

Università degli Studi di Napoli “Federico II”



Facoltà di Scienze MM.FF.NN
Corso di laurea in Fisica

Progettazione e sviluppo di un sistema d'acquisizione dati per il controllo e il monitoring dell'apparato sperimentale per il trigger dei muoni di CMS.

Candidato:

Relatori:

Giovanni Polese
matr. 60/788

Prof. Crisostomo Sciacca

Dott. Pierluigi Paolucci

Anno Accademico 2004/05

Indice

Introduzione	1
1 LHC e CMS	5
1.1 Caratteristiche dell'acceleratore LHC	5
1.2 Fisica a LHC	9
1.2.1 Il Modello Standard	9
1.2.2 Il bosone di Higgs	11
1.2.3 La fisica Elettrodebole	13
1.2.4 SUSY	15
1.2.5 Fisica del quark Top	15
1.2.6 Fisica dei B	16
1.3 Il rivelatore CMS	16
1.3.1 Il sistema di tracciamento	20
1.3.2 I Calorimetri	22
1.3.3 Il sistema muonico	25
1.4 Trigger e sistema DAQ	26
2 Il Trigger per muoni	29
2.1 Il sistema Muonico	29
2.1.1 Drift Tube	30
2.1.2 Cathode Strip Chambers	31
2.2 I Rivelatori a piatti piani resistivi	33
2.2.1 Geometria del sistema muonico ad RPC	34
2.2.2 Principi di funzionamento	36
2.2.3 Caratteristiche strutturali degli RPC di CMS	43

2.3	Il trigger di primo livello dei muoni	55
2.3.1	Struttura del L1 Trigger	57
3	Sistema on-line di controllo e di monitoraggio di CMS	59
3.1	DAQ: il Sistema di Acquisizione Dati	61
3.2	Run Control	64
3.3	DCS: Detector Control System	68
3.3.1	Requisiti del DCS	69
3.3.2	Architettura del DCS	71
3.3.3	Il sistema hardware dei DCS	72
3.3.4	Il sistema software del DCS: le soluzioni SCADA . . .	76
3.3.5	Sistemi Comuni	78
3.3.6	Servizi esterni	79
4	Il sistema hardware per i DCS degli RPC	81
4.1	Il sistema del DCS per l'elettronica di frontend	82
4.2	Il sistema del DCS per le alimentazioni degli RPC	85
4.3	Il sistema del DCS per la temperatura degli RPC	96
4.4	Il sistema del DCS del gas per gli RPC	97
4.5	Protocolli di comunicazione	100
4.5.1	OPC	100
4.5.2	I ² C BUS	102
5	Progettazione e realizzazione del software per i DCS degli RPC	107
5.1	Il software utilizzato	108
5.1.1	PVSS II	108
5.1.2	Architettura del software di PVSS II	109
5.1.3	Il Framework del JCOP	112
5.2	Realizzazione del sistema	114
5.2.1	Architettura del sistema del DCS degli RPC	114
5.2.2	Macchina a stati finiti	118
5.2.3	Il sistema degli allarmi	123
5.2.4	L'interfaccia grafica	126

Introduzione	III
<hr/>	
5.3 Database	134
5.3.1 Configuration Database	136
5.3.2 Condition Database	137
5.4 Integrazione con Run Control	138
5.5 Test e Prestazioni	142
Conclusioni	149
A Gli Script	151
Bibliografia	160

Introduzione

La sempre più grande complessità degli apparati sperimentali usati nel campo della fisica delle particelle elementari ha portato alla necessità di sviluppare dei sistemi online di controllo, chiamati “Detector Control System” (DCS), che fossero in grado di gestire, controllare e monitorare il funzionamento di tutti i componenti hardware e software, utilizzati dalla macchina acceleratrice, dai vari rivelatori e da tutti i loro sottosistemi.

