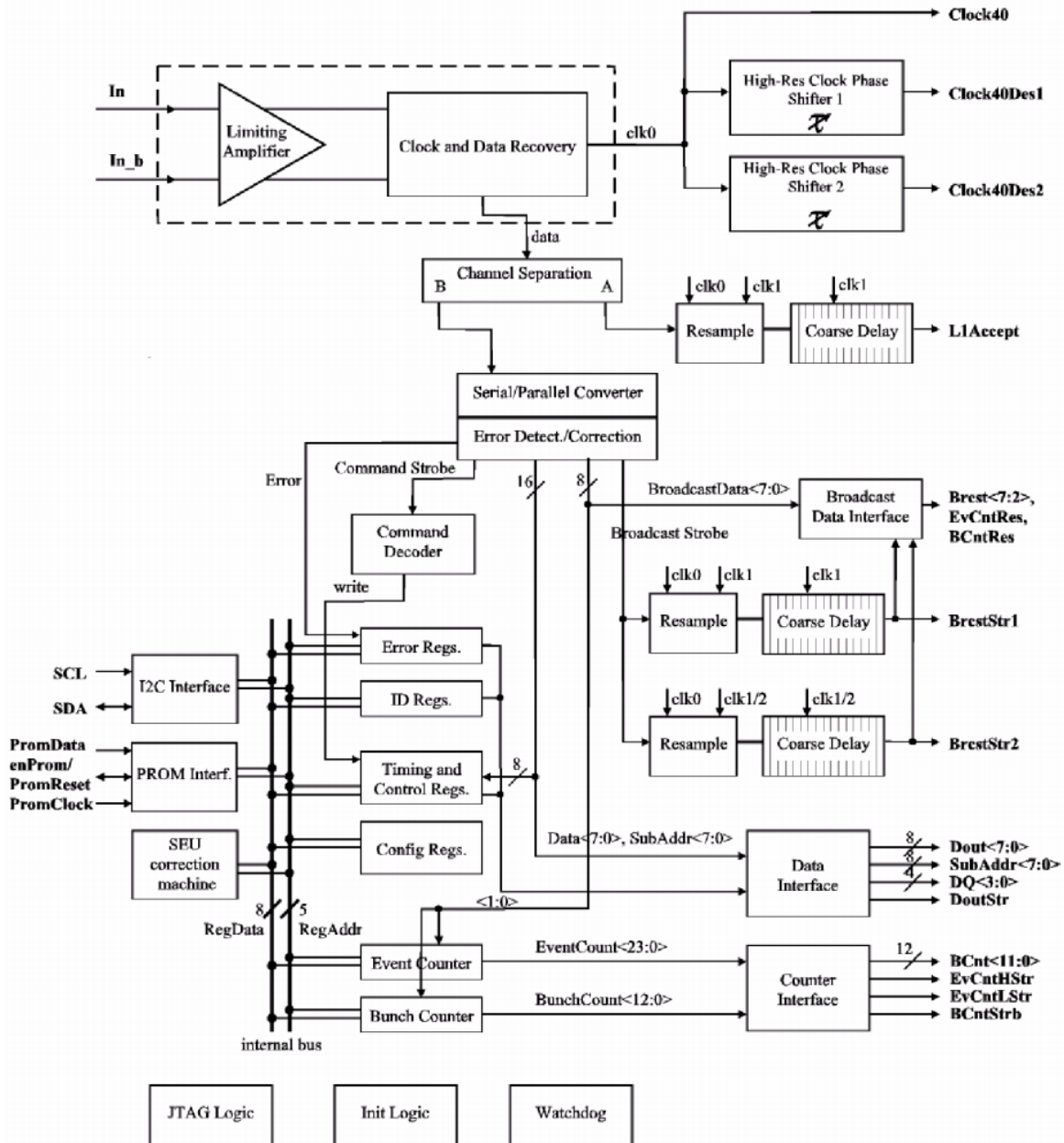


Figura 3.4: Diagrama a bloques de circuito integrado TTCrx

3. Sistema de comunicación y control de ACORDE

3.4 Circuito de aplicación específico TTCrx

de entrada.

Clock 40

Señal de reloj de 40.079 MHz. Esta salida puede ser habilitada o deshabilitada cambiando el bit 7 del registro de control.

Dout<7:0>

Bus de transferencia de información. Este bus es usado normalmente para enviar información de una dirección individual, sin embargo también puede ser usado par descargar el contenido de los contadores internos de errores y del registro de configuración ("ERDUMP" y "CRDUMP"). El tipo de dato en el bus es validado por la señal DQ<3:0>. La operación del bus puede ser habilitada o deshabilitada mediante el registro de control.

DQ<3:0>

Estos registro se conoce como calificador de datos, indica que tipo de datos esta presente en el registro del bus de datos, los datos que pueden contener se muestran en la tabla 3.8.

DQ<3:0>	Data<7:0> bus content
0000	Individually-addressed command data
0001	Single Bit Error (Counter Low)
0010	Single Bit Error (Counter High)
0011	Double Bit Error (Counter Low)
0100	SEU Error Counter
0101	Fine Delay register 1
0110	Fine Delay register 2
0111	Coarse Delay register 2
1000	Control register
1001	ID register <7:0>
1010	ID register <13:8>

Tabla 3.8: Bits calificadores de datos.

DoutStr

Dato de salida. Indica un dato válido en el bus de datos.

SubAddr<7:0>/ID<15:8>

Bus de sub-direcciones. Usado para leer el contenido de la subdirección de un dato o de un comando de manera individual. La operación del bus puede ser habilitada cambiando el

3. Sistema de comunicación y control de ACORDE

3.4 Circuito de aplicación específico TTCrx

bit 5 del registro de control.

BCnt<11:0>

Bus de salida del contador. Este bus refleja el contenido del grupo, contador de evento bajo o contador evento alto, dependiendo del valor de los bit <1:0> del registro de control.

BCntStr

Contador de grupo. Indica que un grupo de datos esta presente en la salida del bus BCnt<11:0>.

L1 Accept

Señal de disparo aceptada de primer nivel.

TTC Ready

El circuito TTCrx trabaja únicamente cuando esta señal esta activa.

Registro de control

El registro de control es usado para seleccionar el modo de operación del circuito, permitiendo minimizar el consumo de corriente, debido a que es capaz de deshabilitar las funciones del circuito que no son requeridas en algún momento. Los bits del registro de control están colocados como se muestra en la tabla 3.9.

Bit	Función	Estado inicial
0	Habilitar operación del contador de grupo	1
1	Habilitar operación del contador de eventos	1
2	Selclock40des2	0
3	Habilitar salida de Selclock40des2	0
4	Habilitar salida de Clock L1 Accept	1
5	Habilitar salida del bus paralelo ²	0
6	Habilitar salida serial B	0
7	Habilitar salida de Clock 40	1

Tabla 3.9: Registro de control

3.4.1 Formato del sistema TTC

En esta parte de la tesis, se discutirá sobre el formato empleado en la transmisión de comandos de prueba y comandos direccionados de manera individual por el sistema TTC.

3. Sistema de comunicación y control de ACORDE

3.4 Circuito de aplicación específico TTCrx

Formato

Dos formatos básicos son usados para la transmisión de datos o comandos a los receptores de la TTC. La cadena de datos son transmitidas con diversos bits redundates empleados para la detección y corrección de errores simples así mismos sirven para la detección de errores dobles.

El esquema del código empleado es el código Hamming con un bit de paridad impar adicional para la detección de errores. Los bits de inicio y fin están incluidos en cada cadena de datos transmitida para una correcta sincronización.

Cadena de Prueba(Usó interno del chip TTCrx).

Las cadenas de prueba se emplean para distribuir mensajes a todos los receptores de la TTC en el sistema. Este tipo de cadena es identificado por un "0" en el primer bit (FMT). Todos los circuitos TTCrx después de haber realizado una apropiada revisión del paquete recibido, ejecutan la operación requerida en la parte del dato de la cadena. En la tabla 3.10 se puede apreciar la estructura de un comando de prueba.

START	FMT	CMD/DATA <7:0>	CHK<4:0>	STOP
0	0	dddddddd	eeee 1	

Tabla 3.10: Estructura de un comando de prueba

Datos o comandos direccionados individualmente

Las cadenas de datos o comandos direccionados de forma individual están identificados por un "1" en el primer bit (FMT). Esta cadena es usada para direccionar un solo sistema TTC. El dato transmitido a un TTCrx en particular está en los buses Dout <7:0> y SubAddr<7:0>. Los bits de datos DQ<3:0> son puestos a "0" para indicar un dato disponible, y el bit DoutStr valida el contenido del dato contenido en el bus. El código de corrección de errores cubre 32 bits de datos en la cadena de transmisión. Los bits de inicio y fin no están incluidos en el esquema de corrección de errores tal como lo muestra la tabla 3.11.

START	FMT	tTTCrxADDR <13:0>	E	SUBADDR <7:0>	DATA <7:0>	STOP
0	1	tttttttttttt	1	sssssss	dddddddd	1

Tabla 3.11: Estructura de un comando direccionado individualmente

Diagrama de tiempos de los comandos direccionados individualmente

Los comandos direccionados individualmente son dados por los buses Dout <7:0>, SubAddr<7:0> y DQ<3:0>, tal como se muestra en la figura 3.5. La señal DoutStr, la cual esta alineada a la señal de reloj Clock40Des1, señala la llegada del valor de un nuevo dato. Los 16 bits están contenidos en Dout<7:0> y SubAddr<7:0>, mientras que los bits de datos DQ<3:0> especifican el tipo de dato.

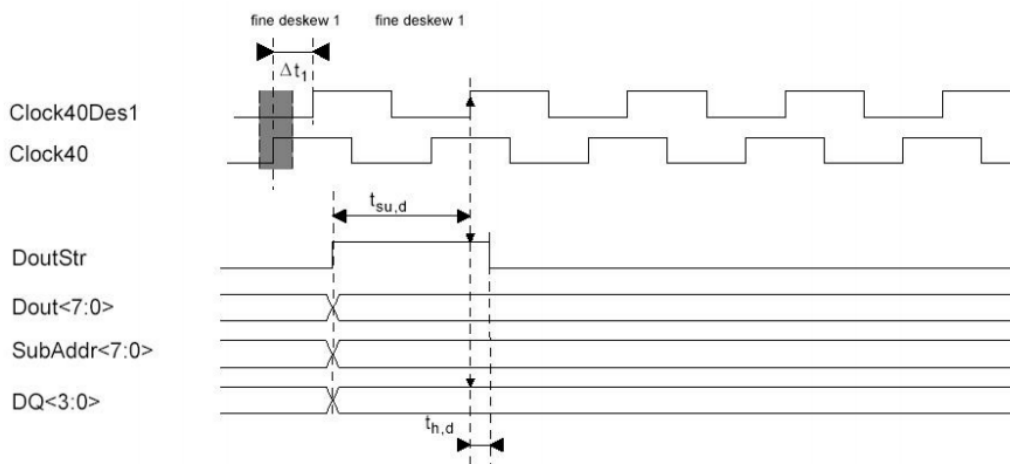


Figura 3.5: Diagrama de tiempos de los comandos direccionados individualmente

3.5 Sistema de adquisición de datos de ALICE

El sistema de adquisición de datos de ALICE necesita además de su capacidad para registrar el flujo constante de una gran cantidad de eventos resultantes de colisiones centrales, debe incluir la capacidad de seleccionar y registrar eventos procedentes de colisiones no centrales. Estos requerimientos conllevan a agregar un constructor de eventos, con un ancho de banda mayor de 2.5 GB/s y una capacidad de almacenamiento mayor a 1.25 GB/s , teniendo como resultado aproximadamente 1 PB de datos cada año. En la figura 3.6, se muestra la arquitectura del sistema de adquisición de datos de ALICE.

Cientos fragmentos de datos correspondientes a la información de un evento, es revisada antes de ser almacenada con la finalidad de garantizar la integridad de la información, posteriormente es procesada y ensamblada dentro de sub-eventos, estos, son enviados a través de una red denominada "Event building" a una de las 40 computadoras que componen al sistema global de colección de información (GDC). Posteriormente 20 servidores de datos (GDS), almacenan la información localmente antes de su migración y almacenamiento en la red de computadoras central del CERN, donde se convierten en datos disponibles para el análisis.

3. Sistema de comunicación y control de ACORDE

3.5 Sistema de adquisición de datos de ALICE

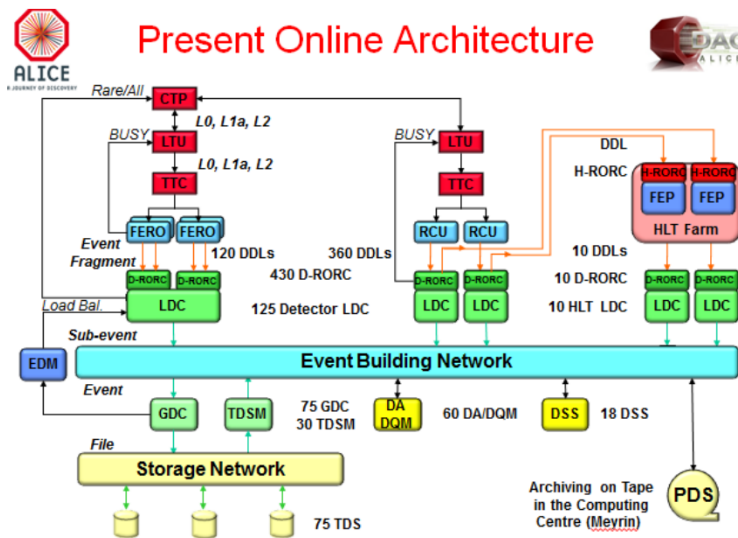


Figura 3.6: Arquitectura del sistema de adquisición de ALICE

3.5.1 Enlace de datos del detector

Todos los detectores que componen a ALICE se conectan al sistema de adquisición de datos, a través de un sistema estándar, el cual está compuesto por un enlace de datos del detector (DDL³) (ver figura 3.7).

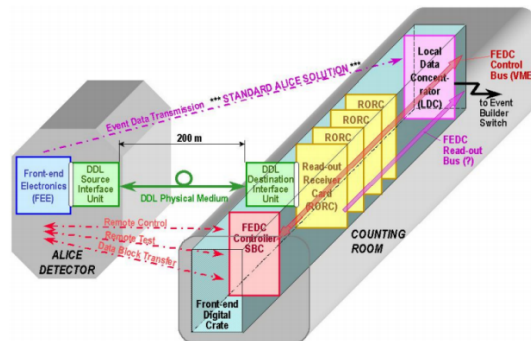


Figura 3.7: Arquitectura del enlace de datos del detector

El DDL es un enlace multipropósito que puede ser usado tanto para transmitir la información generada en un evento de colisión o como un medio para realizar pruebas a la FEE de cada detector de forma individual a través del DAQ de forma remota.

³Por sus siglas en inglés Detector Data Link

Básicamente el DDL consiste en tres partes:

- SIU (Unidad de interfaz origen).
- DIU (Unidad de interfaz destino).
- Medio de transmisión

Formato de transmisión de datos

ALICE emplea un formato de transmisión de datos común para todos los detectores, este formato de datos contiene toda la información que necesita el sistema de adquisición de datos para la reconstrucción de eventos. El formato de datos aquí descrito es generado por la electrónica de lectura de cada detector, y debe cumplir con ciertos requerimientos para que pueda ser transmitido con éxito por el DDL y debe proveer la información exacta para identificar el evento cuando sea reconstruido y almacenado por el sistema de adquisición de datos.

La identificación de un bloque de información y su procesamiento esta basado en la siguiente información: La versión del formato, la identificación del evento, y la información del disparo (trigger). Los campos correspondientes del formato común de datos son por tanto obligatorios.

Además, tres campos opcionales han sido agregados al formato común de datos: El largo del bloque, los atributos del evento y el dato correspondiente a la región de interés RoI.

Formato común de datos

Los datos transferidos de la electrónica a los concentradores de datos locales (LDC's) tiene la estructura como se muestra en la figura 3.8.

donde los super indices indican los siguiente:

1. atributo generado en el nivel de disparo 1.
2. atributo generado en el nivel de disparo 2.
3. atributo generado por la TTCrx local.
4. Región de interés, seguido de la llegada del nivel de disparo 1.
5. Generado por la electrónica de lectura de cada detector.

3. Sistema de comunicación y control de ACORDE

3.5 Sistema de adquisición de datos de ALICE

0	Block length ⁵ [0-31]				
1	Format version ⁵ [24-31]	MBZ [22-23]	L1 trigger message ¹ [14-21]	MBZ [12-13]	Event ID 1 (bunch crossing) ² [0-11]
2	PAR requests ⁵ [24-31]	Event ID 2 (orbit number) ² [0-23]			
3	Block attributes ⁵ [24-31]	Participating sub-detectors ² [0-23]			
4	Status & error bits ⁵ [12-31]			Mini-event ID (bunch crossing) ³ [0-11]	
5	Trigger classes low ² [0-31]				
6	Trigger classes middle-low ² [0-31]				
7	Trigger classes middle-high ² [0-31]				
8	ROI low ⁴ [28-31]	MBZ [4-27]			Trigger classes high ² [0-3]
9	ROI high ⁴ [0-31]				

Figura 3.8: Encabezado del formato común de datos

Longitud del bloque

La longitud del bloque es un campo opcional. Puede ser llenado por la electrónica del detector para indicar la longitud total de cada bloque de datos incluyendo el encabezado y el contenido útil. La longitud es expresada en bytes siendo transferida por el DDL.

Versión del formato de datos

La versión del formato como su nombre lo indica, se refiere a la versión que se está empleando en la adquisición de datos. La presencia de este campo provee la compatibilidad en caso de actualizaciones. Este identificador tiene una longitud de 8 bits y es generado por la electrónica de cada detector.

Mensaje de disparo L1

El mensaje de disparo L1 consiste de partes específicas del mensaje de disparo L1. Esta información se distribuye por la TTC a los detectores. Este campo es una copia directa de los primeros 10 bits del mensaje de datos L1 y contiene la información que se muestra en la tabla 3.12.

Identificación del evento (1 y 2)

La señal de sincronización del LHC otorga la identificación del evento (Event ID), la cual es distribuida de manera individual a cada electrónica de lectura asociada a cada detector por medio de la TTC. El diseño actual del LHC prevé 5364 grupos en una órbita. El reloj del LHC

3. Sistema de comunicación y control de ACORDE

3.5 Sistema de adquisición de datos de ALICE

L1 Trigger message field of DDL header	Data payload of the L1 Data message word1
Bit 23-20	Spare bits
Bit 20	CIT bit
Bit 19-16	RoC[4..1]
Bit 15	ESR bit
Bit 14	L1SwC bit

Tabla 3.12: Estructura de la información del mensaje nivel 1

identifica cada grupo que cruza dentro de una órbita, así mismo señala el comienzo de una nueva órbita. El sistema de disparo debe incluir una cuenta cíclica de 24 bits para contar las órbitas. Este esquema identifica únicamente cada grupo que cruza en un periodo de más de 20 minutos. Lo cual es suficiente para este propósito. La información almacenada en el campo "Event ID (1 y 2)" es transmitido por la CTP. Es distribuido a la TTC en una parte especial del mensaje "L2 Accept" y recibido por la electrónica de lectura de los detectores por medio del circuito TTCrx. Cuando se corre sin el sistema de disparo de ALICE, el campo "Event ID 1" esta puesto en ceros y el "Event ID 2" contiene un incremento en formato binario sin signo, para ser inicializado por la electrónica.

Cualidades de los bloques

Las cualidades de los bloques (block attributes) es un campo opcional que puede ser usado libremente por los detectores para codificar información específica, como por ejemplo el tipo de evento.

Sub-detectores participantes

Este campo es obligatorio. Su información es generada por el CTP en caso de que el disparo generado sea por software. Es distribuido a la TTC en la parte correspondiente del mensaje "L2 accept" y recibido por el circuito TTCrx. La información recibida es tomada íntegramente como la entregan los "detectores de partículas".

Bits de error y estado

Este es un campo obligatorio, es llenado por la electrónica con todas las condiciones de trabajo. Un error o condición de estado que ocurre antes, durante o justo después de la lectura de la electrónica deberá ser señalado fijando uno de los bits correspondientes de este campo. La asignación individual de los bits se encuentra descrita en la tabla 3.13.

3. Sistema de comunicación y control de ACORDE

3.5 Sistema de adquisición de datos de ALICE

Bit N°	Associated status or error condition
0	Trigger overlap error:(L1 received while processing another L1)
1	Trigger missing error:(L1 no L0 or L2a or L2r received while no L1 received)
2	Data parity error
3	Control parity error (instruction and/or address)
4	Trigger information unavailable
5	Front-end electronics error
6	HLT decision flag
7	HLT payload flag
8	DDG payload flag
9	Trigger L1 time violation
10	Trigger L2 time violation
11	Pre-Pulse error
12	Trigger error
13	Trigger L1 missing error. L2 received while no L1 received
14	Multi-Event Buffer error. Buffer not empty after last L2 or L2 timeout.
15-19	Reserved for future use.

Tabla 3.13: Definición de los bits de estado y error

Mini Eventos (mini-Eventos ID)

La identificación de eventos locales se debe también incluir en el formato de datos común para la verificación con la identificación global del evento. Esta identificación del evento local identifica el valor del contador asociado al reloj del LHC cuando el detector ha recibido la señal de disparo nivel 1. Este contador es parte del chip TTCrx.

Clases de disparo

Para la identificación de disparos físicos, los bits codificados en los campos alto, medio y bajo de los tipos disparo se toman del mensaje aceptado de disparo nivel 2. La clasificación del tipo de clases se observan en la tabla 3.14

Cuando se corre sin el sistema de disparo de ALICE, estos dos campos pueden contener cualquier valor.

3.5.2 Región de interés. (RoI)

El dato correspondiente a la región de interés (RoI) es distribuido a los sistemas TTC. El valor, si esta habilitado, debe ser almacenado en los campos bajo y alto en el CDH.

3. Sistema de comunicación y control de ACORDE

3.6 SIU (Source Interface Unit)

L2 Class field of trigger L2a message	Trigger classes fields
L2 Class[1..32]	Trigger classes low
L2 Class[33..64]	Trigger classes middle-low
L2 Class[65..96]	Trigger classes middle-high
L2 Class[97..100]	Trigger classes high

Tabla 3.14: Estructura de la clases de trigger

Cuando se corre sin el sistema de disparo de ALICE, el dato RoI bajo y alto pueden contener cualquier valor.

3.6 SIU (Source Interface Unit)

La SIU forma parte importante del enlace de datos del detector (DDL), opera como la interfaz mediante la cual se envían los datos de los detectores a través del DDL para su almacenamiento y su posterior análisis. En esta sección se utilizará la convención de nombrar a la electrónica de lectura de ACORDE como FEE, debido que esta convención es empleada dentro de ALICE.

3.6.1 Interfaz con la tarjeta SIU

La tarjeta de interfaz SIU empleada en ACORDE, permite realizar la transmisión de la información física generada durante su operación al sistema de adquisición de datos de ALICE. También, a través de este interfaz podemos enviar comandos del sistema de adquisición de datos a la electrónica de ACORDE. Esto se puede utilizar para fijar el número de coincidencias para eventos múltiples o para verificar el funcionamiento de los módulos de ACORDE.

La tarjeta de interfaz SIU de ACORDE utiliza un bus de datos bidireccional de 32 bits (fbD[31..0]), dos señales de control bidireccionales (fbCTRL_N y fbTEN_N), tres señales de entrada de control (fiDIR, de fiBEN_N y de fiLF_N) y dos señales de salida de control (foBSY_N y foCLK),

Todas las señales de la SIU están sincronizadas a la señal de reloj foCLk, los detalles de estas señales se darán a continuación.

fbD[31..0]Data[31..0](bus bidireccional)

La señal fbD[31..0] es un bus de datos de 32 bits. Si el estado de las señal fiDIR es alta, los datos de este bus son transferidos de la FEE a la SIU en una transición de bajo a alto de la señal de reloj foCLK cuando la señal fbTEN_N esta activada. La señal fbD[31..0] contiene comandos, cuando la señal fbCTRL_N esta activa, si no es así contiene datos normales.

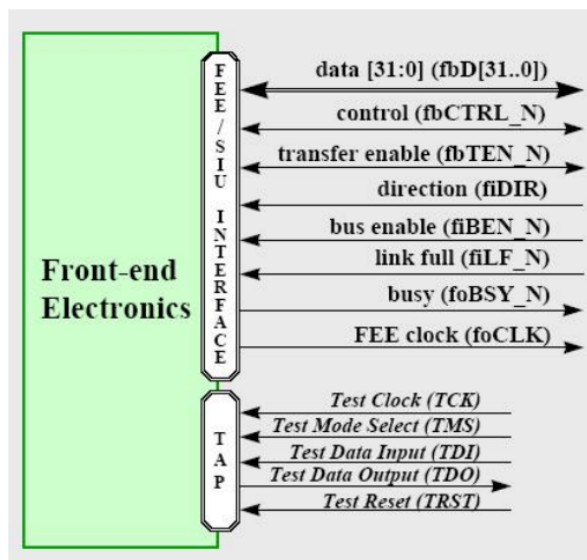


Figura 3.9: Diagrama a bloques del sistema de control de ALICE.

fbCTRL_N CONTROL (bidireccional activa en bajo)

fbCTRL_N es una señal de tercer estado para manejar el bus de datos. Un nivel activo de esta señal indica que el dato transferido entre la FEE y la SIU es un comando o una palabra de datos, dependiendo de la dirección de la información transferida. Es una palabra de datos, cuando la información es transferida de la FEE a la SIU, en la otra dirección es un comando.

fbTEN_N (habilita transferencia y es una señal bidireccional activa en bajo)

fbTEN_N es una señal de tercer estado para manejar el bus de datos. Un nivel activo de esta línea habilita los datos que serán transferidos entre la FEE y la SIU en una transición de bajo a alto de la señal de reloj de foCLK. La dirección de la información transferida depende del nivel de la señal fiDIR.

fiDIR (Dirección de transferencia activa en alto)

fiDIR es una señal de tercer estado que se emplea para manejar el bus de datos. Un nivel alto en esta señal indica que la información del bus fbD[31..0] es transferida de la FEE a la SIU, mientras que un nivel bajo indica la dirección opuesta en la transferencia de datos. Cuando el nivel de esta señal es alto, todas las señales bidireccionales son manejadas por la FEE, de otra forma son manejadas por la SIU.

fIBEN_N BUS ENABLE (entrada activa en bajo)

fIBEN_N es una señal de tercer estado empleada en el manejo del bus de datos. Un nivel alto de esta señal pondrá en alta impedancia todas las señales bidireccionales de la SIU.

fILF_N LINK FULL (Entrada activa en bajo)

fILF_N es una señal de control de flujo de información. Un nivel activo de esta señal indica que la FEE debe parar la transferencia de información, cuando la palabra de estado FESTW(EOB=1) es transmitida al sistema de adquisición una sola palabra de datos o palabra de estado podrá ser transferida de la FEE a la SIU.

foBSY_N BUSY (salida activa en bajo)

foBSY_N es una señal de control de flujo. Un nivel activo de esta señal indica que la FEE no esta disponible para la transferencia de información. Después de que esta señal se active, únicamente una palabra de datos o de estado podrá ser transferida de la SIU a la FEE.

3.7 Comandos(FECMDs)

Los FECMDs son comandos que en la mayoría de los casos son usados para la configuración de la electrónica de los detectores y para una mejor sincronización en la transferencia de información, se transmiten a través del DDL, existen dos tipos de FECMDs implementados en la FEE de ACORDE.

Listo para recibir información (RDYRX).
Final de la transferencia del bloque (EOTBR).

Iniciar con la transferencia de datos se puede realizar con la llegada del comando RDYRX a la FEE de ACORDE; cuando la FEE de ACORDE recibe este comando, inicia con el proceso de transmisión de información y espera la señal de disparo L2a para continuar con el proceso de transmisión, finalmente la transmisión concluye cuando la FEE de ACORDE reciba el comando EOTBR.

El uso de los siguientes (FECMDs) son opcionales:

- Iniciar un bloque de escritura (STBWR#dirección).
- Iniciar un bloque de lectura (STBRD#dirección).
- Control (FECTRL#dirección).
- Lectura de estado (FESTRD#dirección).

3. Sistema de comunicación y control de ACORDE

3.7 Comandos(FECMDs)

Bloque de escritura: Una transacción de escritura puede ser abierta usando un comando STBWR. En este tipo de transferencia el DAQ envía información a una dirección específica de la FEE definida en los parámetros del comando STBWR.

Bloque de lectura: Una transferencia de tipo lectura se puede iniciar con la llegada del comando STBRD.

En la FEE de ACORDE se emplean los comandos FECTRL y FESTRD, donde en la transmisión del comando FECTRL cada dirección puede representar una función de control independiente, por otra parte cada palabra de estado puede ser leída por la FEE de ACORDE con el uso del comando FESTRD, que igualmente cada dirección representa una palabra de estado independiente. La estructura de los FECMDs se aprecian en la figura 4.6.

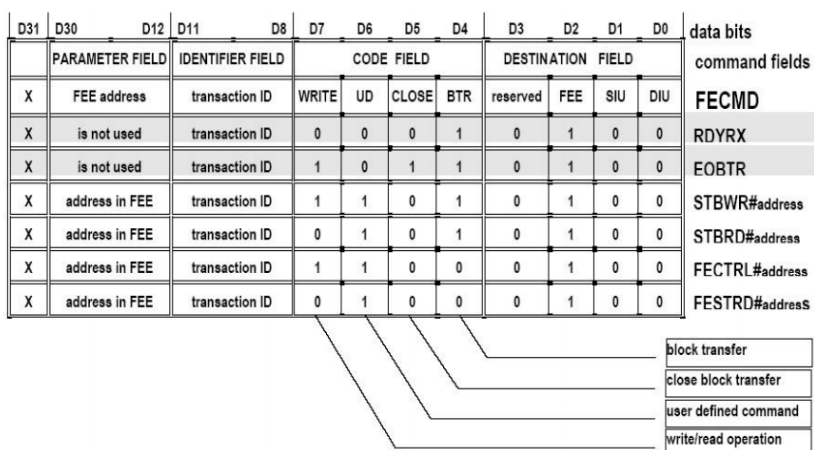


Figura 3.10: Comandos (FECMDs)

Palabras de control (FECTRL)

Las palabras de control son designadas por los usuarios de la FEE, esto significa que los diseñadores de la FEE deberán asignar la dirección de la FEE y el significado del comando. Podemos usar esta característica para programar el número de módulos activados, y los parámetros necesarios para que la FEE de ACORDE genere un disparo de multicoincidencia. También, se pueden emplear para correr pruebas periódicas de los módulos de ACORDE. En la figura 3.11, se muestra el diagrama de tiempos de la transmisión de las palabras de control.

Palabra de estados (FESTWs)

Existen dos tipos de FESTWs:

1. La RORC puede leer una palabra de estados FESTW(EOB=0) enviando un comando FESTRD#dirección. Esta palabra de estado del detector debe ser definida por el diseñador de la FEE. El parámetro de configuración esta reservado para información

3. Sistema de comunicación y control de ACORDE
3.7 Comandos(FECMDs)

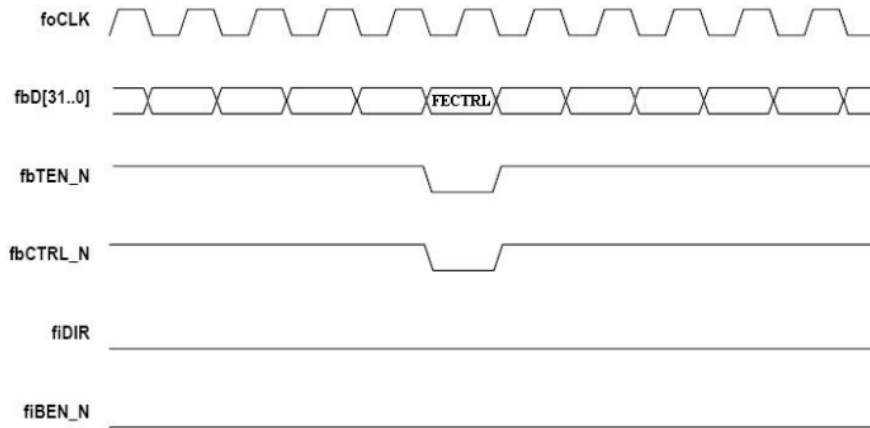


Figura 3.11: **Transferencia de una palabra de control**

especifica de la FEE, mientras que el bit de error puede ser usado par indicar cualquier estado de error predefinido por el usuario. (ver figura 3.12).

2. Una palabra de estado FESTW(EOB=1) deberá generarse automáticamente por la FEE, cuando la transferencia de un evento o bloque de datos de la FEE a la SIU este terminada. En este caso el parámetro de configuración del comando deberá contener el largo del evento transmitido. El bit de error deberá ser puesto a "1" en el caso de que no se haya detectado dentro de la FEE durante la transferencia de datos. En el parámetro de configuración de cualquier comando FESTW, la FEE debe regresar el número de identificación de la transacción actual.

D31	D30	D12	D11	D8	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
ERROR BIT	PARAMETER FIELD		IDENTIFIER FIELD	CODE FIELD				SOURCE FIELD				
error/OK	status parameter		transaction ID	status code		EOB	reserved	reserved	FEE	SIU	DIU	
error	front-end status		transaction ID	0	1	0	0	0	1	0	0	
error	data block length		transaction ID	0	1	1	0	0	1	0	0	

at the end of an event or a data block
in the front-end status read-out transaction

Figura 3.12: **Estructura de la palabra de estados**

Una transferencia de comandos de estados debe cumplir con el diagrama de tiempos que se muestra en la la figura 3.13.

Se puede emplear el uso de la transferencia de palabras de estado para conocer si los parámetros en la FEE de ACORDE son correctos. Un ejemplo es: se puede leer el número de canales activos que forman el disparo de multicoincidencia en la FEE de ACORDE para

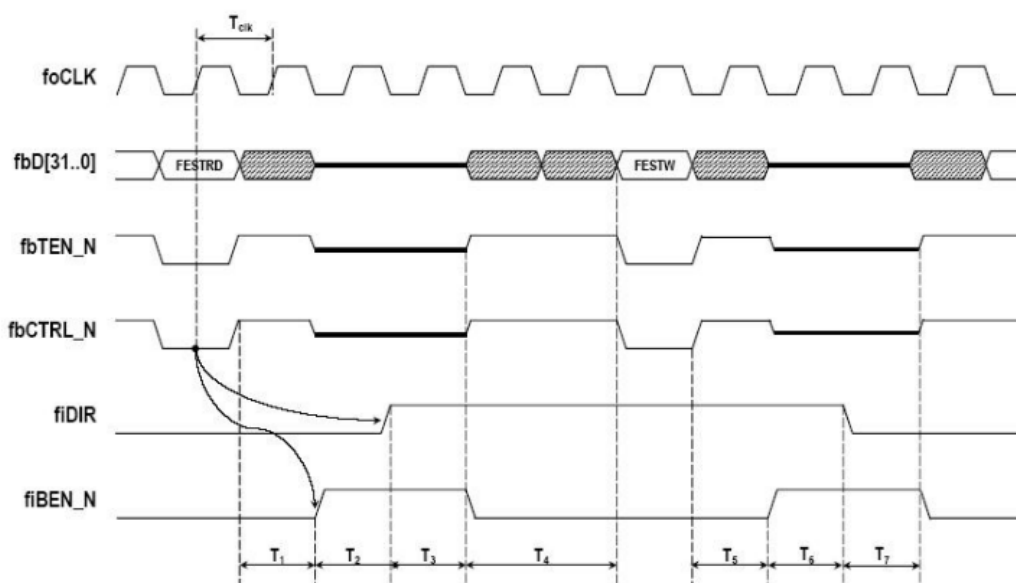


Figura 3.13: Transferencia de palabras de estado

verificar que estén configurados correctamente.

Transferencia de información de eventos.

Los datos generados por ACORDE deben ser transmitidos siguiendo los diagramas de tiempo y requerimientos mostrados en las figuras 3.14, 3.15, 3.16, 3.17.

Flujo del control

La SIU detendrá el proceso de transferencia de datos a la FEE, cuando la señal foBSY_N esta activada por la FEE (ver figura 3.17).

- La SIU pondrá la señal fbTEN_N en un estado de alta impedancia, cuando la activación de la señal foBSY_N sea requerida por la SIU, dicha activación se llevará a cabo en el flanco de subida de la señal de reloj foCLK.
- La SIU pondrá la señal fbTEN_N en un estado activo, en caso de que la señal foBSY_N este desactivada; el proceso de activación y desactivación se lleva a cabo en el flanco de subida de la señal de reloj foCLK.
- La SIU deberá transferir los comandos FECMD a la FEE, independientemente del estado de la señal foBSY_N. La FEE de ACORDE es capaz de leer el comando FECMD, independientemente del estado de la señal foBSY_N. Esto nos indica que la transferencia de los comandos FECMD a la FEE no puede ser suspendida por el flujo de control.

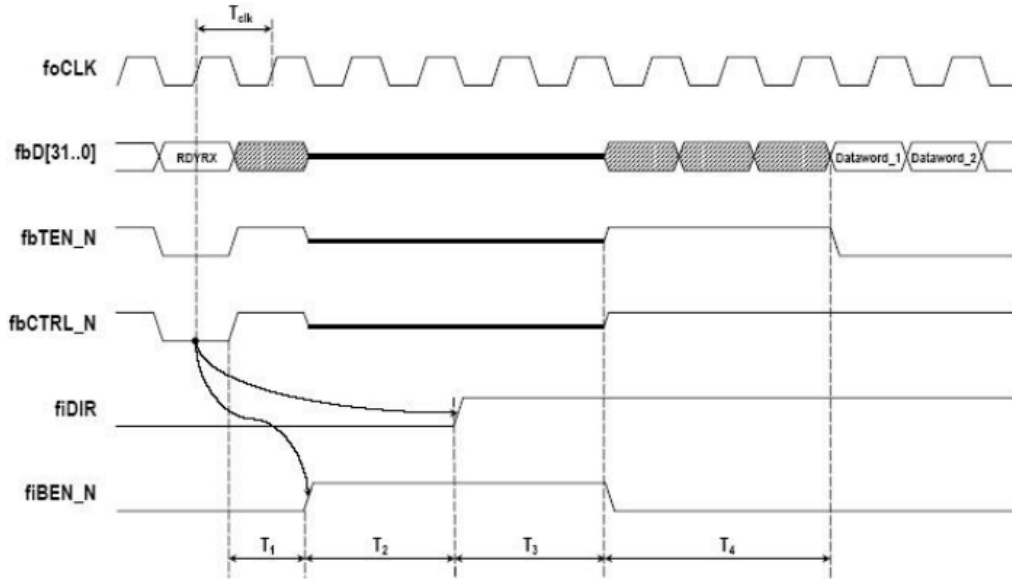


Figura 3.14: Diagrama de tiempos de una transmisión de datos.

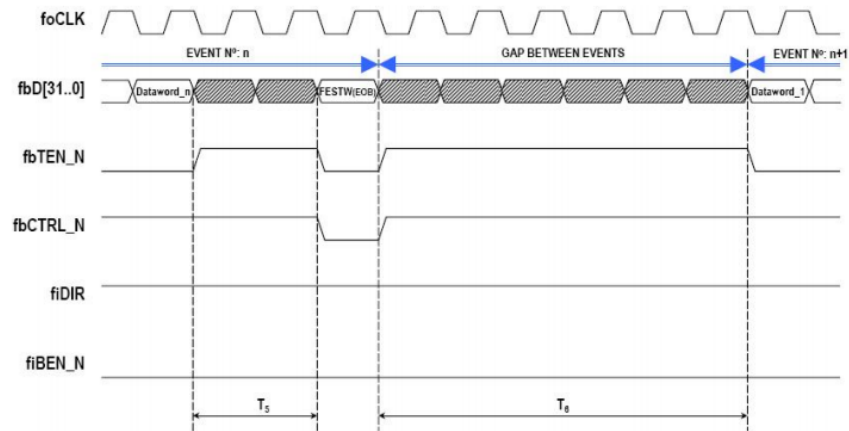


Figura 2.13. Fin de una transmisión de un evento y comienzo de una nueva transmisión de eventos.

Figura 3.15: Diagrama de tiempos de una transmisión de datos.