L’aumento della complessità degli esperimenti è andato di pari passo con l’aumento della complessità dei rivelatori e della loro elettronica e con il grado di sofisticazione di tutti quei “sottosistemi” necessari al funzionamento dell’apparato sperimentale dal sistema d’acquisizione dati e di trigger fino al sistema di potenza, del gas e del cooling. Il “detector control system” ha quindi assunto sempre di più un ruolo chiave nella gestione di un esperimento e le sue funzionalità si sono estese dall’essere un semplice sistema di controllo e di monitoraggio dell’apparato sperimentale all’essere un sistema altamente automatizzato e sofisticato che si occupasse anche della gestione della maggior parte delle operazioni necessarie alla presa dati. Dagli esperimenti LEP a quelli di LHC e quindi negli ultimi 15 anni, i sistemi di DCS si sono evoluti molto velocemente, nel tentativo di inseguire il progredire degli apparati e della loro elettronica, fino ad avere tutte le caratteristiche di un vero e proprio sistema online di acquisizione dati da milioni di canali anche se logicamente con richieste inferiori in termini di prestazioni e di mole di dati da gestire ed archiviare. In questo periodo di rapida evoluzione dei DCS vanno sicuramente menzionati alcuni cambiamenti fondamentali che hanno completamente modificato la loro fisionomia; come il passaggio da sistemi

d'acquisizione basati sul bus CAMAC e sulla schede ISA a quelli basati sul bus VME e sulle schede PCI, come la scelta di abbandonare quasi del tutto la trasmissione dati su linee seriali del tipo RS232 per passare a linee seriali veloci (USB) ed all'uso di protocolli seriali commerciali ed altamente affidabili come il CANbus ed il ProfiBus, come la necessità di progettare sistemi SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) capaci di gestire milioni di canali e come la necessità di usare sistemi di archiviazione dati (database) che fossero in grado di gestire un flusso di dati sempre crescente fino alle centinaia di MB all'ora previste per gli esperimenti LHC. L'evoluzione dei sistemi SCADA è avvenuta ancora più rapidamente del previsto a causa dell'enorme sviluppo di tutto il mondo del software relativo al mondo WEB che, fino ad una quindicina di anni fa era quasi del tutto inesistente. Basti pensare che nell'esperimento BaBar, iniziato intorno al 1995, il sistema dei DCS fu progettato sulla base di un software SCADA, chiamato EPICS, e sviluppato a Berkeley per il mondo della fisica delle particelle elementari, mentre oggi i DCS di CMS si basano su di un software commerciale PVSS II (Process Visualization and Control System) e su di una serie di pacchetti software ampiamente usati in campi completamente diversi.

All'interno di tale scenario è stato inquadrato il presente lavoro di tesi, basato sulla progettazione e realizzazione del sistema di controllo e di monitoring per lo spettrometro muonico ad RPC del barrel di CMS (Compact Muon Solenoid), uno dei quattro grandi esperimenti presenti al Large Hadron Collider (LHC).

Il lavoro di tesi verrà sviluppato nel seguente modo.

Nel capitolo 1 vengono esaminate le principali caratteristiche di LHC e descritti brevemente i possibili scenari di fisica che un acceleratore di questo tipo consente di analizzare. Sono inoltre descritte le principali caratteristiche di CMS e dei componenti che lo costituiscono.

Il sistema muonico è invece descritto all'interno del capitolo 2, in cui vengono analizzati i singoli sottorivelatori, con particolare attenzione ai rivelatori ad RPC. Per quest'ultimi infatti sono descritti i principi fisici di funzionamento e le scelte costruttive, motivandole in relazione alle finalità richieste per il sistema di trigger per i muoni.

All'interno del terzo capitolo sono descritte le caratteristiche e funzionalità del sistema di DAQ e dei relativi componenti. Particolare attenzione è data ai sistemi di controllo della presa dati (Run Control) e del DCS, dei loro compiti e del modo in cui questi cooperano tra di loro per il controllo e il monitoraggio sia dell'apparato sperimentale che del DAQ.

In relazione alle richieste sviluppate per il sistema di DCS generale, il quarto capitolo descrive le soluzioni scelte per il sistema dello spettrometro muonico ad RPC dalla sezione dell'INFN di Napoli, all'interno della quale ho sviluppato il lavoro di tesi. Vengono analizzati i principali sistemi di controllo dell'intera struttura, le loro caratteristiche e le scelte progettuali sviluppate per far fronte alle caratteristiche ambientali ostili in cui operano.