3. Sistema de comunicación y control de ACORDE
3.7 Comandos(FECMDs)

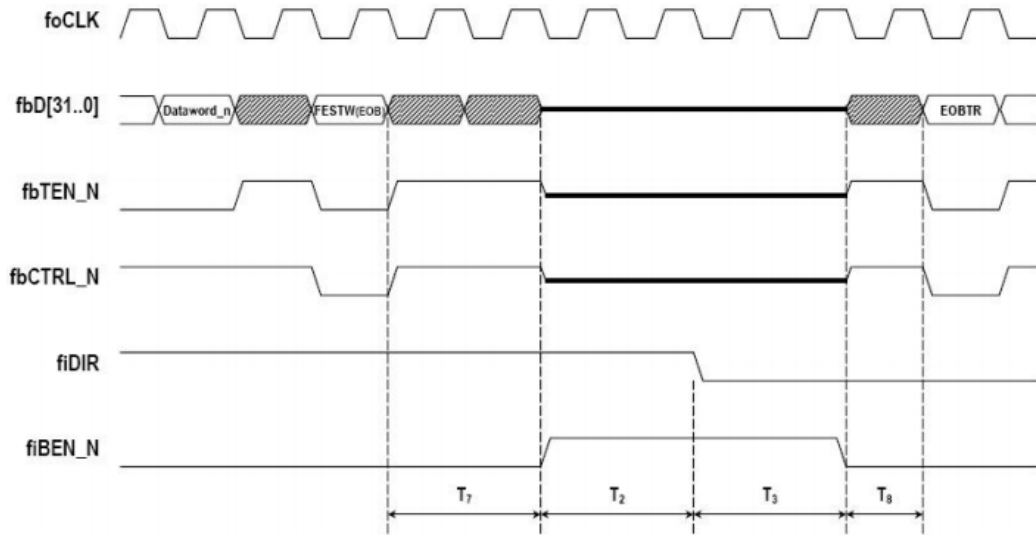


Figura 3.16: Diagrama de tiempos de una transmisión de datos.

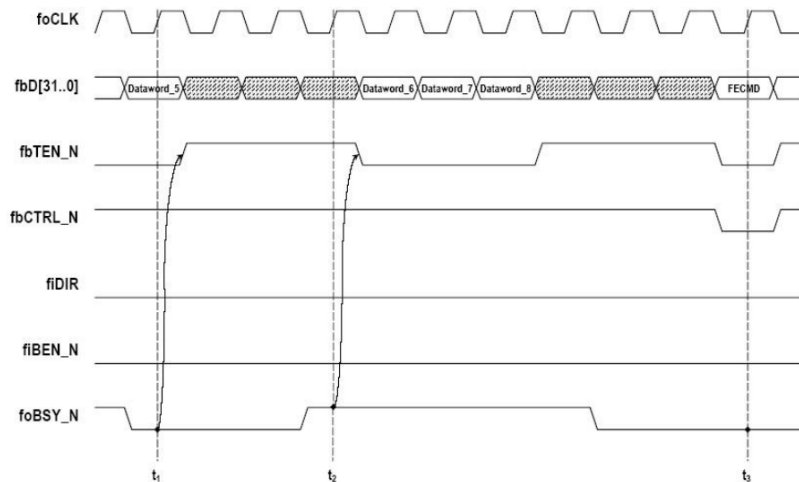


Figura 3.17: Flujo de control de la comunicación SIU-FEE.

3. Sistema de comunicación y control de ACORDE

3.7 Comandos(FECMDs)

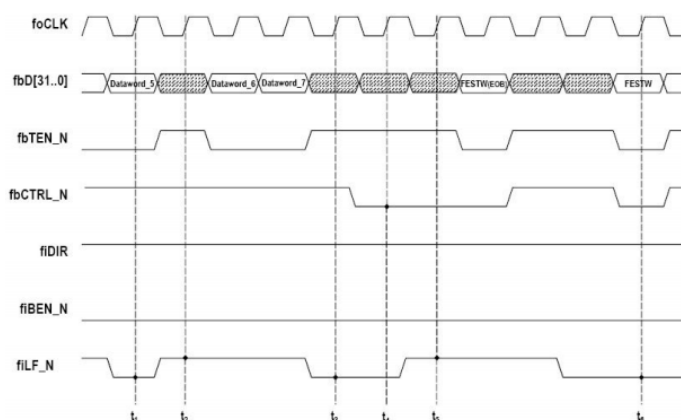


Figura 3.18: Control de flujo de información (FEE-SIU)

La FEE deberá interrumpir la transferencia de datos, cuando la señal `fiLF_N` este activada por la SIU; el proceso de activar o desactivar alguna señal por la FEE y SIU se lleva a cabo en el flanco de subida de la señal de reloj `foCLK`:

- La FEE deberá poner la señal `fbTEN_N` en un estado inactivo, cuando la señal `fiLF_N` sea activada por la FEE.
- La FEE deberá activar la señal `fbTEN_N`, en caso que la señal `fiLF_N` sea desactivada por la FEE y asegurar que la siguiente palabra de datos este habilitada en la FEE para continuar la transferencia.

La FEE deberá interrumpir la transferencia del comando `FESTW(EOB)` a la SIU al final de la transferencia de un evento, cuando la señal `fiLF_N` sea activada por la SIU.

- Si la señal `fiLF_N` es activada por la SIU, la FEE deberá activar la señal `fbTEN_N` cuando este lista para transferir un comando `FESTW(EOB)` al final de la transmisión de un evento.
- Independientemente del estado de la señal `fiLF_N`, la FEE deberá activar la seal `fbCTRL_N`, cuando este lista para transferir un comando `FESTW(EOB)`, al final de la transferencia de eventos.
- La FEE deberá activar la señal `fbTEN_N`, cuando la señal `fiLF_N` sea desactivada por la FEE y un comando `FESTW(EOB)` sea habilitado en la FEE para transferencia.

La FEE deberá tranferir el comando `FESTW` a la SIU, independientemente del estado de la señal `fiLF_N`. La SIU validará el comando `FESTW`, independientemente del estado de la señal de interfaz `fiLF_N`, esto nos indica que a transferencia del comando `FESTW` en la dirección FEE-SIU no deberá se suspendida por el control de flujo (Ver figura 3.18).

CAPÍTULO 4

Diseño del Sistema

4.1 Acercamiento al entorno

El desarrollo de sistemas electrónicos asociados a experimentos de física requiere un conocimiento avanzados en diversas disciplinas, que incluyen desde física experimental, física de detectores, diseño de tarjetas de circuitos electrónicos, diseño de circuitos integrados y desarrollo de software.

Los avances en la instrumentación, a menudo requieren el uso de tecnologías de primera línea. Estas tecnología tiende a evolucionar rápidamente, lo que obliga a los instrumentistas a actualizar sus habilidades en el uso de la tecnología constantemente. Además de los nuevos dispositivos electrónicos, es importante mantenerse al día con los avances en las herramientas de diseño asistido por computadora (CAD) e igualmente en proceso de fabricación. También es importante tener en cuenta la necesidad de la simulación y la creación de prototipos. Las herramientas de simulación y fabricación de prototipos pueden tener altos costos en tiempo y dinero, pero las consecuencias de saltarse este paso puede ser aún más costoso.

4.1.1 FPGA

La funcionalidad de un circuito integrado digital (IC) se logra mediante la integración de muchas compuertas lógicas interconectadas en un solo chip. La mayoría de los circuitos integrados son de aplicación específica, lo que significa que tienen una función fija para un propósito específico. Tales circuitos se denominan generalmente como circuitos de aplicación específica (ASICs). Un ASICs es de precio elevado y requiere una cantidad de tiempo considerable para su diseño, pero los costos por unidad es bajo lo que los hace ideales para producciones en masa. Sin embargo, en aplicaciones tal como en la instrumentación es deseable crear ICs con nuevas funciones en cantidades limitadas y en un tiempo relativamente corto. En estos casos el uso de arreglos de campo de compuertas lógicas programables (FPGA) es la mejor opción. Los FPGA son IC que contienen un gran número de compuertas lógicas configurables e interconexiones programables, permitiendo un rápido y económico desarrollo de nuevos diseños digitales.

Los FPGAs tienen una gran flexibilidad en comparación con los ASICs, son reprogramables y pueden cumplir con cualquier tarea específica y la mayoría de los errores que se puedan presentar pueden ser corregidos simplemente con el ingreso de un nuevo diseño de firmware en los dispositivos. Para hacer frente a las ventajas que un ASIC podría tener sobre el diseño en un FPGA, los vendedores han comenzado a incluir componentes con propósito específico dentro de un FPGA. Muchos FPGA modernos ahora contienen bloques dedicados de memoria, multiplicadores, componentes aritméticos, transmisores seriales de alta velocidad, e incluso CPU cores.

4.1.2 Método de diseño en FPGA

El desarrollo de un diseño para un FPGA implica escribir una descripción detallada de su funcionalidad, lo que comúnmente se denomina Lenguaje de Descripción de Hardware (HDL). En nuestros días los lenguajes de descripción de hardware más eficientes y usados son VHDL y Verilog.

El nivel funcional del código puede ser decidido por el usuario. Si uno prefiere usar un lenguaje de programación de alto nivel para llevar a cabo la descripción de la funcionalidad del diseño, a continuación, el compilador hará el trabajo de traducir el código para implementarlo en el FPGA, alternativamente el usuario puede elegir desarrollar su código a bajo nivel para describir el diseño en términos de las unidades básicas del FPGA, teniendo la ventaja que puede tener un mejor control sobre el funcionamiento de su diseño, En nuestro caso optamos por una mezcla entre alto y bajo nivel.

4.1.3 Implementación

La implementación de un diseño HDL en un FPGA consiste en tres partes fundamentales:

- Síntesis
- Colocación y ruteo
- Configuración del FPGA.

En la síntesis, el código en HDL se compila, el cual es un proceso en el cual se interpreta el código y se traduce en bloques de construcción elementales (LUT), durante el proceso de compilación el compilador realiza mejoras para obtener el diseño optimizado. El objetivo de la optimización es reducir el área de diseño y lograr la máxima velocidad mediante la reducción de recursos lógicos necesarios. Después de la optimización, un análisis de tiempo se lleva cabo, con el fin de determinar la propagación de la señal al mínimo y calcula la frecuencia máxima de reloj.

Una vez que la síntesis se lleva a cabo el diseño es descrito mediante el uso de componentes básicos del FPGA conectados entre sí. Estos componentes básicos deben de colocarse y

conectarse dentro del FPGA de la mejor forma posible, para llevar a cabo este paso se emplea un nuevo proceso de optimización basado en algoritmos avanzados. Este proceso lleva por nombre colocación & ruteo. Después que se realizó el proceso de colocación y ruteo se realiza un análisis de tiempos donde se calcula la propagación de la señal a través de las rutas reales entre los componentes básicos del FPGA, este proceso nos da información precisa acerca del tiempo de propagación de la señal en el diseño. Una vez realizados tales procesos se genera un archivo de configuración, el cual se programa dentro del FPGA.

Para crear un diseño óptimo es esencial contar con un profundo conocimiento de la arquitectura del FPGA a utilizar, conocer las capacidades, recursos, características especiales y limitaciones del dispositivo para poder planificar el diseño con antelación y utilizar todos los recursos apropiadamente.

4.2 Características Generales

La electrónica de ACORDE debe de ser capaz de satisfacer lo siguiente:

- ACORDE proporcionará la señal de disparo de muones simples y la posición espacial donde llego al magneto de ALICE. Esta información sera usada para calibrar detectores centrales de ALICE.
- Para el estudio de eventos múltiples, ACORDE proporcionará la señal de disparo de multicoincidencia y almacenará la información.
- Supervisar el desarrollo del arreglo de contadores de centelleo de ALICE.

Requerimientos

- * Proveer la información acerca del rastreo de los rayos cósmicos en los tiempos requeridos por el experimento ALICE.
- * Para el estudio de eventos múltiples, ACORDE proporcionará la señal de disparo de multicoincidencias y almacenará la información.
- * Generar la señal de disparo de muon único en 25 ns.
- * Generar la señal de disparo de multicoincidencia en 75 ns.
- * Comunicar el detector ACORDE con el sistema de adquisición de datos (DAQ) del experimento ALICE a través de los enlaces ópticos de 2.5 Gbps a través del DDL
- * Guardar para posteriormente enviar la información del canal o canales activados al DAQ.
- * Incluir un subsistema que sea capaz de recibir y decodificar los mensajes de disparo que vienen del CTP de ALICE.
- * Decodificar los mensajes de disparo del CTP, para posteriormente generar el encabezado común de datos y realizar una transmisión exitosa con el DAQ.

4.3 Electrónica de ACORDE

La tarjeta principal de ACORDE esta constituida por 3 partes fundamentales:

- Tarjeta TTCrq (Comunicación ACORDE-CTP).
- Tarjeta SIU (Comunicación ACORDE-DAQ).
- 2 FPGA (Procesamiento de la información y comunicación (CTP-ACORDE-DAQ)).

La tarjeta principal (vea figura 4.1) de ACORDE recibe 120 señales en forma diferencial que vienen de 60 tarjetas electrónicas asociadas a cada módulo de ACORDE. Estas señales se convierten a niveles de voltaje en el estándar CMOS que es el ideal para el correcto funcionamiento de los FPGA, de la familia cyclone, de la empresa Altera, que constituyen al elemento principal en el procesamiento de la información en la electrónica de ACORDE, así mismo se cuenta con una tarjeta TTCrq que se emplea para tener una óptima comunicación entre la electrónica y el CTP de ALICE, dentro de la tarjeta TTCrq contiene un circuito integrado de propósito específico (TTCrx) que se encarga de distribuir los mensajes de los diferentes tipos de disparo que se manejan ALICE y de entregar información de característica del LHC para construir el CDH y tener una excelente identificación del tipo de evento procesado. Por otra parte la tarjeta TTCrq cuenta con un QPLL la cual nos permite la recuperación del reloj del LHC.

Por otra parte se tiene una tarjeta SIU que nos ayuda con la interfaz entre ACORDE-DAQ a través de un enlace óptico de 2.5Gb/s , cumpliendo ciertos estandares de transmisión estudiados a detalle en el capítulo 2, a través de la SIU se tiene que transmitir toda la información generada de ACORDE cuando este en funcionamiento ya sea como detector de disparo o como detector de lectura, así mismo la SIU nos permite realizar el proceso de configuración de todos los parámetros disponibles en el detector ACORDE y realizar el proceso de calibración el cual nos genera información útil para saber con precisión el estado de cada uno de los módulos de centelleo que constituyen al detector ACORDE.

La parte fundamental de esta tarjeta la constituyen dos FPGA (cyclone III) de la empresa altera cuyas características principales se muestran en la tabla 4.1. El proceso de decodificar los mensajes de disparo, configurar el modo de operación del detector, generar el encabezado común de datos, revisar el corrector funcionamiento de los módulos del detector ACORDE y transmitir la información generada duran la operación del detector se realiza como ya antes mencionado dentro de dos FPGA, cada uno contiene bloques diseñados con propósito específico que durante la evolución de este capítulo se explican.

Dispositivo	Elementos Lógicos	Número de bloques M9k	Total de RAM (bits)	Multiplicadores (18 x 18)	PLLs	Redes de reloj	I/Os
EPC3C10	10,320	46	4 223,936	23	2	10	182

Tabla 4.1: Características del FPGA Cyclone III

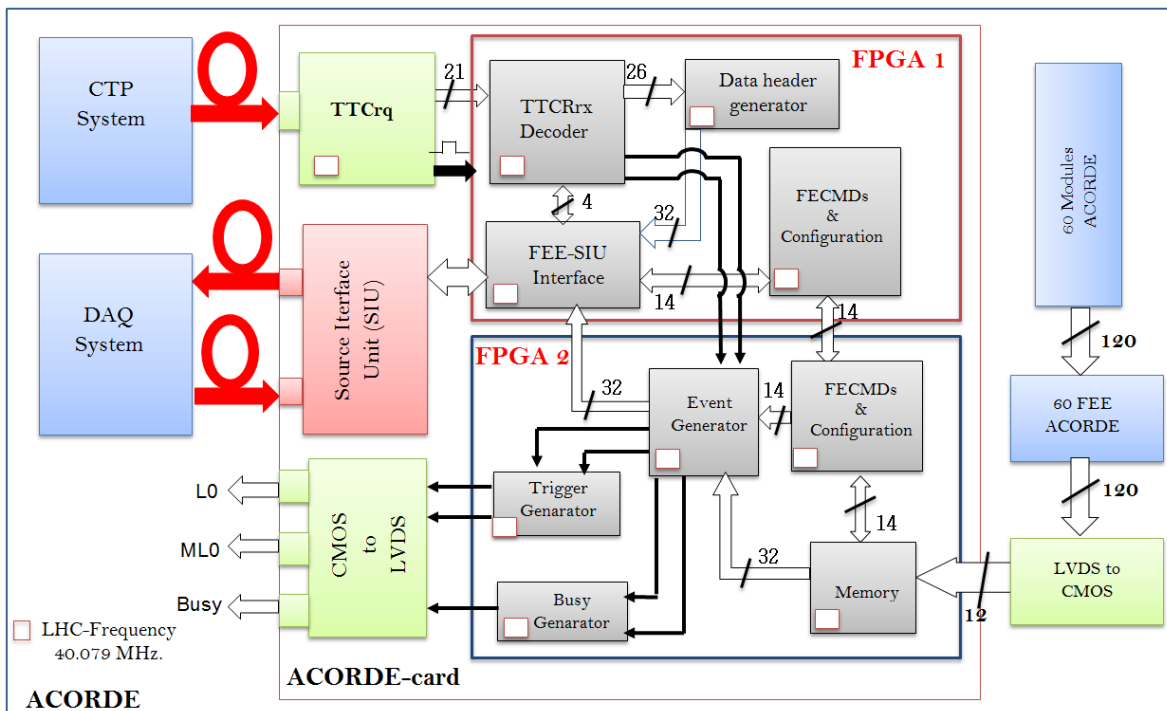


Figura 4.1: Diagrama a bloques de la tarjeta principal de ACORDE

4.3.1 Decodificador TTCrx

En la figura 4.2 se muestra el diagrama esquemático del módulo "TTCrx_decoder", que como su nombre lo indica se encarga de decodificar los mensajes de disparo provenientes del CTP de ALICE, de igual manera es el responsable de formar correctamente el encabezado de datos y de enviar las señales de control L2A y L2r que despiertan a módulos siguientes.

Este módulo se compone a su vez en 3 submódulos los cuales son BC_Latch, el cual se encarga de capturar de forma efectiva datos provenientes del CTP general del LHC que identifican de manera individual al evento procesado, TTCrx_Latch el cual se encarga de almacenar temporalmente la información transmitida por el CTP de ALICE, TTCrx_Decoder & CDH_Formater se encarga de leer la información de los módulos anteriores y en base a esa información construir correctamente el encabezado común de datos.

Este módulo opera con la frecuencia del LHC (40.079 MHz.) proveniente del circuito de propósito específico TTCrx; cuenta con diversas señales de control para tener una operación y sincronización óptima.

El bus de datos Dout[11..0] contiene la información correspondiente al tipo de disparo procesado, SubA[3..0] indica el tipo de mensajes de disparo (ver tabla 4.2), la señal DoutStr válida los datos disponibles en Dout y SubA, la señal DQ[3..0] nos indica si la información

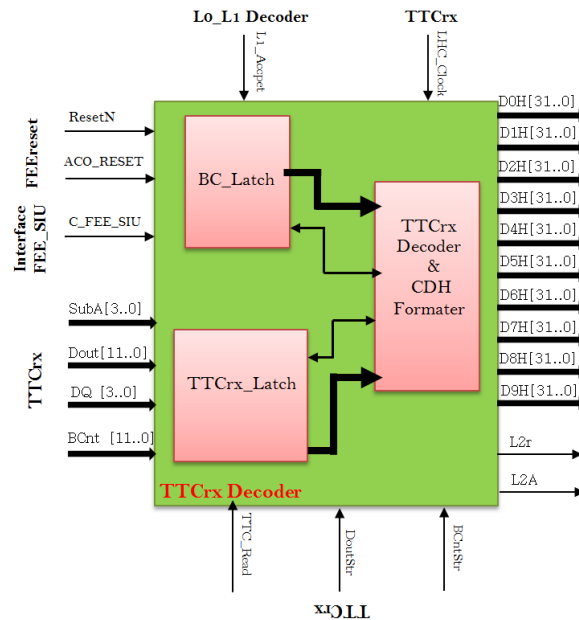


Figura 4.2: Diagrama esquemático del bloque *TTCrx_Decoder*

contenida es ese instante corresponde a una dirección individual o a un comando, la señal BCnt[11..0] es el primer dato que llega y corresponde a información que nos ayuda identificar el tipo de evento, esta señal es válida y puede ser leída cuando lo indica la BcntStr esta activa. Finalmente despues de decodificar los mensajes de disparo el módulo hace entrega de los datos que conforman el encabezado de común de datos en señales de salida de 32 bits cada una.

SubA	Mensaje
0	Espera
1	L1 Header
2	L1 Message
3	L2 Header
4	L2 Data
5	L2r address
6	RoI Header
7	RoI Data

Tabla 4.2: Mensajes disponible de acuerdo al código en la señal SubA.

En el diseño del módulo "decoder_TTCrx" se emplea el uso de una maquina de estados finitos (vea figura 4.3), la cual cubre en su totalidad los diferentes tipos de mensajes que se observan en la tabla 4.2, los cuales son enviados desde la CTP; con el uso de esta máquina de estados garantizamos la decodificación de toda la información correspondiente a los eventos

- Constructor del encabezado común de datos.
- Leer la información del evento
- Leer palabras de control y comandos de configuración.
- Control de interfaz FEE-SIU.

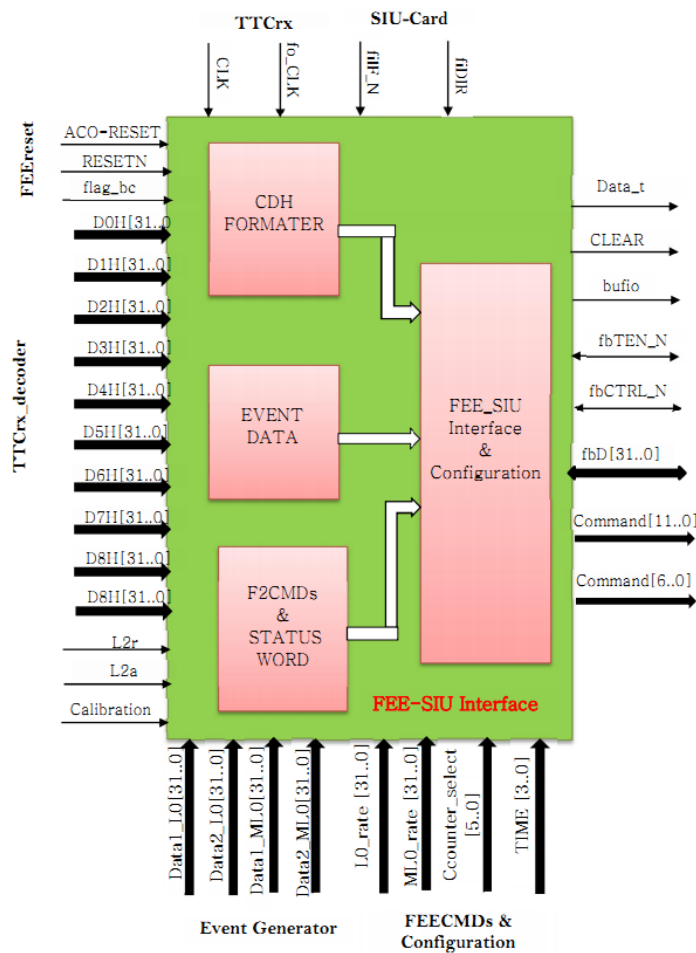


Figura 4.4: Diagrama esquemático del módulo de "FEE_SIU_Interface"

Todos los bloques dentro del modulo son controlados por una máquina de estados finitos (Ver figura 4.5), la cual contienen los estados necesarios para leer y transmitir las palabras de configuración del detector ACORDE, transmitir la información generada durante la toma de datos, con el formato específico que lo requiere el sistema de adquisición de datos de ALICE, a si mismo es capaz de transmitir la información acerca del estado de cada uno de los módulos que conforman al detector, generada en un proceso de calibración.

Leer palabra de control y configuración

El módulo se activa a la llegada de los comandos "FESTRD" ó "FECTRL".

El comando "FESTRD" indica al módulo que la tarjeta SIU esta leyendo una palabra de estado de la FEE de ACORDE, las palabras predefinidas en la electrónica de acorde se muestran en la tabla 4.3.

El comando "FCTRL" indica al módulo que la SIU esta escribiendo un comando a la FEE.

Control de interfaz FEE-SIU

Este módulo se encarga del manejo de las señales de control que contiene la tarjeta SIU. Así mismo, se encarga del manejo de la transmisión de datos generados durante la operación de ACORDE, también es el responsable de distribuir los mensajes de configuración y palabras de estados de la electrónica de ACORDE.

codigo	Palabras de estado
1	Leer # Multicoincidencia
2	Lee valor de contador
3	Lee el tiempo de calibración
4	Lee # de modo del L0
5	Lee # de modo de ML0
6	Lee # rate en L0
7	Lee # rate en L0
8	Lee # rate en ML0
9	Lee # rate en ML0
A	Lee canales activados
B	Lee canales activados
C	Lee canales activados
D	Lee canales activados
E	Calibración en proceso
F	Lee contador seleccionados

Tabla 4.3: Lista de palabras de estado disponibles de ACORDE.

4.4 Comunicación con el FPGA2

Como ya se mencionó anteriormente, la tarjeta de la electrónica de ACORDE se constituye de dos FPGA como elementos principal (Vea figura 4.1). La comunicación entre estos

dos dispositivos se hace mediante el uso dos bloques de propósito específico denominados "FECMDs & Configuration" (Vea figura 4.6).

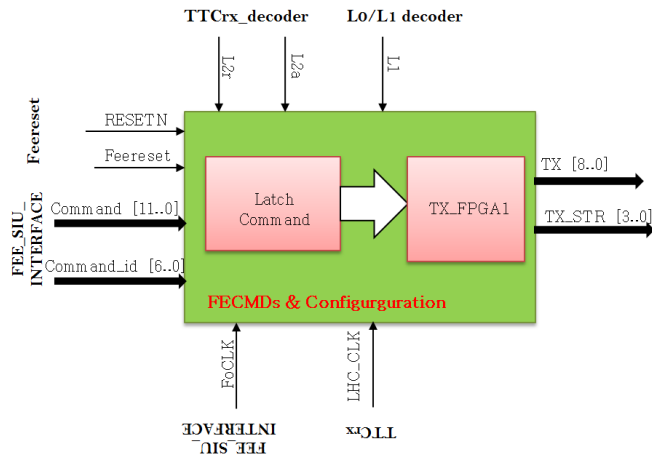


Figura 4.6: Diagrama Esquemático del módulo "FEECMDs & Configuration"

Este módulo está constituido de dos bloques auxiliares "Latch Command" y "TX_FPGA1". El módulo Latch_command realiza una constante revisión de la señal "command_id" la cual proviene del módulo "FEE_SIU_Interface", la cual contiene la identificación del tipo de palabra o comando de configuración (ver tabla 4.3) a transmitir, una vez identificando el comando lo envía al siguiente módulo para su transmisión.

El módulo "TX_FPGA1" está controlado por una máquina de estados finitos (ver figura 4.7), cuya transición entre estados la realiza en el flanco de subida de la señal de reloj del LHC, los estados disponibles constituyen al tipo de comando a transmitir y cada estado transmite de manera individual un comando por el bus de datos "TX[8..0]" mientras que la señal TX_STR transmite un identificador a cada tipo de comando presente en el bus de datos "TX" (Ver Tabla 4.4).

4.5 FEE_RESETN

Una de las necesidades especiales del detector es poder regresar a su estado inicial a todos los módulos que conforman al sistema, para cumplir con ello se implementó un módulo destinado a cumplir esa tarea específicamente.

En la figura 4.8, se muestra el diagrama esquemático correspondiente al módulo "Feeresetn" se encarga de mandar una señal de reset a todos los módulos contenidos en el FPGA1, siempre y cuando la señal de control "FEEreset" proveniente del módulo FEE-SIU-Interface, sea activada. El bloque opera con la señal de reloj del LHC.

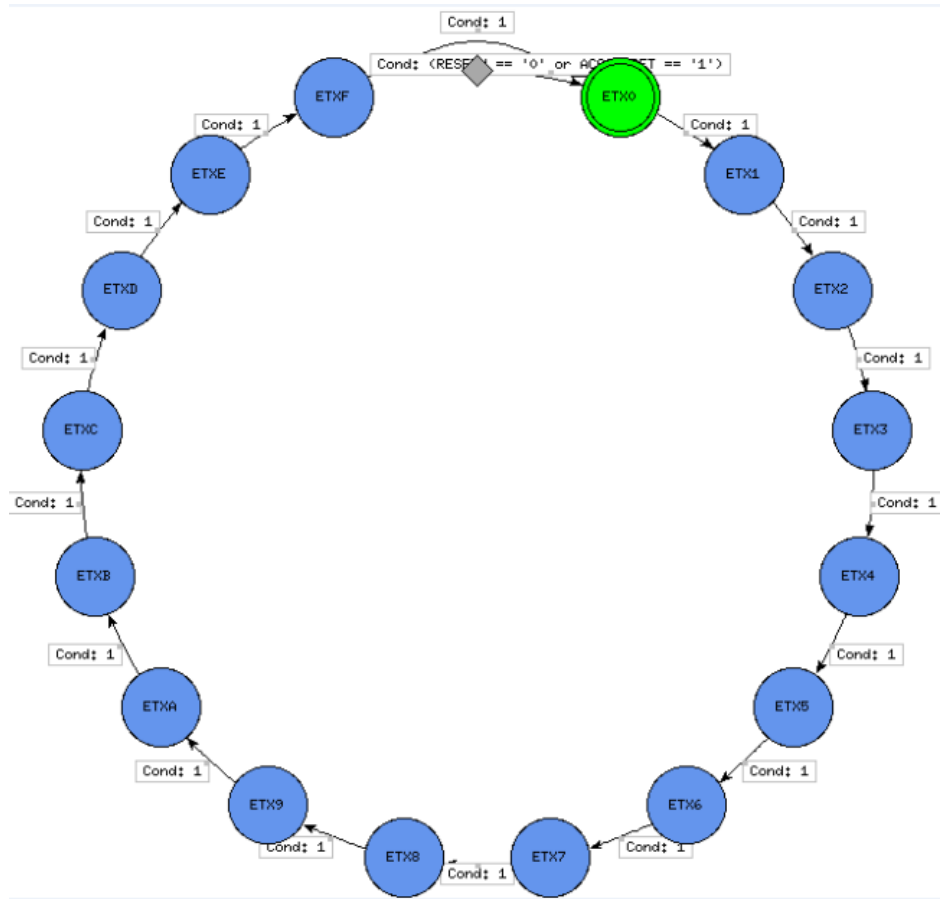


Figura 4.7: Máquina de estados finitos correspondiente al módulo "FECMDs&Configuration"



Figura 4.8: Diagrama esquemático del módulo "Feeresetn"

codigo	Comando presente TX[9..0]
0	Canales activados [0..59] & L1 & L2a & L2r
1	MCN & Tiempo & Iniciar Calibración
2	Modo_ML0 & Modo_L0 L0_rate[30..26]
3	Selección Contador & L0_rate[25..23]
4	L0_rate[22..14]
5	L0_rate[13..5]
6	ML0_rate[26..18]
7	ML0_rate[17..9]
8	ML0_rate[8..0]
9	Habilitar Canales [59..51]
A	Habilitar Canales [50..42]
B	Habilitar Canales [41..33]
C	Habilitar Canales [32..24]
D	Habilitar Canales [23..15]
E	Habilitar Canales [14..6]
F	Habilitar Canales [5..0]

Tabla 4.4: Comandos a transmitir al FPGA2.

4.6 Decodificar de disparos L0/L1

Como se estudió en el capítulo anterior, los disparos de tipo L0 y L1 arriban en la misma línea de datos ("L1A") del chip TTCrx, por lo tanto es necesario un decodificador que distinga entre estos dos tipos de disparos.

La forma en que opera el módulo "decoder_L0" (ver figura 4.10), se basa en el uso de una pequeña máquina de estados (ver figura 4.11), en la cual el programa hace una comparación de cuantos ciclos de reloj (LHC_CLK) dura activa la señal "L1A", debido a que se tiene el conocimiento que una señal correspondiente a un mensaje L0 dura "25 ns" que es aproximadamente un ciclo de reloj, si la señal de entrada tiene una duración de 50 ns correspondería a un mensaje de tipo L1. Para asegurarse la integridad de la toma de datos el módulo inicia su operación siempre y cuando llegue primero un disparo L0, en caso de que ocurra que llegue primero un disparo tipo L1 descarta el evento y espera la llegada de un L0. La transición entre estados se realiza en el flanco de subida de la señal de reloj(LHC_CLK).

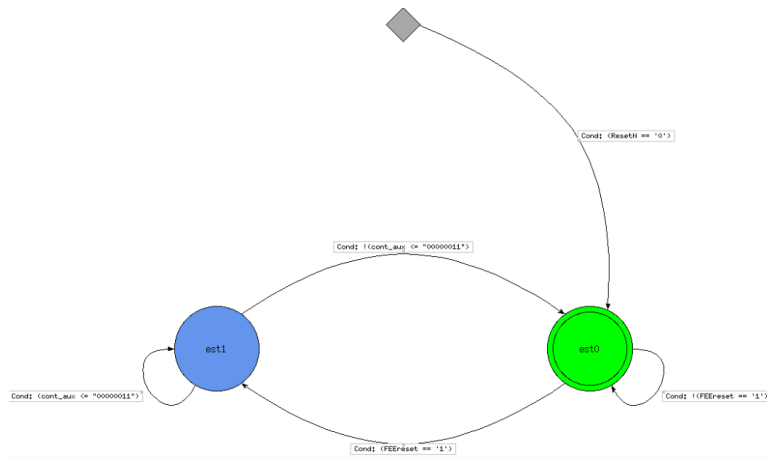


Figura 4.9: Máquina de estados finitos correspondiente al módulo "Feeresetn"



Figura 4.10: Diagrama esquemático del módulo "decoder_L0"

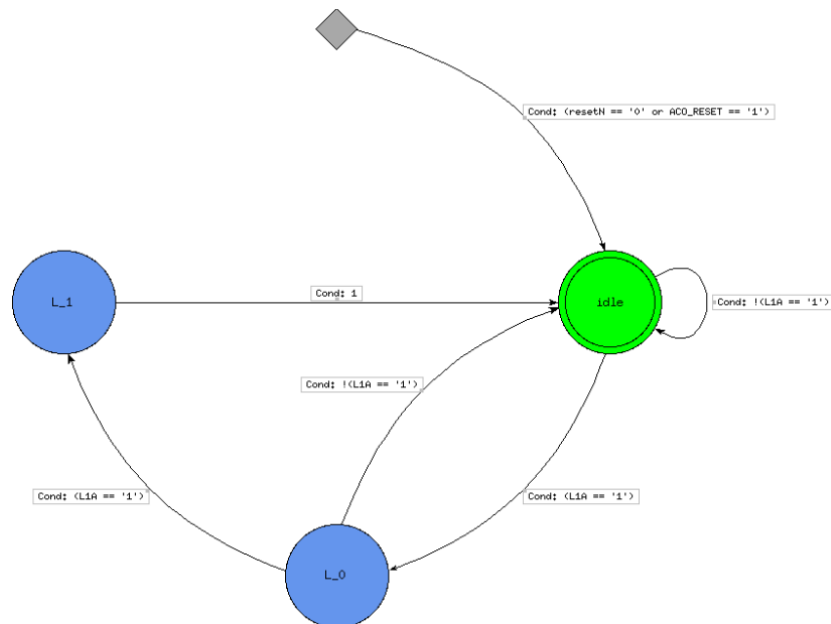


Figura 4.11: Máquina de estados finitos correspondiente al módulo "decoder_L0"

4.7 Generador de eventos

Una parte muy importante en el detector ACORDE para el estudio de los rayos cósmicos es poder almacenar y transmitir toda la información generada durante su operación. Para llevar a cabo esta tarea se diseñó e implementó el módulo denominado "Event_Generator."

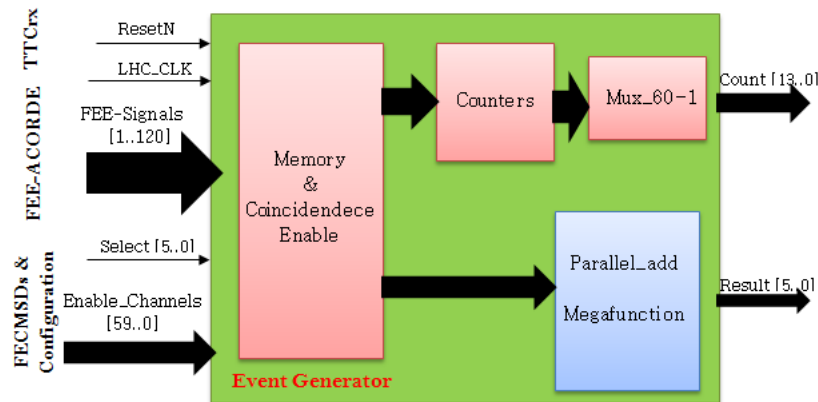


Figura 4.12: Diagrama esquemático del módulo "EventGenerator"

En la figura 4.12, se muestra el diagrama esquemático del módulo Event_Generator el cual a su vez esta conformado con diversos bloques cada uno cumpliendo una tarea específica.

Durante el funcionamiento del detector ACORDE, este modulo hace la lectura de las 120 señales provenientes de 60 tarjetas electrónicas asociadas a los módulos que conforman el detector, las almacena temporalmente, posteriormente realiza una una operación lógica "and" entre las señales adyacentes (i.e. S1 and S2) con el fin de obtener la coincidencia entre los plásticos centelladores que conforman a cada módulo del detector (Ver Capítulo 2), para obtener la información de solo los canales participantes en la prueba se realiza otra operación lógica "and" esta vez con el parámetro de configuración de los canales activados. El siguiente paso que realiza es incrementar el contador asociado a cada módulo de ACORDE en caso de que cumpla con las condiciones de la prubea, finalmente para el proceso de transferencia de información se requiere pasar la información de cada contador por un multiplexor (60 a 1).

Por otra parta para el estudio de eventos de multimuones la información generada por las operaciones anteriormente mencionadas pasan por una megafunción "Parallel_add" la cual viene incluida en el software de desarrollo Quartus, esta megafunción nos ayuda entre otras cosas a reducir la latencia para generar la señal de disparo de multicoincidencia y cumplir con los requerimientos que el experimento ALICE necesita.

4.8 Generador de la señal de busy

Uno de los principales requisitos del CTP, es que la electrónica de ACORDE tiene que cumplir con la generación de la señal de ocupado "Busy".

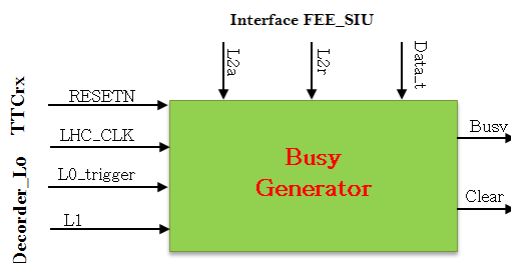


Figura 4.13: Diagrama esquemático del módulo "BusyGenerator"

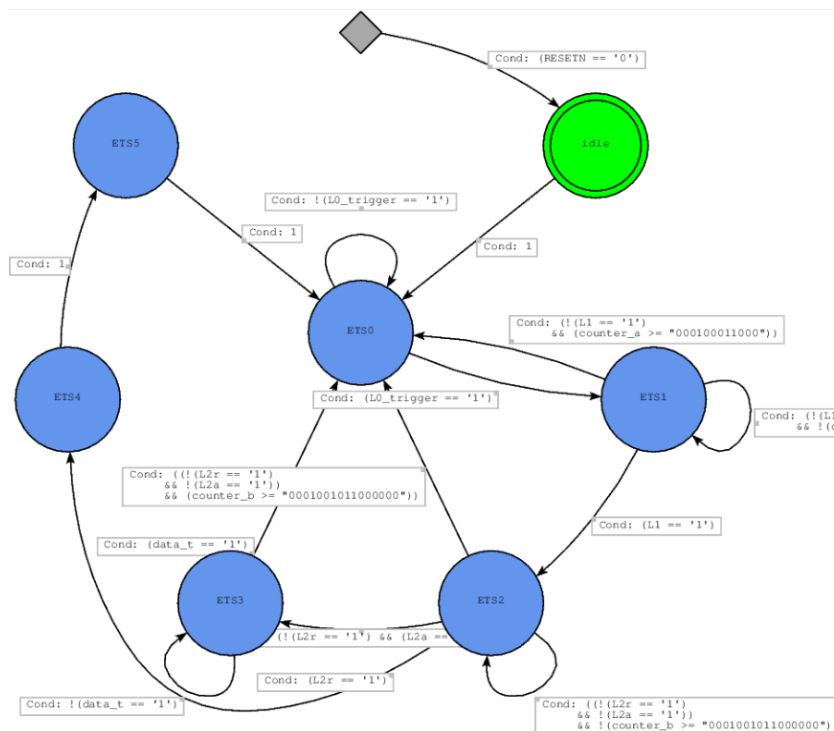


Figura 4.14: Máquina de estados finitos correspondiente al módulo "BusyGenerator"

En la figura 4.13, se muestra el diagrama esquemático, el módulo se basa en el manejo de una máquina de estados finitos que se muestra en la figura 4.14. La señal de Busy se activa a la llegada de la señal de disparo L0, una vez llegando el L0 el sistema debe esperar la llegada de un mensaje tipo L1, en un tiempo aproximado de $6.5\mu s$ en caso de que no llegue en ese

tiempo la señal de Busy se tiene que desactivar y el sistema debe de regresar a su posición original, por otra parte, si el L1 arriba a la electrónica de ACORDE en el intervalo de tiempo antes mencionado es momento de realizar una transición de estados y esperar por el siguiente tipo de disparo que puede ser un L2r o bien un L2a, en caso de que sea un L2r el que llego el sistema tiene que desactivar la señal y regresar a su posición inicial, sin en cambio, si el tipo de disparo que llego fue un L2a la señal de Busy debe de permanecer activa hasta que se halla completado la transferencia del evento. El intervalo de tiempo que puede tardar en llegar un L2a es de $88 \mu s$. La transición entre estados se realiza en el flanco de subida de la señal de reloj del LHC.