Il capitolo 5 infine descrive il sistema di supervisione realizzato dal sottoscritto nell'ambito di questo lavoro di tesi sfruttando le potenzialità offerte dall'ambiente software scelto. Sono descritte le principali funzionalità e prestazioni che consentono di realizzare un sistema completo, efficiente e attendibile per il controllo e monitoraggio dell'intero apparato sperimentale e facilmente integrabile all'interno del sistema di controllo globale di CMS.

Le principali caratteristiche e funzionalità del sistema di supervisione sono state testate e presentate dal sottoscritto ai membri del DCS working group di CMS ed approvate dal coordinatore generale del DCS di CMS per l'integrazione nel sistema globale del DCS.

Capitolo 1

LHC e CMS

1.1 Caratteristiche dell'acceleratore LHC

LHC, *Large Hadron Collider*,[1] in costruzione presso il CERN di Ginevra e operativo dal 2007, rappresenta il più ambizioso progetto di ricerca nel campo della fisica delle alte energie attuale che consentirà di apportare un enorme progresso nella conoscenza dei costituenti base della materia. L'acceleratore LHC, posto all'interno del tunnel di 27 km utilizzato dal LEP a circa 100 metri di profondità, è un collisore adronico protone-protone in grado di raggiungere nel centro di massa un'energia di $\sqrt{s} = 7 + 7 TeV$.

Essendo un collisore protone-protone, LHC necessita di due anelli di cavità a radiofrequenza per accelerare le particelle in verso opposto, comportando un evidente aumento dei costi di costruzione dell'apparato; tuttavia la scelta sulla composizione del fascio è giustificata sia dalla bassa efficienza nella produzione di pacchetti densi di antiprotoni (sono necessari circa $3 \cdot 10^5$ protone per produrre un antiprotone) sia dalla minore luminosità¹ raggiungibile con fasci $p\bar{p}$ ($\mathcal{L}_{p\bar{p}}/\mathcal{L}_{pp} \sim 10^{-3 \div -4}$). Per confinare il fascio di protoni all'interno della beam-pipe sono stati sviluppati magneti dipolari superconduttori in grado di generare un campo di circa 8.39 Tesla (fig.1.2).

¹La luminosità è il parametro che definisce il numero di eventi per unità di tempo in relazione alla sezione d'urto del fenomeno:

$$R = \sigma \mathcal{L} \tag{1.1}$$

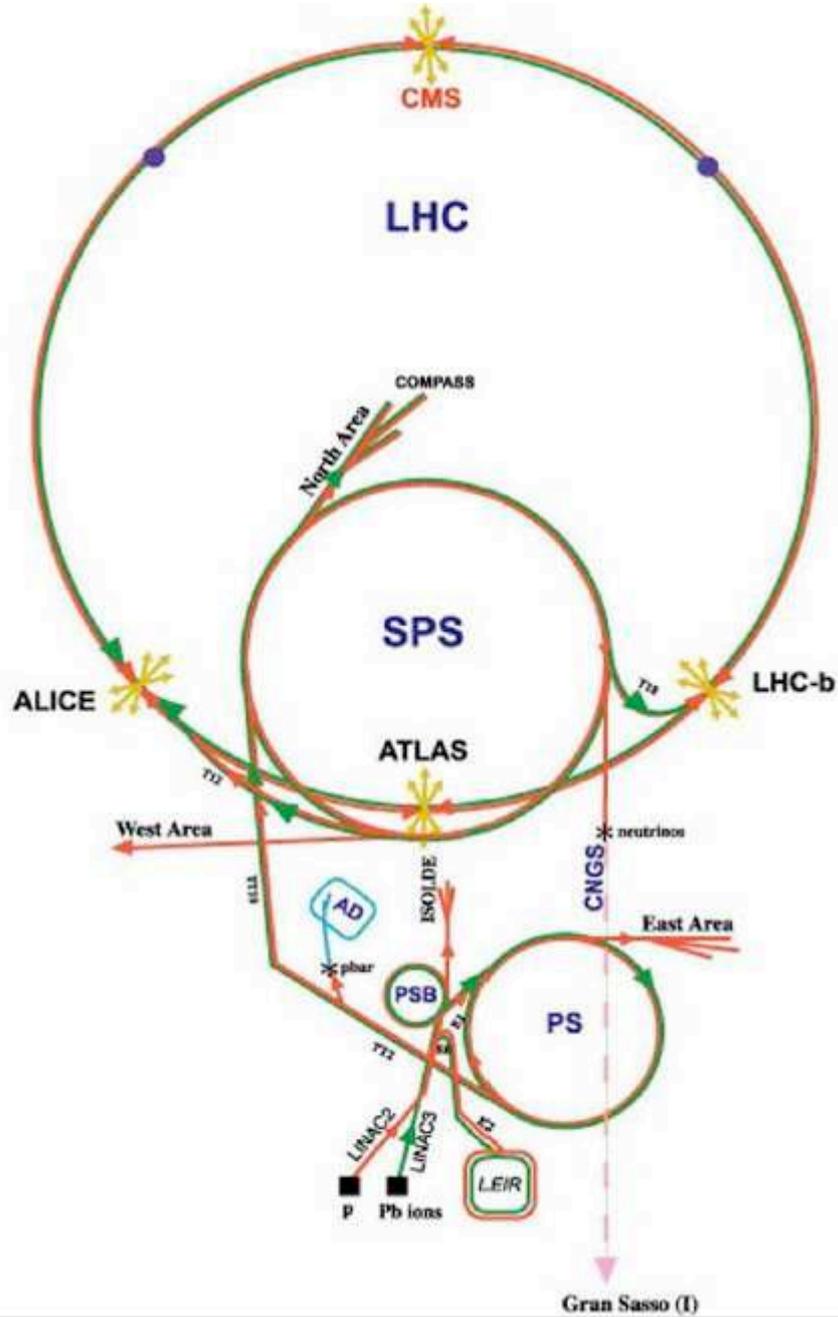


Figura 1.1: Schema di LHC e degli iniettori

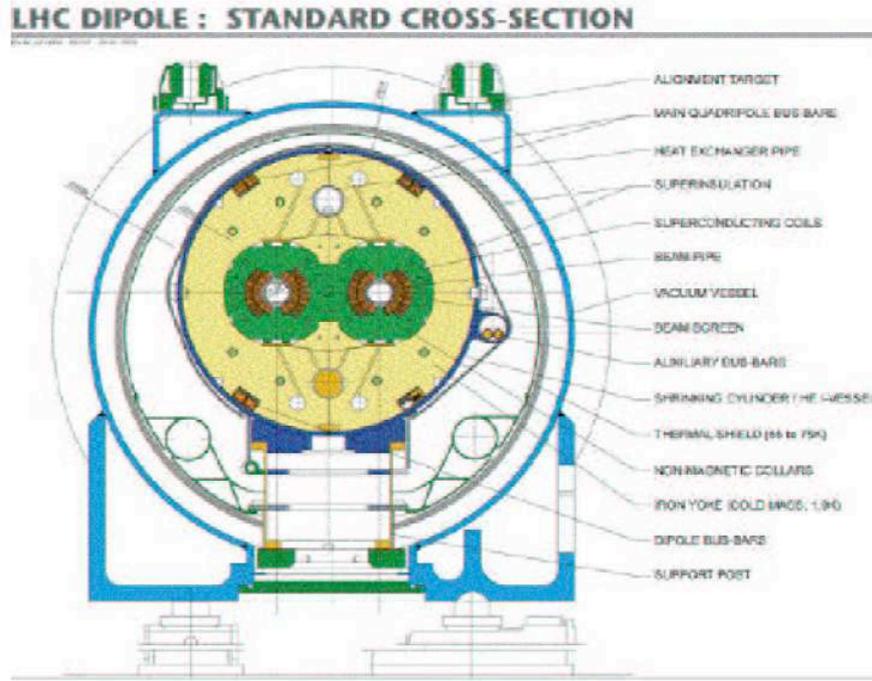


Figura 1.2: Sezione trasversa del magnete dipolare di LHC

Il sistema di iniezione dei protoni all'interno dell'anello è composto da diversi stadi in cascata di diversi acceleratori (LINAC-BOOSTER-PS-SPS), in grado di accelerare i pacchetti iniettati fino a 450 GeV. Il fascio finale generato, caratterizzato da una luminosità nominale massima pari a $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, avrà una frequenza di 40 MHz (25 ns di periodo) e sarà formato da un treno di 3564 pacchetti (tab. 1.1); di questi soltanto 2835 conterranno protoni ($f = 0.8$), consentendo durante i restanti intervalli temporali la sincronizzazione dei sistemi elettronici con il fascio.

Il valore del campo magnetico generato dai magneti fissa il massimo valore dell'energia del fascio a 7 GeV; di conseguenza per incrementare il rate di eventi interessanti è necessario operare sulle caratteristiche del fascio da cui dipende la luminosità secondo la relazione:

$$\mathcal{L} = \frac{1}{4\pi} \frac{N^2 k_b f \gamma}{t \beta^* A_T} F \quad (1.2)$$

Circonferenza	26.659
Massima luminosità	$\sim 10^{34} cm^{-2} s^{-1}$
Campo i dipolo alla max energia	8.39 T
Tempo di accelerazione	20 min.
Energia del fascio all'iniezione	450 GeV
Energia del fascio alla collisione	7 Tev
Numero di pacchetti	2835
Protoni per pacchetto (a \mathcal{L}_{MAX})	10^{11}
Distanza tra i pacchetti	7.48 m \leftrightarrow 24.95 ns
Frequenza di BX	40.08 MHz
Dimensioni Trasverse del fascio	15.9 x 15.9 μm^2
Lunghezza del pacchetto	7.5 cm
Vita media del fascio	~ 22 h

Tabella 1.1: Principali parametri funzionali di LHC

dove N è il numero di protoni in ogni pacchetto, β^* è il valore della funzione di betatrone, γ è il fattore relativistico, t è il periodo di rivoluzione (25 ns), k_b è il numero di bunches, A_T è la dimensione trasversale del fascio ed f è la frazione di pacchetti contenente protoni. A tale luminosità e con una sezione d'urto protone-protone $\sigma_{p\bar{p}}$ attesa $\simeq 100$ mb, ad ogni BX ci saranno circa 20 eventi (eq.1.1) per collisione che produrranno un gran numero di particelle all'interno del rivelatore; tutto ciò comporta scelte molto stringenti nella progettazione dei rivelatore sia per evitare effetti di accumulo tra fenomeni legati a BX differenti (*pile-up*) sia per l'alta radiazione sviluppata nociva per i rivelatori e per l'elettronica. L'interazione tra i due fasci lungo la circonferenza avviene in quattro punti attorno ai quali si troveranno i rivelatori di LHC (ATLAS, CMS, ALICE e LHCb). I rivelatori ATLAS[3] e CMS[2], sono rivelatori multifunzionali, progettati per studiare principalmente, seppur con scelte progettuali differenti, la fisica delle interazioni protone-protone. Alice [4] sarà un rivelatore dedicato allo studio delle collisioni tra ioni pesanti, mentre LHCb [5] sarà ottimizzato per lo studio della violazione di CP nel settore dei mesoni B.

1.2 Fisica a LHC

Le caratteristiche costruttive di LHC consentono di studiare scenari inesplorati della fisica delle particelle elementari: all'energia di collisione di $\sqrt{s} = 14$ TeV è infatti possibile ottenere interazione fra i costituenti fondamentali dei protoni, quark e gluoni, con energie di qualche TeV e con una sezione d'urto totale stimata pari a $\sigma_{tot} = (110 \pm 20)mb$ (fig.1.3). Considerando che di tale sezione d'urto le interazioni puramente elastiche (26%) non portano alla produzione di alcuna particella, i restanti 70 mb alla luminosità massima di LHC daranno vita a circa $7 \cdot 10^8$ eventi al secondo. Le caratteristiche degli eventi prodotti nell'interazione tra protoni incidenti dipendono dal modo in cui interagiscono tra di loro e dall'energia che riescono a scambiarsi. Nel caso di interazione a grande distanza le particelle nello stato finale possiederanno un grande momento longitudinale e un piccolo momento trasverso ($p_t \sim 500$ MeV), confinando le particelle nel beam pipe rendendole non rilevabili (interazioni di *minimum bias*). Qualora invece l'interazione avvenisse a breve distanza, le particelle risultanti possiederanno un grande momento trasverso e un ampio angolo di diffusione consentendo l'interazione col volume attivo del rivelatore. L'ampio spettro di energie raggiungibili e l'alta sezione d'urto degli eventi fanno di LHC un strumento potente in grado di dare risposta non solo alla domanda sull'origine del meccanismo di rottura spontanea della simmetria nel settore elettrodebole del Modello Standard, ma anche di investigare numerosi capi della fisica delle alte energie: ricerca di particelle supersimmetriche, violazione di CP, misure di precisione sul Modello Standard e studio della fisica oltre il Modello Standard.