4.9 Generador de la señal de trigger

El sistema de disparo de ACORDE, ha sido diseñado y optimizado para ser configurado en dos modos de operación:

- Evento simple (L0)
- Evento de multicoincidencia (ML0)

Para la generación de la señal de disparo se implemento un módulo llamado "Trigger Generator" (Ver figura 4.15). De acuerdo a los parámetros de configuración ingresados por el usuario el módulo interpreta en que modo esta operando, en el caso de operación de un evento simple, el módulo activa la señal de disparo (L0) cuando al menos un módulo del detector ACORDE sea impactado y cumpla con los parámetros de configuración (i.e. Que el módulo impactado este habilitado). Por otra parte si el módulo esta en modo de multicoincidencia, la señal de disparo se activara siempre y cuando cumplan con los parámetros de configuración; esto es que se hallan impactado en una ventana de tiempo de 100 ns el número de módulos que conforman el parámetro de configuración de multicoincidencia y que ademas los módulos impactados estén habilitados. También se implementaron diversos tipos de trigger que sirven de apoyo en la depuración del sistema electrónico del CTP-ALICE.

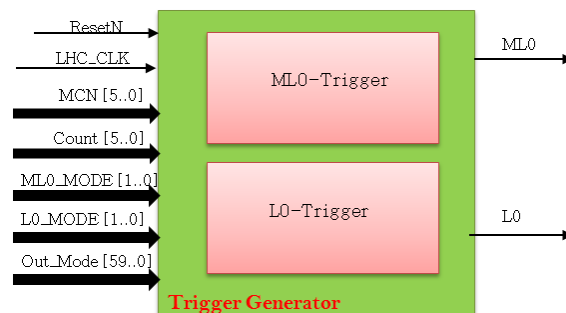


Figura 4.15: Diagrama esquemático del módulo "TriggerGenerator"

CAPÍTULO 5

Simulación y resultados del proceso de adquisición de datos

5.1 Simulación

Durante el desarrollo de un sistema basado en el uso de dispositivos FPGA es importante verificar el correcto funcionamiento del diseño HDL. El diseño se puede verificar mediante el uso de software especializado.

La simulación del firmware de ACORDE hace uso de software especializado de las empresas (Mentor Graphics y Cadence) el cual permitió realizar pruebas a diversos niveles dentro del FPGA que van desde simular solo la lógica de programación hasta tener una simulación a muy bajo nivel tomando en cuenta la latencia de propagación de la señal en el FPGA, el comportamiento de los elementos lógicos trabajando a la frecuencia máxima de operación del diseño.

Durante el proceso de simulación del firmware del detector ACORDE, no solo se verificó el correcto funcionamiento del diseño en condiciones ideales sino que se trato de llevar al limite el diseño para ver cual era su comportamiento, lo que nos dio como resultado mucha información útil para posteriormente optimizar el diseño.

Cada parte que compone al sistema de ACORDE tiene su propio programa de simulación y así mismo existe un programa de simulación global en la que se verifica el correcto funcionamiento de todo el sistema.

5.1.1 Simulación TTCrx_Decoder

Gracias al estudio que se realizo al procesador central de disparo de ALICE, se logró crear un sistema capaz de reproducir los diferentes mensajes de disparo, con los tiempos y en el orden

de transmisión específicos del CTP.

En la figura 5.1 se muestra el diagrama a bloques del proceso que se siguió para realizar la simulación del módulo "TTCrx_decoder", el proceso inicia con la lectura de un archivo de texto que contiene mas de 1000 mensajes de disparo, posteriormente el sistema "ACO_sim" interpreta esta información convirtiéndola en estímulos los cuales ingresan al módulo bajo prueba, finalmente el módulo procesa estos estímulos y genera dos archivos de salida (Forma de Onda y Archivo de Texto), con estos archivos y el archivo de entrada podemos analizar el comportamiento y saber si es el adecuado, de no ser así el proceso de depuración resulta más fácil.

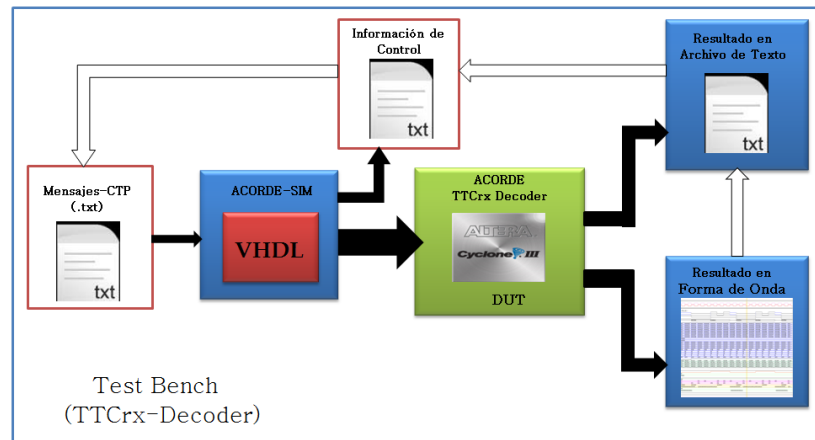


Figura 5.1: Diagrama a bloques del proceso de simulación del módulo (TTCrx-Decoder)

En la figura 5.2 se muestra el proceso de llegada de la información correspondiente al BUNCH.ID el cual es el primer dato que llega desde el CTP, es un elemento muy importante del encabezado de común de datos (colocado en la casilla 4), ya que este valor nos da información acerca de la luminosidad del haz, este valor esta sincronizado con todo el LHC. Como se estudio en el capítulo 2, la información contenida en "BcntStr" es valida solo cuando las señal "BCnt" esta activa.

En la figuras 5.3, 5.4, se muestra el proceso de lectura de la información correspondiente al mensaje de disparo L2a, se aprecia que la información disponible en la señal "Dout" solo se guarda cuando la señal "DQ =0000" y "DouStr" esta activa tal como se estudio en el capítulo 2. La información se coloca en la posición que le corresponde del encabezado común de datos una vez que el programa interprete el valor de la señal "SubA" y le asigne a la maquina de estados el estado que le corresponda.

En la figura 5.5, se muestra el comportamiento del módulo cuando interpreta que llega una señal L2r. A la llegada del L2r el módulo debe borrar toda la información que hasta ese

5. Simulación y resultados del proceso de adquisición de datos

5.1 Simulación

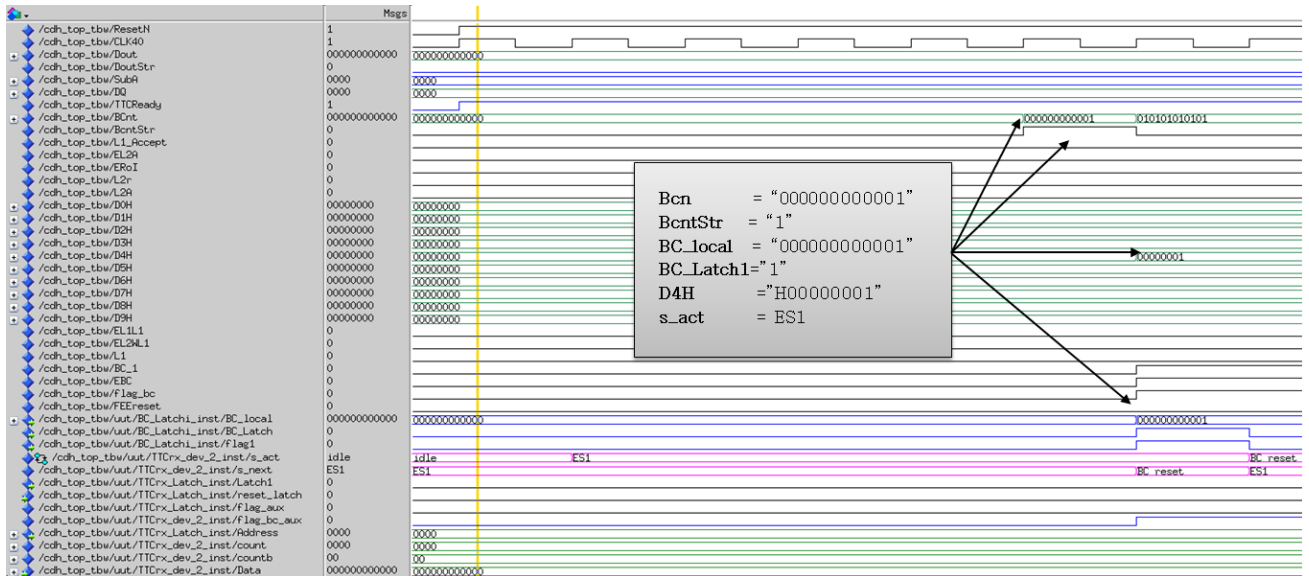


Figura 5.2: Proceso de adquisición del primer dato enviado por el CTP (Bunch_ID).

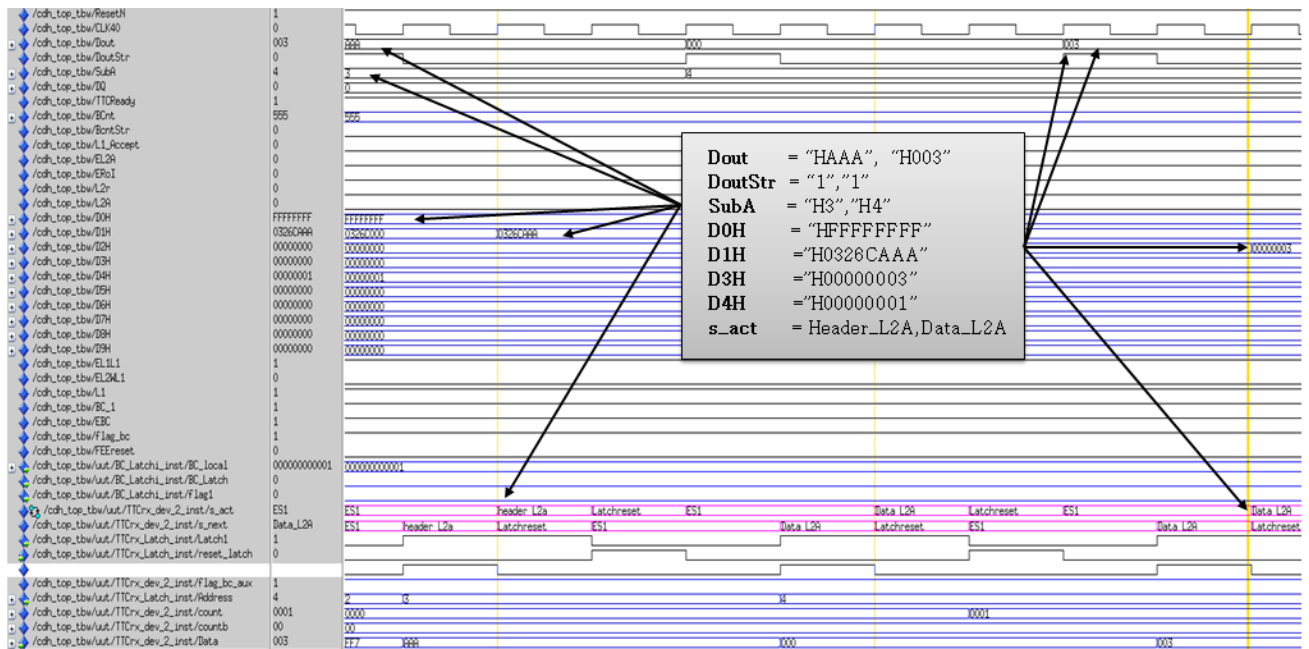


Figura 5.3: Procesamiento del mensaje de disparo L2A.

5. Simulación y resultados del proceso de adquisición de datos

5.1 Simulación

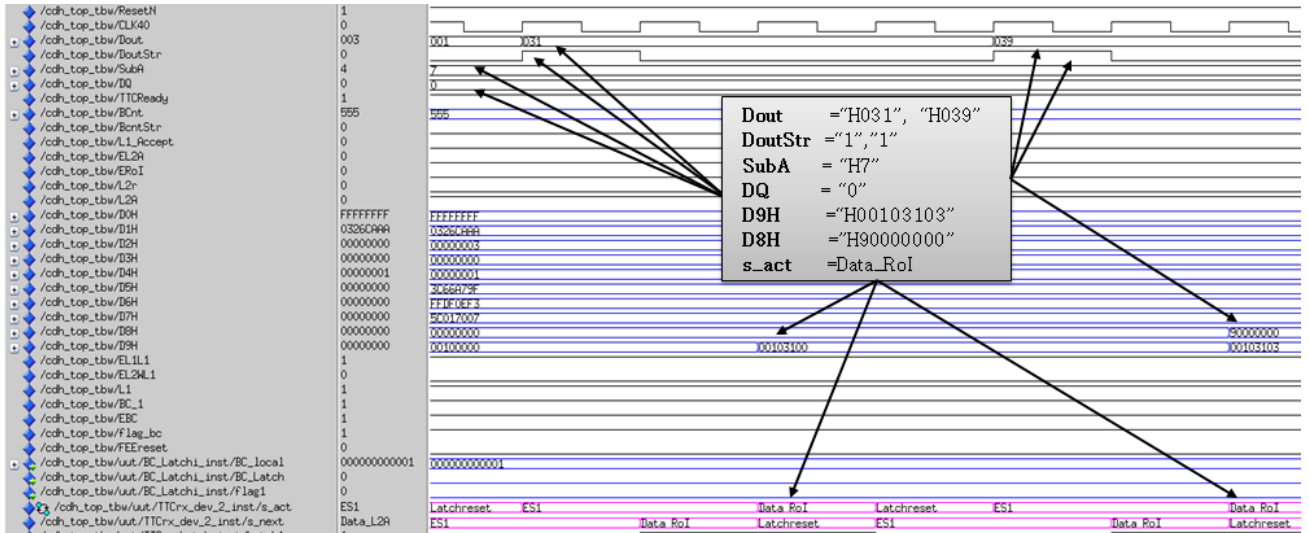


Figura 5.4: Procesamiento del mensaje de la region de interes (RoI).

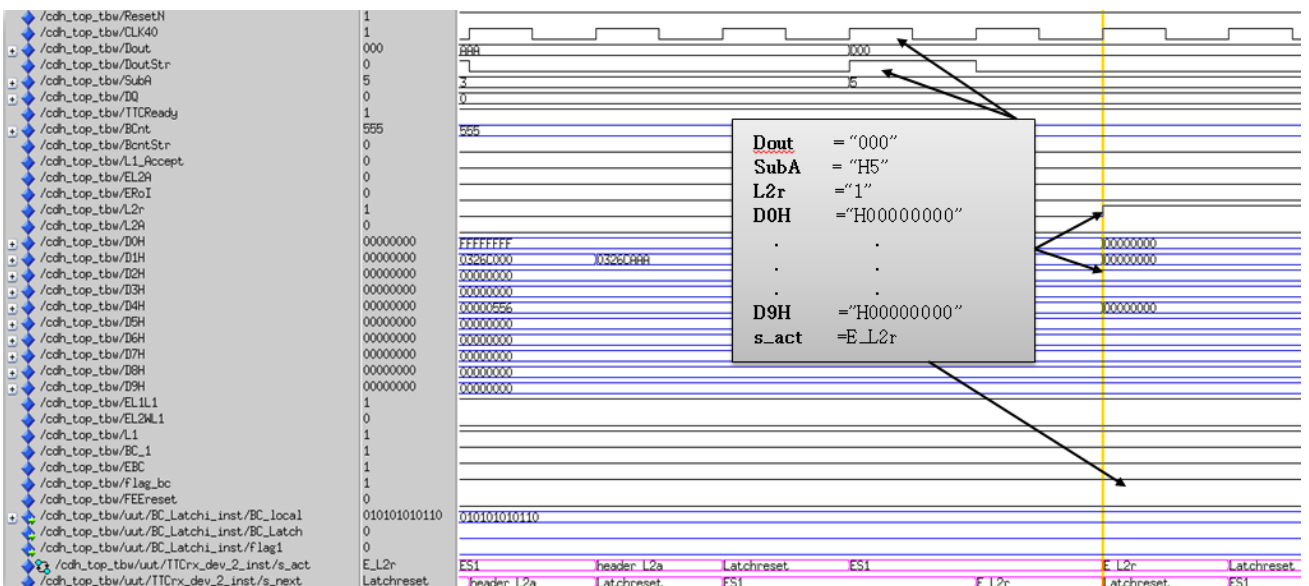


Figura 5.5: Procesamiento del mensaje L2r.

momento lleva y debe dirigirse a su posición inicial, y estar disponible para el próximo evento.

5.1.2 Decodificador de mensajes y señal de ocupado

En la figura 5.6, se observa el diagrama a bloques del proceso de simulación que realizó a los módulos, "decoder_L0" , "Busy_genrator".

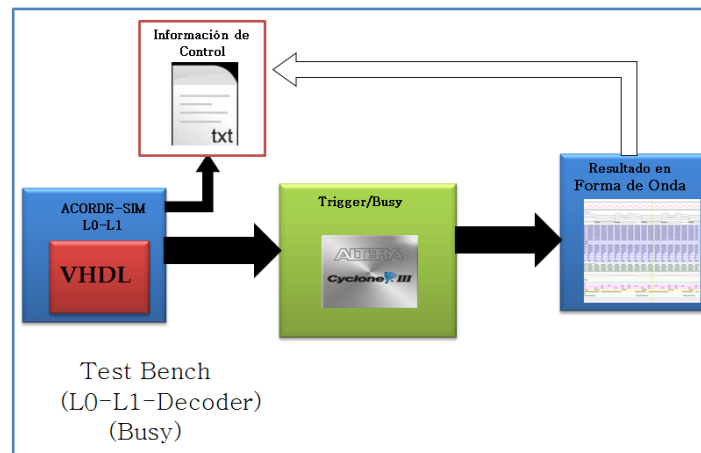


Figura 5.6: Diagrama a bloques del proceso de simulación del módulo (L0-L1-Decoder & Busy).

Por otro lado en la figura 5.7, se muestra el proceso de la identificación de la señales de disparo L0, L1, L2A y la generación de la señal de ocupado mediante el siguiente proceso.

1. Llega una señal de disparo L0 (25 ns).
2. El firmware lo interpreta y activa la señal de "L0"
3. La señal de "Busy" se activa y espera por la señal de disparo L1 (tiempo limite 6.5 μ s).
4. Llega la señal de disparo L1 (50 ns)
5. El firmware lo interpreta y activa la señal "L1", y espera por la señal L2a o L2r (tiempo limite 88 μ s).
6. Llega la señal de "L2A", el firmware mantiene la señal de busy activa hasta el arribo de la señal "datat" la cual nos indica que el proceso de transmisión de información ha concluido.
7. Al arribo de la señal de "datat" la señal de "busy" se desactiva.

- Se genera la señal de limpiar los registros de todo el firmware para que este disponible para el próximo evento.

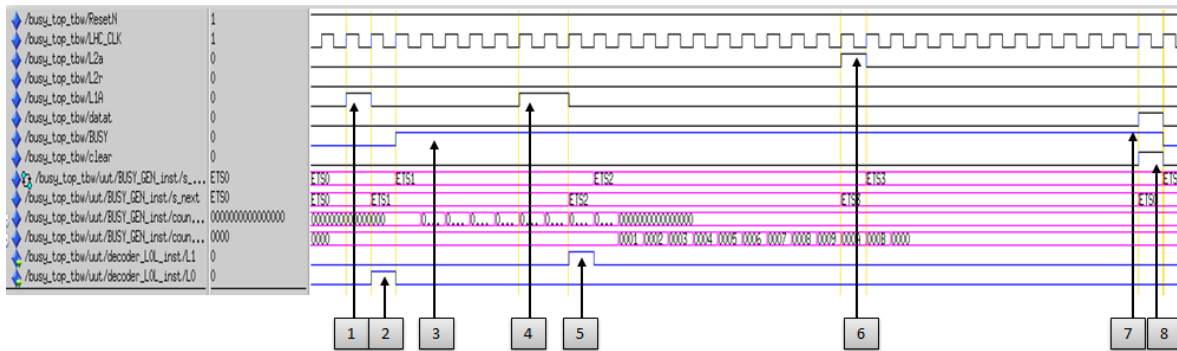


Figura 5.7: Proceso de decodificación de los disparos "L0 y L1" y manejo de la señal de "Busy" .