1.2.1 Il Modello Standard

Il Modello Standard (SM)[6][7][8] è una teoria di campo relativistica e quantistica in grado di descrivere il comportamento di tre delle quattro interazioni fondamentali (elettromagnetica, debole e forte) tra le particelle costituenti la materia: quark e leptoni. Tale teoria è una teoria di Gauge delle interazioni elettrodeboli e forti basata sul gruppo $SU(3)_C \otimes SU(2)_T \otimes U(1)_Y$, prodotto diretto della simmetria di colore (C), di isospin debole (T) e di Ipercarica

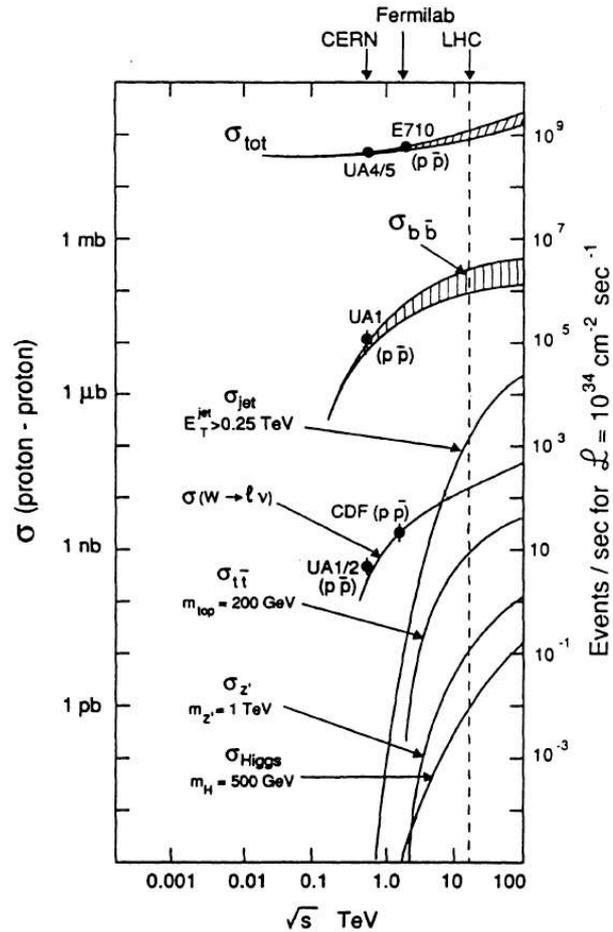


Figura 1.3: Sezione d'urto inelastiche per collisioni p-p in funzione dell'energia dei protoni nel centro di massa

(Y), che comprende i 12 fermioni fondamentali (6 quarks e 6 leptoni, divisi in tre famiglie) e 12 bosoni vettoriali, responsabili delle interazioni: γ , W^+/W^- e 8 gluoni. A questi componenti la teoria affianca il bosone scalare di Higgs H , ritenuto responsabile della rottura spontanea della simmetria di Gauge, fondamentale per spiegare la massa dei bosoni intermedi Z^0 , W^+/W^- e dei fermioni in accordo con i dati sperimentali. La mancata osservazione sperimentale di tale particella è l'unico elemento mancante nella verifica sperimentale dello SM, le cui previsioni sono state verificate con grande accuratezza dagli esperimenti condotti negli ultimi anni [10].

1.2.2 Il bosone di Higgs

Uno degli scopi principali di LHC è la ricerca del bosone di Higgs [9] di cui la teoria non prevede quale sia la massa ma considerazioni teoriche indicano un limite superiore di circa 600-800 GeV, intervallo ampiamente coperto dalle caratteristiche di LHC.

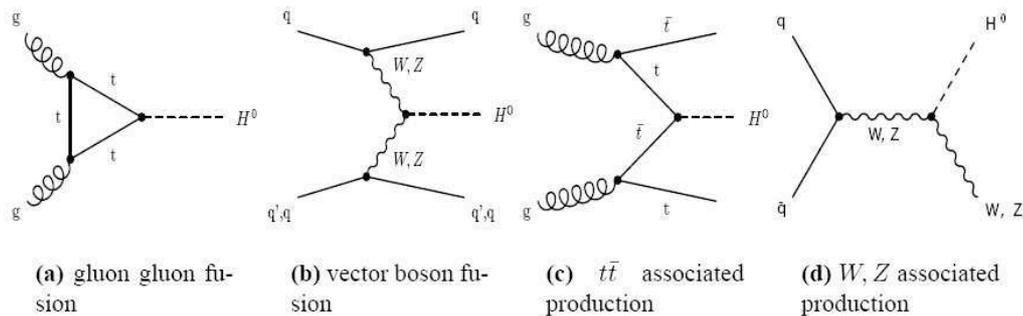


Figura 1.4: Diagrammi di Feynman dei principali processi di produzione del bosone di Higgs

In figura 1.5 sono visualizzati i possibili canali di produzione del bosone di Higgs con le relative sezioni d'urto che variano da qualche decina di picobar a pochi femtobar. Come si può notare la produzione per fusione gluone-gluone è il processo dominante lungo tutto l'intervallo di massa possibile; in tale processo si ha la formazione dell'Higgs tramite un loop di quark top (fig. 1.4 (a)). Per valore di massa più elevati ($m_H > 800$ GeV) diventa significativa la probabilità di produrre l'Higgs per fusione $WW(ZZ)$ (indicato in fig.1.5(a) $qq \rightarrow qqH$) in cui si ha l'emissione da parte di due quark di una coppia di W o Z che fondono in un bosone di Higgs (fig. 1.4 (b)). Per valori minori della massa dell'Higgs ($m_H < 200$ GeV) è possibile sfruttare il meccanismo di produzione sia tramite $W(Z)$ *Bremsstrahlung* dovuto all'interazione tra quark e antiquark (fig. 1.4 (d)) sia tramite il cosiddetto canale $t\bar{t}H$, in cui si ha produzione dell'Higgs associata a due quark top (fig. 1.4 (c)).

La scelta del canale di decadimento ottimale per la caratterizzazione dell'Higgs è vincolata dalla possibilità di separare il segnale S dal fondo B, il cui rapporto varia al variare della massa m_H , cosicchè processi più vantag-

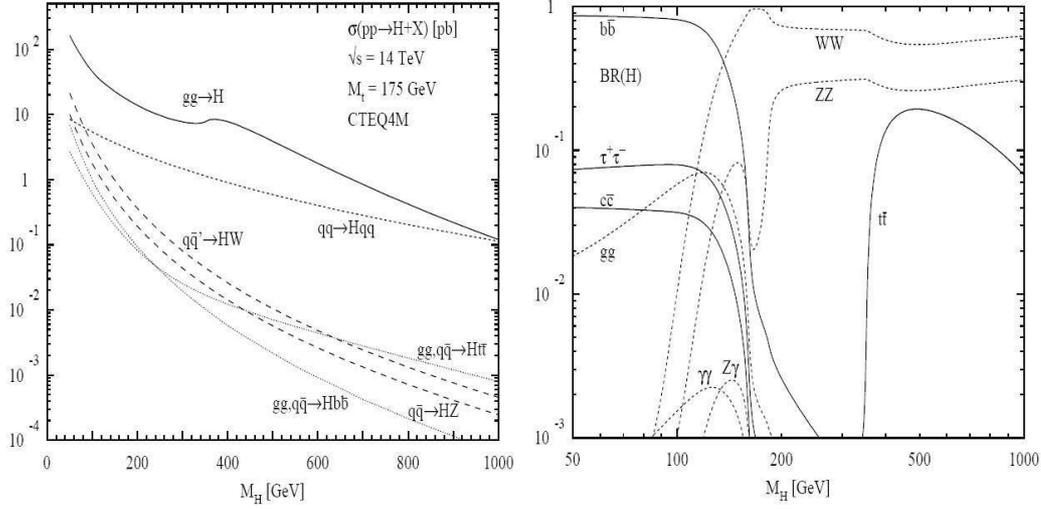


Figura 1.5: Sezione d'urto totale di produzione dell'Higgs in funzione di m_H (a). Rapporti di decadimento (BR) per i decadimenti dell'Higgs nel range tra 50 e 200 MeV (b).