En la figura 5.8, se muestra el comportamiento de la señal de "busy" cuando en el proceso de lectura llega una señal de "L2r". El comportamiento se puede interpretar bajo el siguiente criterio:

- Llega la señal de disparo "L0".
- El firmware interpreta la señal y activa la señal correspondiente a "L0".
- Se activa la señal de "Busy" y espera por la señal "L1".
- Llega la señal de disparo "L1".
- El firmware interpreta la señal y activa la señal correspondiente a "L1" y espera por la señal "L2a" o "L2r", la señal de "busy" sigue activa".
- Llega la señal "L2r",
- El firmware interpreta la señal, desactiva la señal de "busy" y activa la señal de limpiar registros.

5.1.3 Simulación FEE_SIU_Interface

En la figura 5.9, se observa el diagrama a bloques del proceso de simulación que realizó el módulo "FFE_SIU_Interfarence", el proceso se sustenta en tres pruebas, la transmisión del comando donde la tarjeta SIU lee alguna palabra de la electrónica de ACORDE (FESTRD), el comando donde la tarjeta de SIU escrib una palabra de configuración a la tarjeta electrónica (FECTRL) y el comando donde se inicia el proceso de transmisión de información. (RDYRX).

En la figura 5.10, se muestra el proceso de envío de un comando de configuración, el cual se puede describir de la siguiente forma:

5. Simulación y resultados del proceso de adquisición de datos

5.1 Simulación

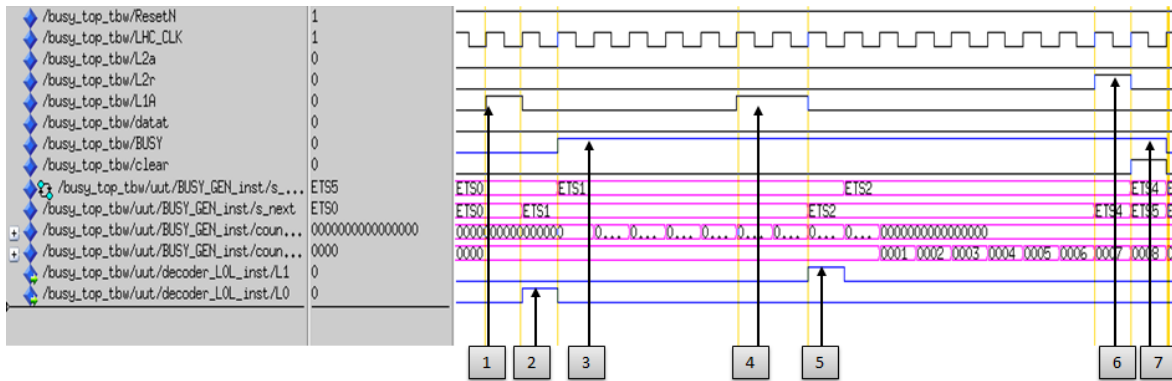


Figura 5.8: Proceso del manejo de la señal de "Busy" a la llegada de un disparo "L2r".

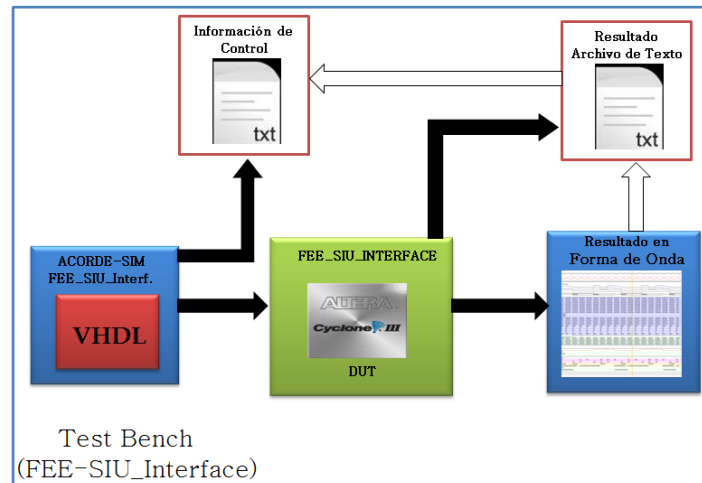


Figura 5.9: Diagrama a bloques del proceso de simulación del módulo (FEE_SIU_Interface).

1. La tarjeta SIU envía un comando de configuración a la FEE-ACORDE ("fbD=H"FED730C4"),
2. La firmware del detector ACORDE interpreta el comando y lo transmite al segundo FPGA, el cual se divide en dos partes, el identificador (Command_id=H"7E") y el valor de configuración (Command=H"D73").

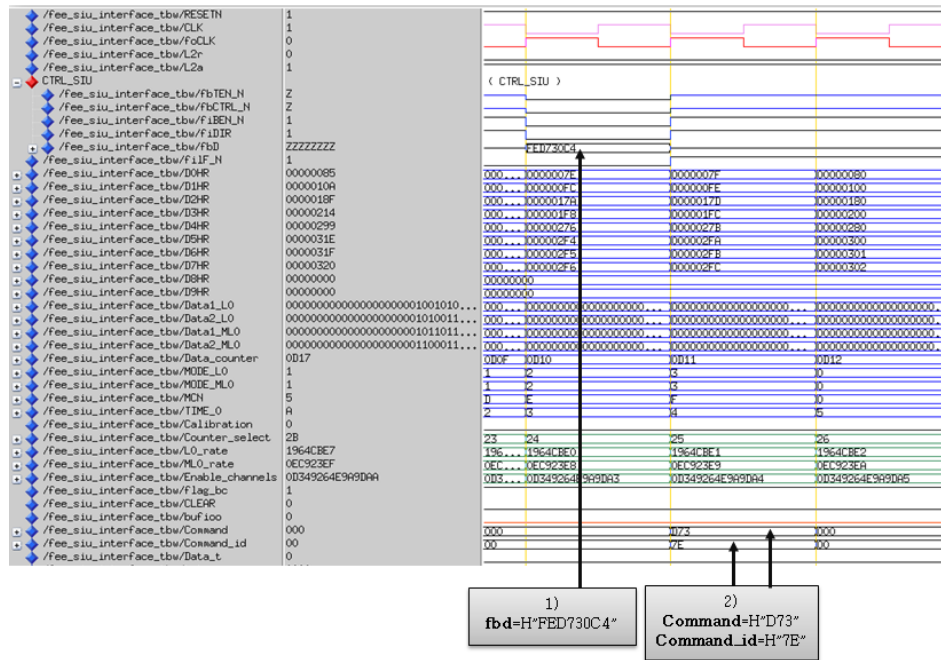


Figura 5.10: Transmisión (SIU-FEE) de un comando de configuración.

En la figura 5.11, se muestra el proceso de transmisión de los comandos de configuración y lectura del estado en que se encuentra la FEE-ACORDE, el proceso de se describe de la siguiente forma:

1. La tarjeta SIU escribe un comando "FCTRL" pidiendo la información acerca del estado en que se encuentra el detector ACORDE, en el caso que se muestra en la figura,, es acerca del valor de multicoincidencia "MCN".
2. El firmware de ACORDE interpreta el mensaje y posteriormente prepara la información que la SIU le solicito, en el caso de la figura 5.11, el valor de "MCN=H.A" se espera que se realicé la transición de las variables de control de la SIU para posteriormente transmitir el valor de la palabra de control
3. Se transmite el valor de la palabra de estado que la tarjeta SIU solicito e inmediatamente se liberan las señales de control de la transmisión.

5. Simulación y resultados del proceso de adquisición de datos

5.1 Simulación

6. La transmisión se cierra con la transmisión del comando "0000E064" el cual contiene el número de palabras totales de la transmisión.

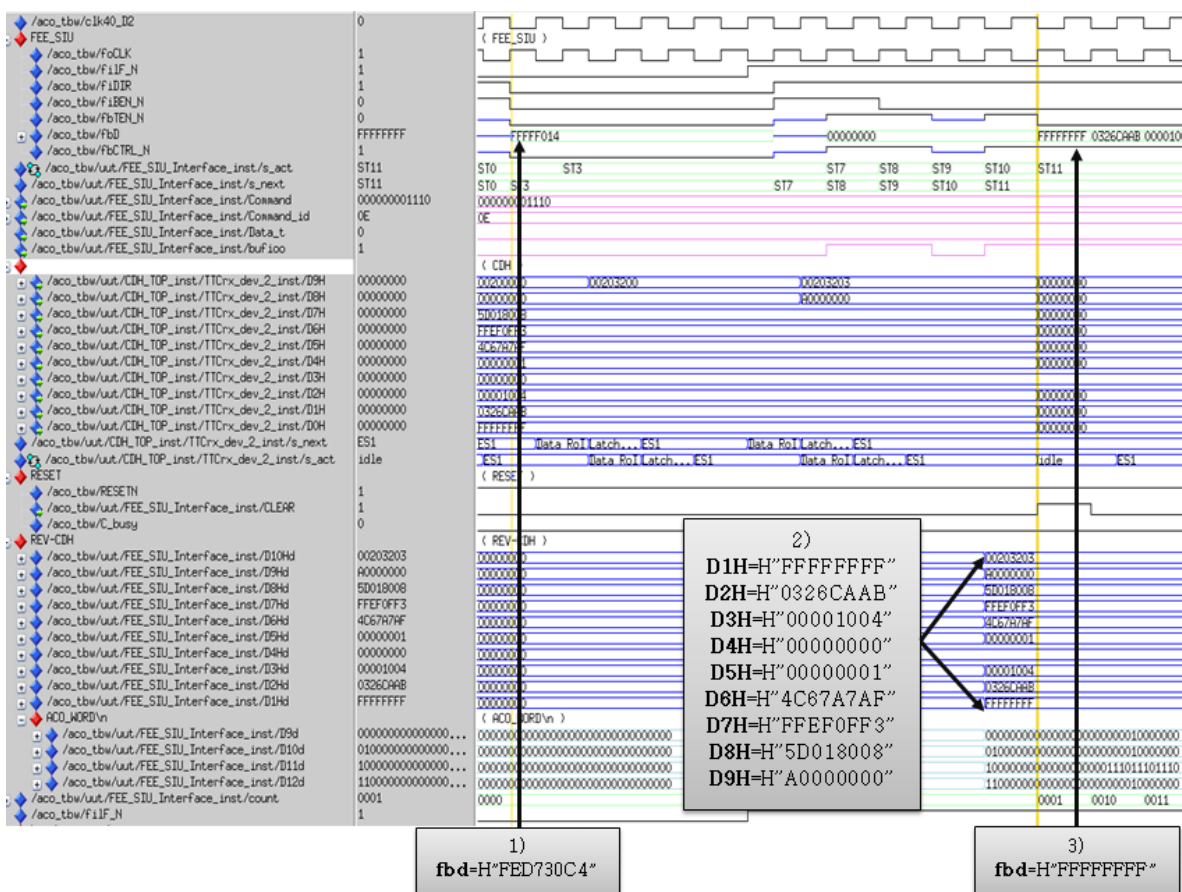


Figura 5.12: Inicio del proceso de transmisión de información.

5.1.4 Simulación Comunicación entre los dos FPGA

En la figuras 5.14, 5.15, 5.16, se muestra el proceso de simulación de la comunicación entre los dos FPGA que componen a la tarjeta principal del detector ACORDE, esta simulación se basa en 3 puntos:

- * Lectura del comando de configuración por el módulo "FEECMDS & Configuration" (Ver figura 4.6).
- * Interpretación del comando y preparación de los parámetros a transmitir.
- * Transmitir la información solicitada

5. Simulación y resultados del proceso de adquisición de datos

5.1 Simulación

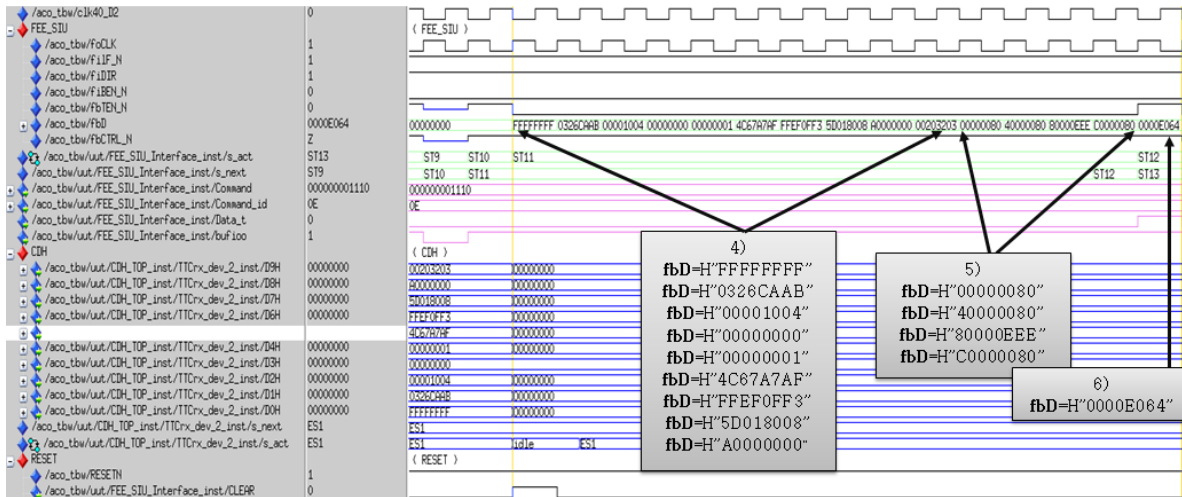


Figura 5.13: Fin del proceso de transmisión de información.

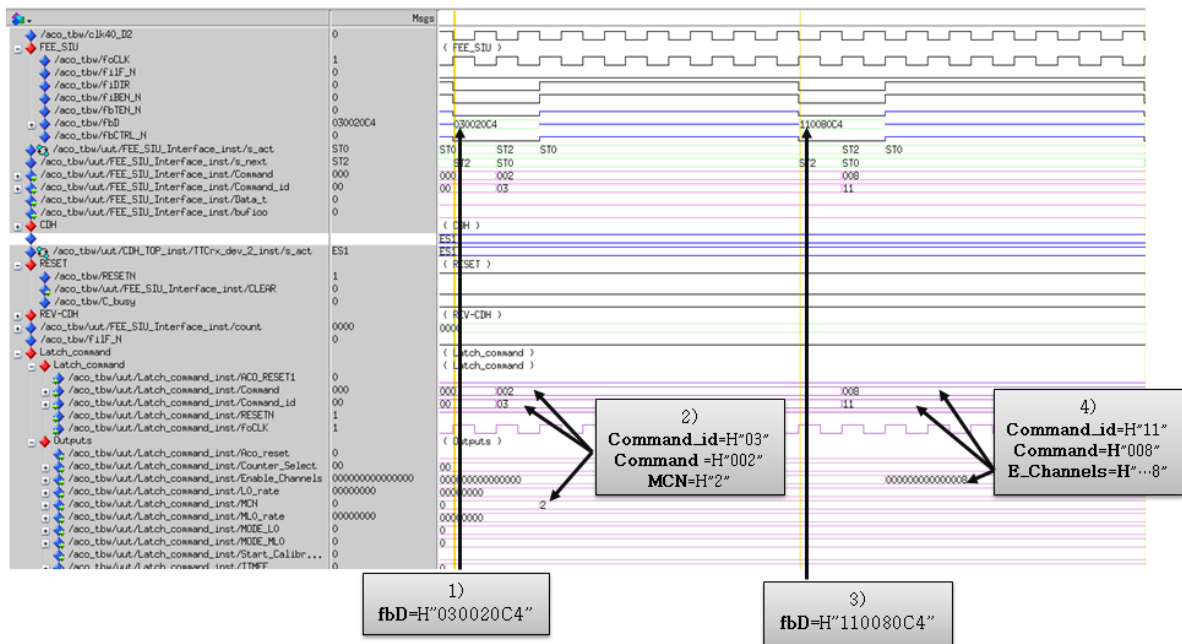


Figura 5.14: Inicio del proceso comunicación (FPGA1-FPGA2).

5. Simulación y resultados del proceso de adquisición de datos

5.1 Simulación

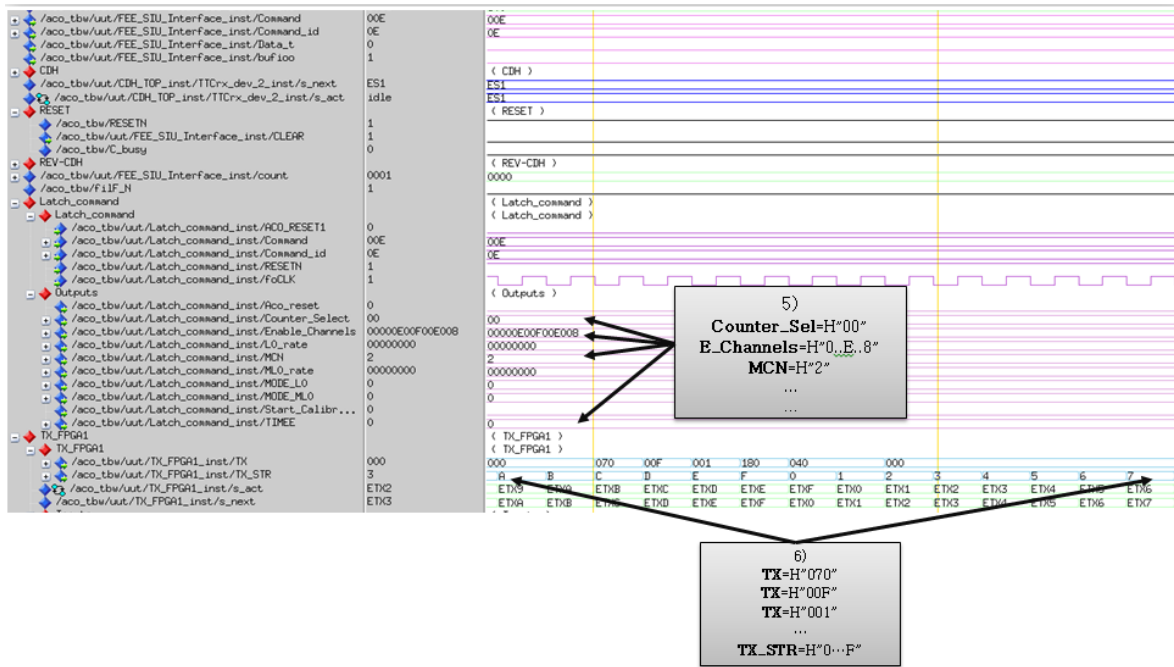


Figura 5.15: Fin del proceso de comunicación (FPGA1-FPGA2).

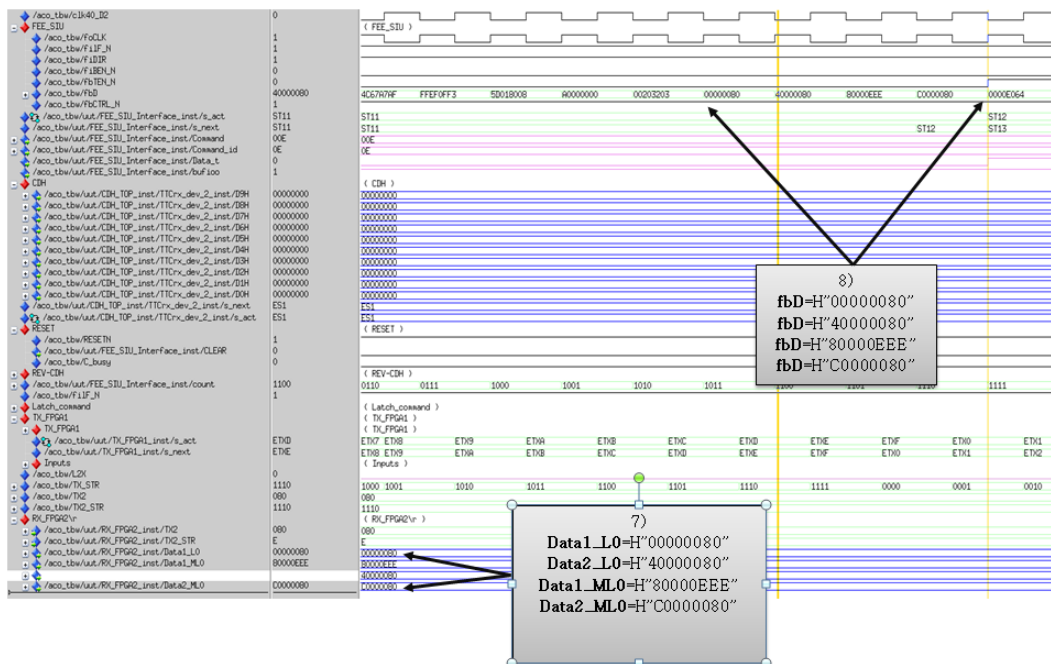


Figura 5.16: Proceso de comunicación (FPGA2-FPGA1).

El proceso de comunicación entre los dos FPGA de la tarjeta principal del detector ACORDE se puede interpretar de la siguiente forma:

1. El comando o palabra de configuración se escribe por el módulo "FEE.SIU_Interface"
2. El módulo "FEECMDS & Configuration" captura e interpreta el comando, lo divide en dos partes un identificador, y la información del comando.
3. Cada comando o palabra de estado tiene su dirección individual en los dos FPGA.
4. Se muestra el comando para configurar activar los canales habilitados del detector ACORDE.
5. Una vez que el módulo haya interpretado todos los comandos los almacena temporalmente.
6. La transmisión de todos los comandos de configuración se realiza de forma serial y cada uno incluye un identificador "TX_STR", diferente del que llega de la tarjeta SIU.
7. El proceso de transmisión de información en ambas direcciones (FPGA1-FPGA2) es de igual forma que se describió en los puntos anteriores.
8. Una vez que se haya recibido e interpretado la información del FPGA2, esta lista para poderla transmitir.

5.1.5 Simulación global del sistema

En la figura 5.17, se muestra el diagrama a bloques de la simulación general de todo el sistema del detector ACORDE. En el proceso de simulación global del firmware del detector ACORDE. Se realizó la integración de cada uno de los módulos que lo componen, para que operaran como un único sistema, verificando su funcionamiento. Durante dicho proceso se verificó la comunicación entre módulos, la recepción y decodificación de los diferentes mensajes de disparo, la recepción de comandos de configuración y palabras de estado desde la tarjeta SIU, teniendo como resultado un archivo de texto similar al que entrega el sistema de adquisición de datos de ALICE.

En la figura 5.18, se muestra parte del archivo de generados durante el proceso de simulación, el archivo cuenta con mas de 5000 eventos almacenados, todos con el encabezado común de datos versión 3, como lo indica la colaboración ALICE para participar en la run2 y las palabras de información específica del detector ACORDE que se esperaban.

5.2 Laboratorio CTP-ACORDE-DAQ

Después de obtener los resultados esperados en el proceso de simulación, se continuo con la implementación del firmware en la tarjeta principal de ACORDE para verificar su funcionamiento.

5. Simulación y resultados del proceso de adquisición de datos
 5.2 Laboratorio CTP-ACORDE-DAQ

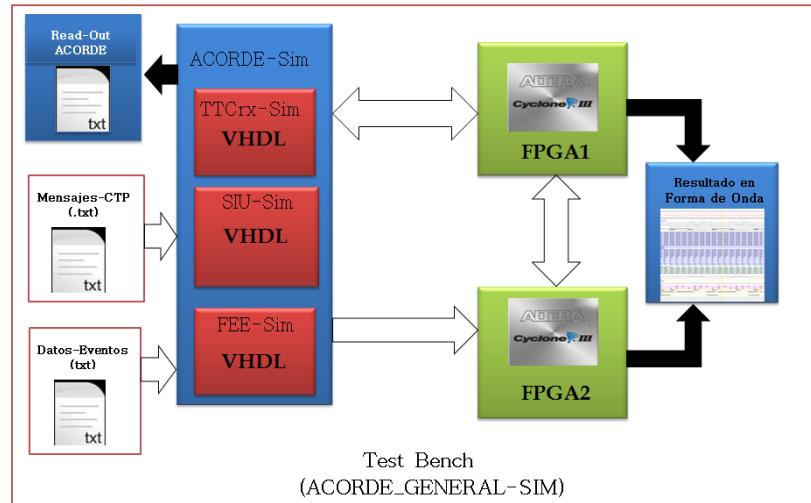


Figura 5.17: Biagrama a bloques del proceso global de simulación del sistema de ACORDE.

```

*****
ACORDE --> Read_Out
*****
FFFFFFFF
0326CAAA
00000003
00000000
00000001
3C66A79F
FFDF0EF3
5C018007
90000000
00103103
00000080
40000080
80000EEE
C0000080

At : 650 ns(26clocks).   Calibración de ACORDE
At : 650 ns(26clocks).   *****
At : 1800 ns(72clocks).  Finaliza la configuracion
At : 2508 ns(100clocks). Inicio de secuencia L2a
At : 2628 ns(105clocks). Llega un L1
At : 2676 ns(107clocks). En esta parte llegarian los EvCntLstr EvCntHStr
At : 3204 ns(128clocks). L1 Message header word1
At : 3252 ns(130clocks). L1 Message data word 2
At : 3324 ns(132clocks). L1 Message data word 3
At : 3444 ns(137clocks). L1 Message data word 4
At : 3492 ns(139clocks). L1 Message data word 5
At : 3828 ns(153clocks). L2 Message data word 1
At : 3924 ns(156clocks). L2 Message data word 2
At : 4020 ns(160clocks). L2 Message data word 3
At : 4116 ns(164clocks). L2 Message data word 4
At : 4212 ns(168clocks). L2 Message data word 5
At : 4308 ns(172clocks). L2 Message data word 6
At : 4404 ns(176clocks). L2 Message data word 7
At : 4500 ns(180clocks). L2 Message data word 8
At : 4596 ns(183clocks). L2 Message data word 9
At : 4692 ns(187clocks). L2 Message data word 10
At : 4788 ns(191clocks). L2 Message data word 11
At : 4884 ns(195clocks). L2 Message data word 12
At : 4980 ns(199clocks). L2 Message data word 13
At : 5316 ns(212clocks). header Rol
At : 5412 ns(216clocks). Rol data word 2
At : 5508 ns(220clocks). Rol data word 3
At : 5520 ns(220clocks). Inicio de la transmision de RDYRX
At : 5604 ns(224clocks). Rol data word 4
At : 5628 ns(225clocks). Fin de la secuencia L2a
At : 5640 ns(225clocks). Cambiamos la dirección de Transmisión
At : 5688 ns(227clocks). Iniciamos la transferencia de datos
At : 5688 ns(227clocks). Vemos que pasa
At : 6096 ns(243clocks). FIN SIU TO FEE
    
```

Figura 5.18: Resultados del proceso global de simulación del firmware de ACORDE.



Figura 5.19: **Electrónica principal de ACORDE.**

En la figura 5.19, se muestra la nueva tarjeta principal de ACORDE, la cual se compone de las siguientes partes:

1. FPGA (Cyclone III). Encargado de procesar la información proveniente de las 60 FEE asociadas a los módulos de centelleo que constituyen ACORDE.
2. Tarjeta TTCrq. Se emplea como interfaz entre el sistema central de disparo (CTP) y la tarjeta principal de ACORDE.
3. Tarjeta SIU. Se emplea como interfaz entre el sistema de adquisición de datos (DAQ) y la tarjeta principal de ACORDE.
4. FPGA (Cyclone III). Encargado en realizar la comunicación entre TTCrq - ACORDE-SIU.
5. Señales de disparo en formato LVDs.

El control del experimento ALICE se basa en varios sistemas independientes ("Sistemas Online"). Cada sistema controla cierto tipo de actividades todas conectadas entre si, pero tienen la propiedad que pueden operar de forma independiente durante el proceso de calibración o mantenimiento de cada uno de los detectores de ALICE.

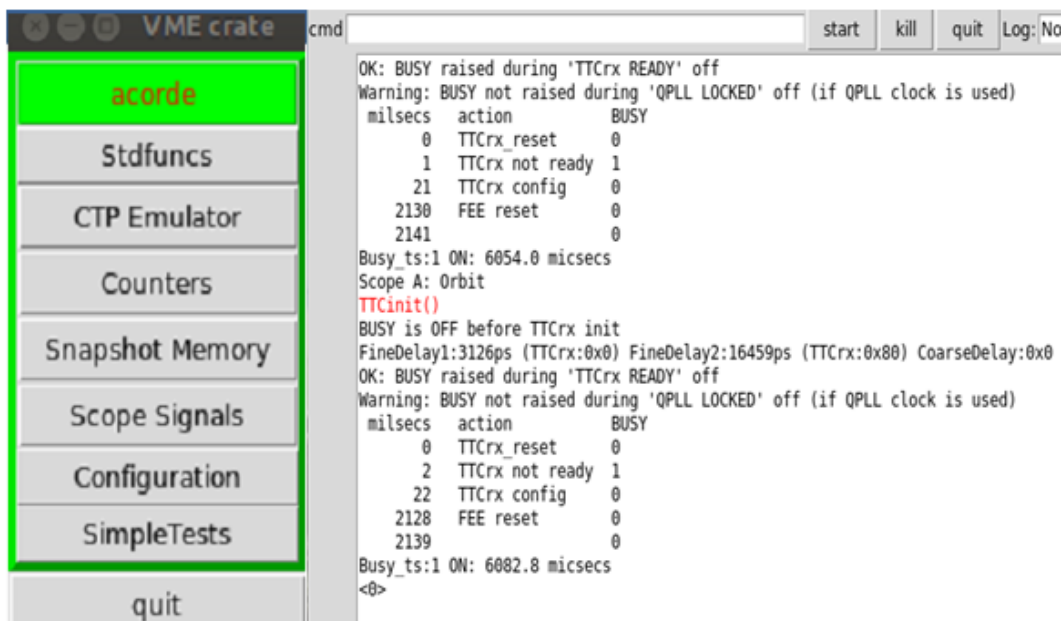
Los sistemas que componen el control de cada detector de ALICE son:

- Sistema de control del detector (DCS)
- Sistema de Adquisición de Datos (DAQ)
- Sistema de disparo (CTP)
- Nivel alto de disparo (HLT)

Debido a que ACORDE no emplea HLT, y el DCS esta en proceso de actualización para la Run2, el sistema de prueba consistió en LTU-ACORDE-DAQ. El cual es un proceso de configuración extenso, empleando el manejo de base de datos y el uso de dominios de red específicos para poder comunicar todos los elementos.

5.2.1 Unidad Local de Disparo

Unidad Local de Disparo (LTU), funciona como interfaz entre el detector y el sistema central de disparo de ALICE, y como emulador cuando el LTU se configura como "Standalone", donde se puede emular todos los mensajes del sistema central de disparo. Para correr el LTU fue necesario instalar el software específico, basado en la plataforma LINUX Redhat 7.3.



```
cmd start kill quit Log: No
OK: BUSY raised during 'TTCrx READY' off
Warning: BUSY not raised during 'QPLL LOCKED' off (if QPLL clock is used)
milsecs action BUSY
0 TTCrx_reset 0
1 TTCrx not ready 1
21 TTCrx config 0
2130 FEE reset 0
2141 0
Busy_ts:1 ON: 6054.0 micsecs
Scope A: Orbit
TTCinit()
BUSY is OFF before TTCrx init
FineDelay1:3126ps (TTCrx:0x0) FineDelay2:16459ps (TTCrx:0x80) CoarseDelay:0x0
OK: BUSY raised during 'TTCrx READY' off
Warning: BUSY not raised during 'QPLL LOCKED' off (if QPLL clock is used)
milsecs action BUSY
0 TTCrx_reset 0
2 TTCrx not ready 1
22 TTCrx config 0
2128 FEE reset 0
2139 0
Busy_ts:1 ON: 6082.8 micsecs
<0>
```

Figura 5.20: Configuración entre el LTU y ACORDE.

En la figura 5.20 se muestra que el LTU de ACORDE esta configurado correctamente, así mismo, se observa que ACORDE esta listo para la recepción de los diferentes tipos de mensajes de disparo. Por otra parte en la figura 5.21, se muestra el correcto funcionamiento de ACORDE en el reconocimiento de los diferente tipos de los mensajes mensajes de disparo y el manejo de la señal de espera "BUSY".

5.2.2 Sistema de Adquisición de datos

El sistema de adquisición se controla vía el Sistema de control del Experimento (ECS), el cual es el encargado de coordinar las operaciones de todos los detectores. Cada detector tiene asignado un Agente de Control del Detector (DCA) el cual controla el proceso de adquisición

Counter	Value	Counter	Value
sbusy	46892861	Interlock_count	0
l1nearly_full_ts	0	l1_only	131353
busy	46892860	l1nearly_full	0
l2r_strobe	0	l0	131353
l2nearly_full	0	time	624950370
l2nearly_full_ts	0	BUSYover	130595
Interlock_timer	0	start_all	136709
l2a_strobe	131353	l1_strobe	131353
in_busy1	46892860	any_error	0
in_busy2	624950370	busy_ts	130595
		prepulse	0

Figura 5.21: Monitoreo de las señales transmitidas entre CTP-ACORDE .

de datos, el núcleo del DCA es un software desarrollado especialmente para este propósito (DATE¹).

DATE es un software que realiza las actividades de adquisición de datos en un entorno distribuido multi-procesador. Ha sido diseñado con características de escalabilidad que lo hacen adecuado para grandes sistemas, con la participación de cientos de ordenadores. Sin embargo, DATE puede usarse en diferentes formas de configuración; en particular se adapta a los pequeños sistemas de laboratorio ,así, donde se utilizan pocas máquinas, o incluso sólo una; como es el caso del laboratorio que se implemento para las pruebas pertinentes del trabajo realizado en esta tesis.

En la figura 5.22 se muestra la estructura de la configuración de la base de datos para que DATE pueda operar correctamente, se observa que cada sistema tiene que ser bien definido con información relacionada con cada detector y con el rol que desempeña dentro del sistema de adquisición de datos.

En la figuras 5.23, 5.24, se muestra el DCA y DAQ del detector ACORDE, configurados para una toma real de datos físicos.

En la figura 5.25, se muestra el resultado de las pruebas en el laboratorio, se aprecia que durante esa prueba el sistema fue capaz de decodificar 281615 mensajes de disparo, almacenando 43932540 bytes de información .

¹Data Adquisition and Test Environment

5. Simulación y resultados del proceso de adquisición de datos
 5.2 Laboratorio CTP-ACORDE-DAQ

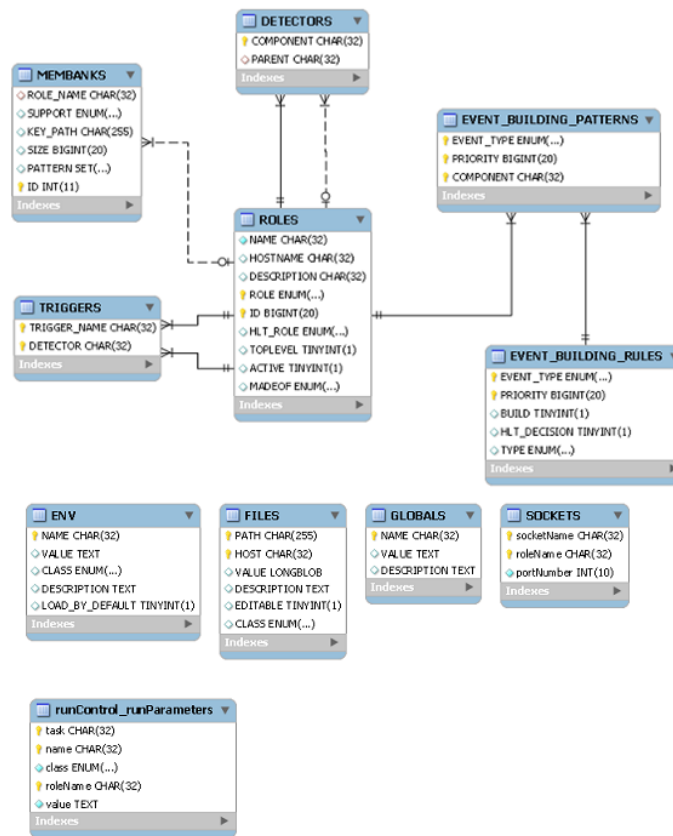


Figura 5.22: Configuración de las base de datos de DATE.



Figura 5.23: ACORDE - Agente de control del detector.

5. Simulación y resultados del proceso de adquisición de datos
 5.2 Laboratorio CTP-ACORDE-DAQ



Figura 5.24: ACORDE - Sistema de Adquisición de datos.

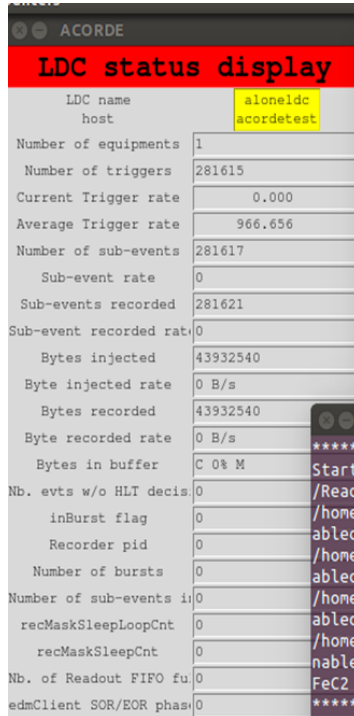


Figura 5.25: Visualización del flujo de información (CTP-ACORDE-DAQ).

5.3 Verificación del funcionamiento del detector ACORDE)

Una vez obteniendo un resultado satisfactorio en el laboratorio CTP-ACORDE-DAQ, se decidió colocar la tarjeta principal en el lugar que le corresponde dentro del experimento ALICE y realizar pruebas de integración con el sistema global del experimento, cuyos resultados se muestran a continuación.

Haciendo uso de los FE2CMDS implementados en el firmware de ACORDE se logro realizar el proceso de calibración de los 60 módulos que componen al detector ACORDE..

En la figura 5.26, se muestra el resultado del proceso de calibración, se observa que en promedio el rate de cada módulo que compone a ACORDE esta $\approx 2\text{ Hz}$, que es el valor esperado debido a las condiciones donde se encuentra ubicado.

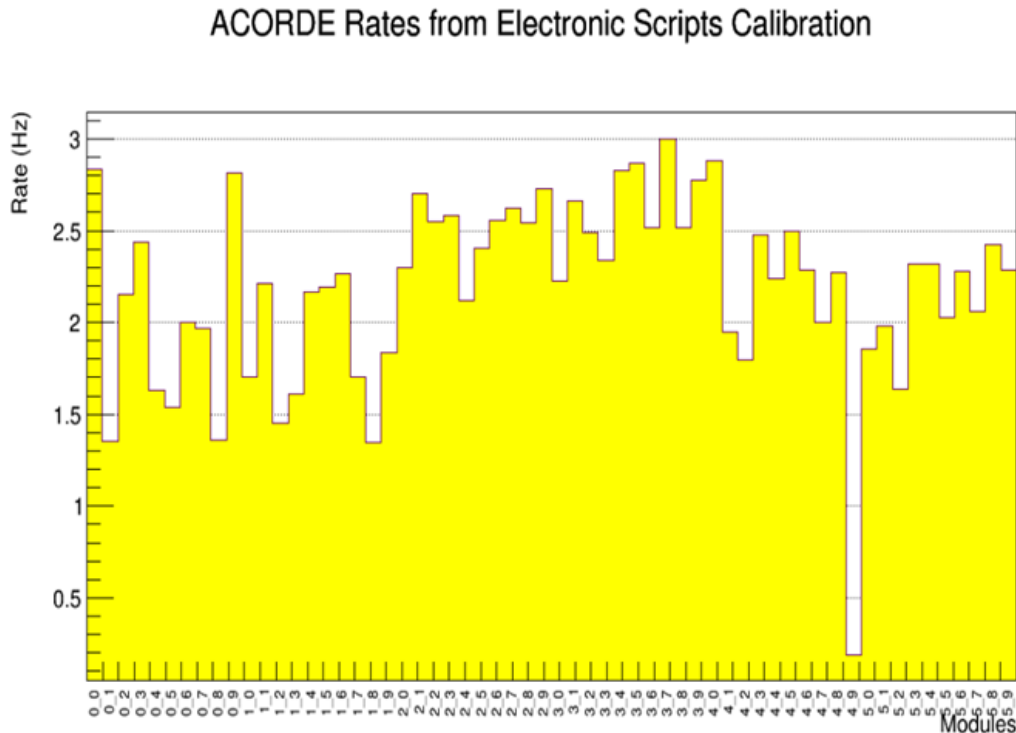


Figura 5.26: Resultado del proceso de calibración del detector ACORDE.

Se participo en la primeras "runs" de integración junto con otros detectores del experimento ALICE. Durante este ejercicio de integración se participo de la forma siguiente (Ver figura 5.27).

- Detector de Disparo
- Detector de Lectura

- Disparo & Lectura

Detectors participating in runs at 11:11:03																									
✓ Readout Detector		○ Trigger Detector		☑ Trigger & Readout Detector		Detectors																			
B E A M	R U N	C H L L U T S T E O R E	D U R A T I O N	E V E N T S	A	C	D	E	F	H	M	M	P	P	S	S	S	T	T	T	T	V	Z		
					C O R D E	P V	A Q	M C A L	M D	M P I D	M U O N S	M U O N S	P H O S	P M D	S D	S D	S D	S D	T O	T O F	T P C	T R I G G E R	T R I G G E R	O	D
Partition: PHYSICS_1 CTP Config: pp12_rare (v18)																									
Y 182624 B 44.3 m					76.5 k	✓		✓	✓	✓			✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
1					509 k	☑		☑	☑	☑			☑		☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑
2					17.2 k	✓		☑	☑	☑			✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3																						☑	✓	✓	✓

Figura 5.27: Participación en las primeras "Global runs".

5.3.1 Información resregistrada por ACORDE

Para realizar cualquier tipo de análisis de datos registrados por los diferentes detectores que participan en ALICE es fundamental el entendimiento crudo de los mismos; es decir; debemos entender no sólo la naturaleza física de ellos, sino también la manera en que la electrónica de cada detector los registra.

En el caso de ACORDE tenemos el siguiente algoritmo para la detección de sólo un muón (la detección de eventos de alta multiplicidad el funcionamiento es el mismo en cada módulo de ACORDE):

1. El muón impacta el cualquier módulo de ACORDE.
2. Cuando el muón cruza los dos plásticos centelladores se manda una señal por cada plástico impactado a la electrónica de ACORDE.
3. La electrónica hace la coincidencia de las dos señales para determinar si se trata de la misma partícula en ambos casos.
4. Si existe la coincidencia de ambas señales, comienza el sistema de comunicación con el sistema central de disparo y el sistema de adquisición de datos de ALICE.
5. La información del muón detectado por el módulo ACORDE es registrada por el DAQ de ALICE y almacenada en un directorio accesible mediante ALIEN-GRID.

5.3.2 Estructura de los datos en ACORDE

La información registrada por ACORDE de un evento de rayos cósmicos es almacenada en cuatro cadenas de 32 bits cada una (se utilizan dos bits por cadena para etiquetar el módulo de trabajo en que se encuentra la electrónica y el conjunto de módulos ACORDE que se esta considerando). Como se ha mencionado, cuando un módulo es impactado se asigna un 1 dentro de alguna de las cuatro cadenas de bits. La posición en la cadena depende el número de módulo impactado, es decir, se debe considerar a cada módulo ACORDE asociado con uno y sólo uno de los elementos del conjunto $\{x|x \in \mathbb{N} \wedge x \leq 60\}$. Las cadenas de datos son interpretadas de la siguiente forma:

- **Palabra 1:** almacena la información de los primeros 30 módulos de ACORDE impactados cuando la electrónica se encuentra en modo *single-muon*. Esta palabra está etiquetada con los bits **00**.

- **Palabra 2:** almacena la información de los segundos 30 módulos de ACORDE impactados cuando la electrónica se encuentra en modo *single-muon*. Esta palabra está etiquetada con los bits **01**.

- **Palabra 3:** almacena la información de los primeros 30 módulos de ACORDE impactados cuando la electrónica se encuentra en modo de multicoincidencia. Esta palabra está etiquetada con los bits **10**.

- **Palabra 4:** almacena la información de los segundos 30 módulos de ACORDE impactados cuando la electrónica se encuentra en modo de multicoincidencia. Esta palabra está etiquetada con los bits **11**.

Reconstrucción de eventos

El manejo de información proveniente de ACORDE es realizado con el entorno AliRoot.

En la figura 5.28, se muestra el comportamiento de ACORDE cuando opera como detector de lectura, en configuración de SL0 y a una frecuencia de operación de 40 MHz. Se muestran que hay un cierto número de eventos vacíos esto se debe a que cuando ACORDE opera de esta forma envía la información que el tiene cuando otro detector dispara, y en algunos casos que en el preciso instante que le solicitaron la información a ACORDE, no contenía información física en sus registros.

En la figura 5.29, se muestra la distribución de módulos impactados en una prueba, cuando ACORDE operaba en forma de "muon único" se muestra una mayor incidencia en los módulos centrales.

5. Simulación y resultados del proceso de adquisición de datos
 5.3 Verificación del funcionamiento del detector ACORDE)

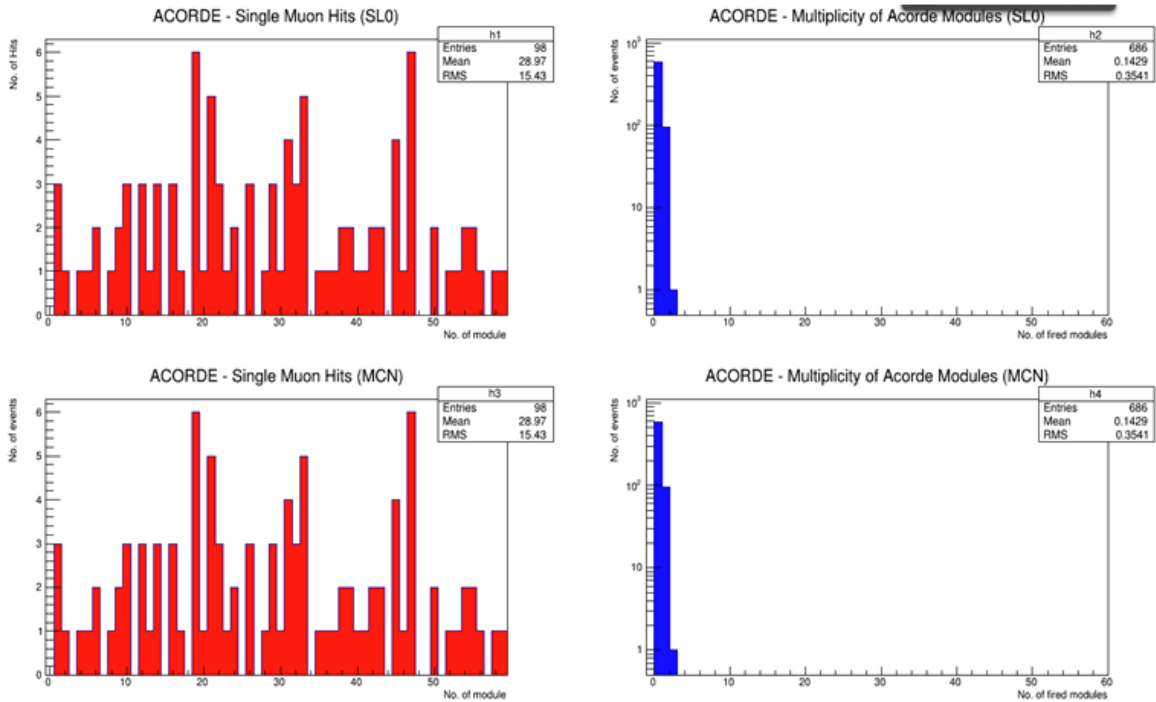


Figura 5.28: Resultado de la participación las primeras "Global runs".

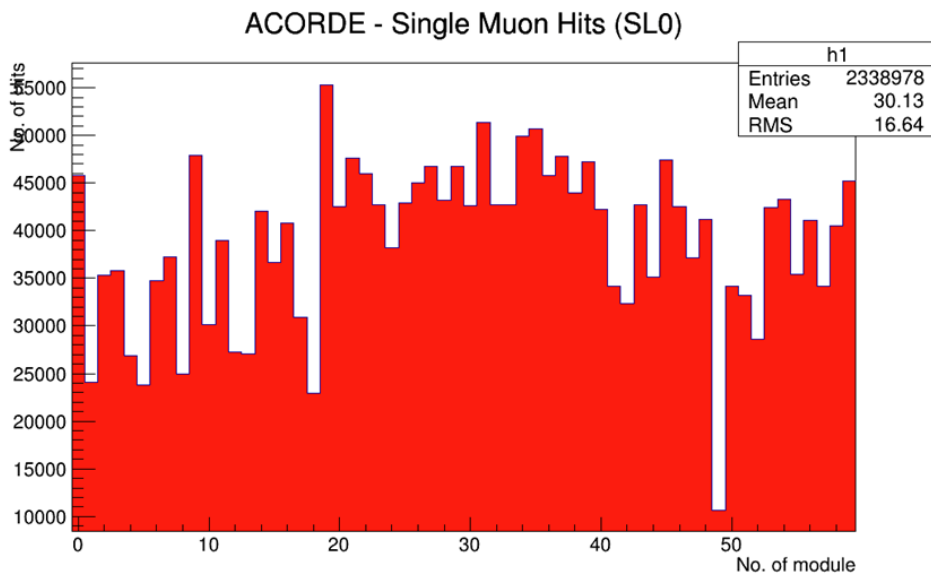


Figura 5.29: Distribución de módulos impactados registrados por ACORDE (SL0).

5. Simulación y resultados del proceso de adquisición de datos
5.3 Verificación del funcionamiento del detector ACORDE)

En la figura 5.31, se muestra la multiplicidad registrada por el detector ACORDE. En esta toma de datos se observa eventos de rayos cósmicos que llegan a ALICE con una multiplicidad mayor a 20.

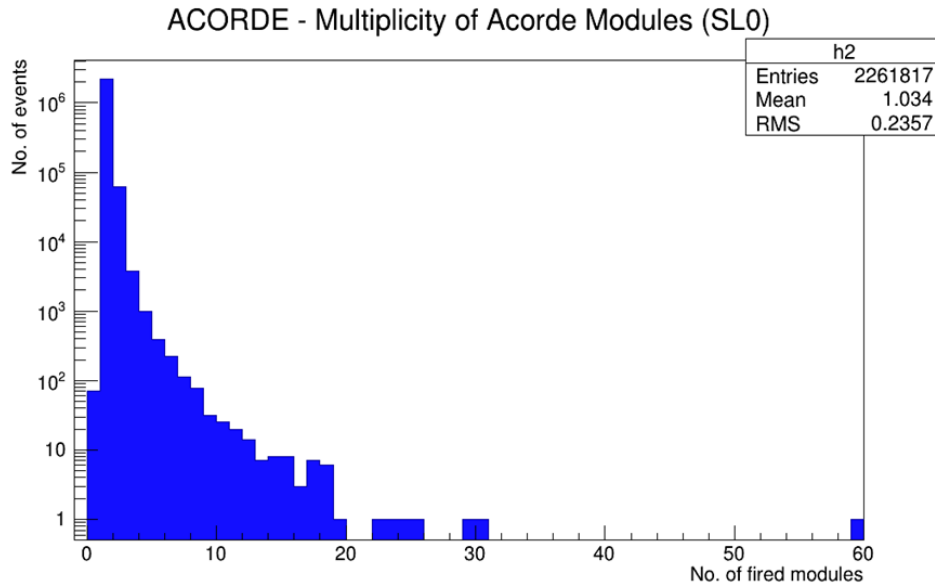


Figura 5.30: Distribución de la multiplicidad registrada por los módulos de ACORDE (SL0).

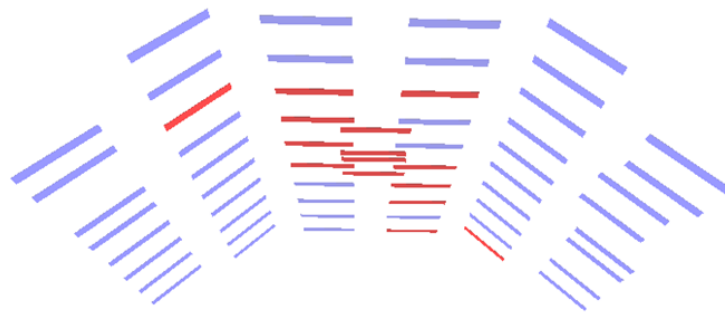


Figura 5.31: Visualización de un evento con multiplicidad igual a 15 en la sesión de toma de datos.

Con estos resultados se comprobó de manera experimental el correcto funcionamiento del sistema electrónico de ACORDE

En base a estos resultados se puede concluir que el sistema electrónico de ACORDE está completo y cumple con todos los requerimientos del experimento ALICE para participar en la "Run 2".

CAPÍTULO 6

Discusión de resultados y Conclusiones

Si bien el objetivo principal del experimento ALICE-LHC es el estudio del plasma de quarks y gluones. En el programa de física de ALICE, se incluye el análisis de rayos cósmicos. Como se ha mencionado en el capítulo 2, uno de los detectores principales que genera la señal de disparo para la detección de muones atmosféricos es ACORDE, que es en el que se sustenta el presente trabajo de tesis, el otro detector es TOF.

El objetivo de este trabajo de tesis fue la actualización del sistema electrónico del detector ACORDE, durante el desarrollo se analizó el funcionamiento de dos de los sistemas más importantes en cualquier experimento de física de partículas, como lo son el sistema de disparo y el sistema de adquisición de datos. Además se adquirió una valiosa experiencia en el diseño de sistemas digitales, y el uso de herramientas de software de alto nivel para comprobar su funcionamiento.

Finalmente es importante mencionar el valor educativo que la presente tesis tuvo para mí, puesto que el desarrollo de este trabajo ayudó a comprender, que si bien el objetivo de la física de partículas (experimental) en forma general es la medición de ciertas variables físicas que ayuden a comprender la composición de la materia del mundo que nos rodea, para lograr estas mediciones se necesitan de instrumentos en algunos casos extremadamente complejos, por lo que se requiere la incorporación de diferentes ramas de las ciencias exactas, como lo es: electrónica, computación, mecánica por mencionar algunas.

6.1 Conclusiones

A lo largo de este trabajo de tesis se realizó la actualización del sistema electrónico del detector ACORDE, lo cual implicó cumplir con diversas tareas, como primer punto, se analizó el funcionamiento del sistema electrónico del detector ACORDE, cuando opera como sistema de disparo en eventos de muones atmosféricos y en colisiones protón-protón, se analizó el funcionamiento del sistema electrónico del detector ACORDE, cuando opera como sistema

de adquisición de datos en eventos de muones atmosféricos y en colisiones protón-protón. Se realizó un estudio de las nuevas especificaciones que tiene que cumplir el detector ACORDE para participar en el periodo de toma de datos del LHC RUN-2.

En base a los análisis anteriores se realizó el diseño del nuevo firmware de ACORDE, optando por cambiar el lenguaje de programación que anteriormente se venía manejando en ACORDE a un lenguaje de programación más versátil (VHDL).

El diseño cumple con las nuevas formas de decodificación de los mensajes de disparo provenientes del sistema central de disparo y con el nuevo protocolo de transmisión de información del sistema de adquisición de datos del experimento ALICE. Además con el uso de este lenguaje de programación y haciendo uso de las características especiales del dispositivo FPGA se logró reducir el tamaño total que ocupa el diseño en un 45 %, en comparación con el sistema anterior, lo que nos ayuda a evitar problemas que se pudieran presentar en el FPGA, derivados de ruido electrónico y ruido térmico.

Antes de incorporar el diseño del sistema electrónico a ACORDE, empleando herramientas de software de alto nivel y los logros anteriormente mencionados, se implementó un sistema de simulación capaz de reproducir los mensajes de disparo con los tiempos y en el formato específico enviados por el CTP, así mismo, se implementó un sistema que opera de forma similar al sistema DAQ del experimento. Permitiéndonos realizar una simulación global de todo el sistema electrónico del detector ACORDE, como si estuviera operando en forma real en una toma de datos. Los resultados de esta simulación ayudaron a entender de mejor forma el funcionamiento del detector ACORDE.

Una vez obteniendo resultados satisfactorios en el proceso de simulación y previamente a la incorporación del detector ACORDE con los demás sistemas que componen ALICE. Se logró poner en funcionamiento un laboratorio de pruebas CTP-ALICE-DAQ, el cual nos dejó un gran conocimiento en el manejo de base de datos, configuración de redes de área local y en el manejo de software de adquisición de datos en un entorno distribuido multi-procesador.

Finalmente para concluir con el objetivo propuesto, se incorporó el nuevo sistema del detector ACORDE en el lugar que le corresponde en el experimento, se monitoreó su funcionamiento durante las primeras corridas de integración realizadas por el experimento ALICE, en el mes de septiembre del mismo, obteniendo resultados satisfactorios. En paralelo se realizó la calibración de cada uno de los 60 módulos que componen a ACORDE.

Antes de dar concluido el trabajo de tesis y en forma de comentario, quisiera remarcar que gracias al extenso trabajo que se realizó durante el desarrollo de esta tesis y durante mi estancia en CERN, tuve la oportunidad de colaborar en diversos grupos de trabajo realizando tareas como: construcción, instalación y primeras pruebas de beam del detector que será el encargado del estudio de la física difractiva en ALICE (AD0), aprendizaje del funcionamiento del firmware del detector V0, y una pequeña pero no por eso intrascendente participación en la

actualización del sistema central de disparo del experimento ALICE para la run-3. Dejándome un conocimiento invaluable en el área de la física experimental.

Por los resultados obtenidos anteriormente mencionados, se puede concluir que el objetivo principal que se estableció ha sido cumplido satisfactoriamente

Como comentario adicional, y con el fin de exponer la importancia de la parte técnica que tiene intrínseca la física experimental, quisiera expresar , que entender la digitalización, el procesamiento de adquisición almacenamiento y el análisis del formato (estructura) de los datos de cualquier experimento, es crucial. En el caso de experimentos de Altas Energías, el enorme contenido de información en un evento físico requiere de estrategias especializadas para poder extraer información útil de los datos almacenados en los sistemas de computo del experimento.

Conocer el proceso de digitalización de las señales analógicas de los detectores requiere de un análisis profundo de los procesos físicos involucrados en los sistemas de detección del experimento. Sabiendo que el experimento ALICE tiene 18 subsistemas de detección, el estudio y entendimiento del proceso de digitalización y adquisición de datos, es exhaustivo. Una vez que se ha conseguido conocer los detalles, es posible mejorar u optimizar estos procesos. Las implicaciones físicas de estas mejoras son inmediatas pues permite mejorar el análisis computacional de los datos colectados.

.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Mario Rodriguez Cahuantzi: Detección de muones atmosféricos en el experimento ALICE-LHC. Tesis Doctoral, 2012.
- [2] Bruno Alessandro, INFN Torino, and Mario Rodriguez, Autonomus University of Puebla, México: ALICE looks to the skies. CERN COURIER,2012.
- [3] CERN-LHC: Upgrade of the ALICE Experiment. ALICE-DOC, 2012.
- [4] ALICE DAQ project: ALICE DAQ and ECS Manual. ALICE Internal Note/DAQ, 2010.
- [5] ALICE-CERN: ALICE Common Data Header specifications. ALICE Internal Note/DAQ,2013.
- [6] M.Krivda, A. Jusko, O.Villalobos Baillie: The ALICE trigger electronics. 2010.
- [7] W.Carena, F.Costa, F.Carena:The ALICE experiment control system. 10th ICALEPCS, 2011.
- [8] Glenn F.Knoll, Radiation Detection and Measurement, John Wiley and Sons Inc, 2000
- [9] Adel S. Sedra, Kenneth C. Smith, Circuitos Microelectrónicos, Mc. Graw Hill, 2006.
- [10] M.E. Van Valkenburg, Analog Filter Design, Oxford University Press, 1982.
- [11] Seyed Naeem Ahmed, Physycs and Engineering of Radiation Detection, Elsevier, 2007.
- [12] Claude Leroy. Pier - Giorgio Rancoita, Principles of Radiation Interaction in matter and detection, World Scientific, 2009.
- [13] John.G. Proakis, Dimitris G. Manolakis, Tratamiento Digital de Señales, Pearson Prentice Hall, 2005.
- [14] Krzysztof Iniewski, Electronic for radiation detection, CRC Press Taylor and Francis Group, 2007.
- [15] Stefaan Tavernier, Experimental Techniques in Nuclear and particles physics, Springer, 2010.
- [16] C. de la Taille, Electronic in Particles physics, CERN summer school, 2008.

- [17] F.J. Ramírez Jiménez, Test procedure for charge sensitive preamplifiers with feedback resistor, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Technical report 2008
- [18] Helmuth Spieler, Electronics-Devices and Noise, Physics Division Lawrence Berkeley National Laboratory, 2009.
- [19] HAMAMATSU, Technical Information SD-37 Characteristics and use of charge Amplifiers, 2008.
- [20] Texas Instrument, Analysis of the Sallen-Key Architecture, 2002.
- [21] William R. Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics, Department of Physics, Switzerland.
- [22] Cristian Sisterna, How to customize the Model Sim wave view in the Altera Quartus simulation flow, C7 Technology, 2007.
- [23] Quartus II Simulation with VHDL Design, Altera Corporation©, 2005. .