giosi per determinati valori di massa possono non esserlo per altri valori. I principali canali di decadimento sono rappresentati in figura 1.6 con i corrispondenti rapporti di decadimento al variare di m_H . Per valori di massa inferiori alla soglia di produzione di due bosoni ($m_H < 130$ GeV), il processo dominante è $H \rightarrow b\bar{b}$; tuttavia tale canale è di difficile rivelazione a causa dell'alto fondo di quark beauty (b) presente in tale intervallo. Per tali valori il canale più promettente è $H \rightarrow \gamma\gamma$, che sebbene presenti un basso BR (10^{-3}) (fig.1.5 (b)), ha una traccia più facilmente distinguibile grazie ad un miglior rapporto S/B. Tale tipo di evento può esser rivelato grazie all'uso di un calorimetro elettromagnetico che dall'interazione dei fotoni ne identifichi il passaggio e ricostruisca la traccia. Per valori di massa maggiori ($130 \text{ GeV} < m_H < 2m_Z$) diviene significativo il canale di decadimento in coppie di bosoni massivi (WW o ZZ) che successivamente decadono in quattro leptoni carichi: $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4l$. In tal caso la produzione di coppie di leptoni carichi isolati richiede, per la ricostruzione dell'evento, un'alta efficienza nella ricostruzione delle tracce cariche da parte del tracciatore e delle camere muoniche e la possibilità di applicare tagli all'impulso trasverso per ridurre

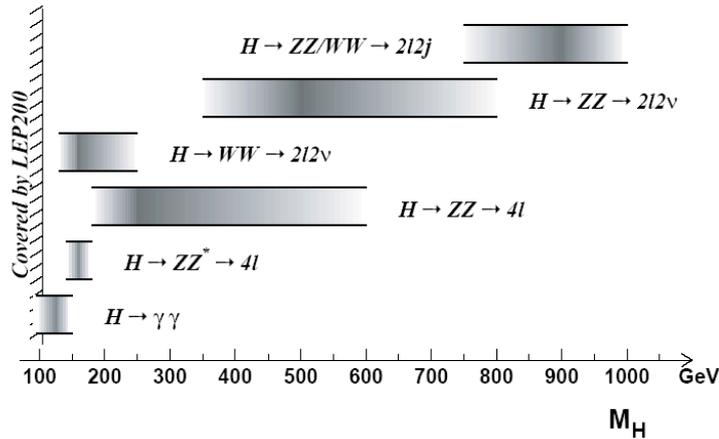


Figura 1.6: Canali di decadimento migliori per la scoperta del bosone di Higgs ad LHC al variare di m_H .

la componente di fondo del segnale.

Al di sopra del valore di $m_H=2m_Z$ la scoperta di un bosone di Higgs è strettamente legata al canale $H \rightarrow ZZ \rightarrow ll\nu\bar{\nu}$ o $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu jj$; la ricostruzione di questi eventi è resa difficile dalla presenza di neutrini nello stato finale identificabili solo come massa mancante attraverso un calorimetro adronico. L'andamento generale dei canali di decadimento lungo tutto lo spettro di massa dell'Higgs è rappresentato in figura 1.7 in relazione alla *significatività² di scoperta* il cui limite inferiore è fissato convenzionalmente a 5σ .

1.2.3 La fisica Elettrodebole

La fisica Elettrodebole sarà di estremo interesse sin dai primi giorni di presa dati, sia per le alte sezioni d'urto in gioco che per la relativa semplicità degli stati finali. Ad una luminosità di $10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ verranno, per esempio, prodotte circa 15 eventi al secondo di $W \rightarrow e\nu$, 1.5 eventi al secondo di $Z \rightarrow ee$ e circa 0.8 eventi al secondo di $t\bar{t}$. Molti canali elettrodeboli, come la produzione delle Z e delle W potranno essere anche usati per la calibrazio-

²La significatività è definita come $S = \text{Segnale}/\sqrt{\text{Fondo}}$

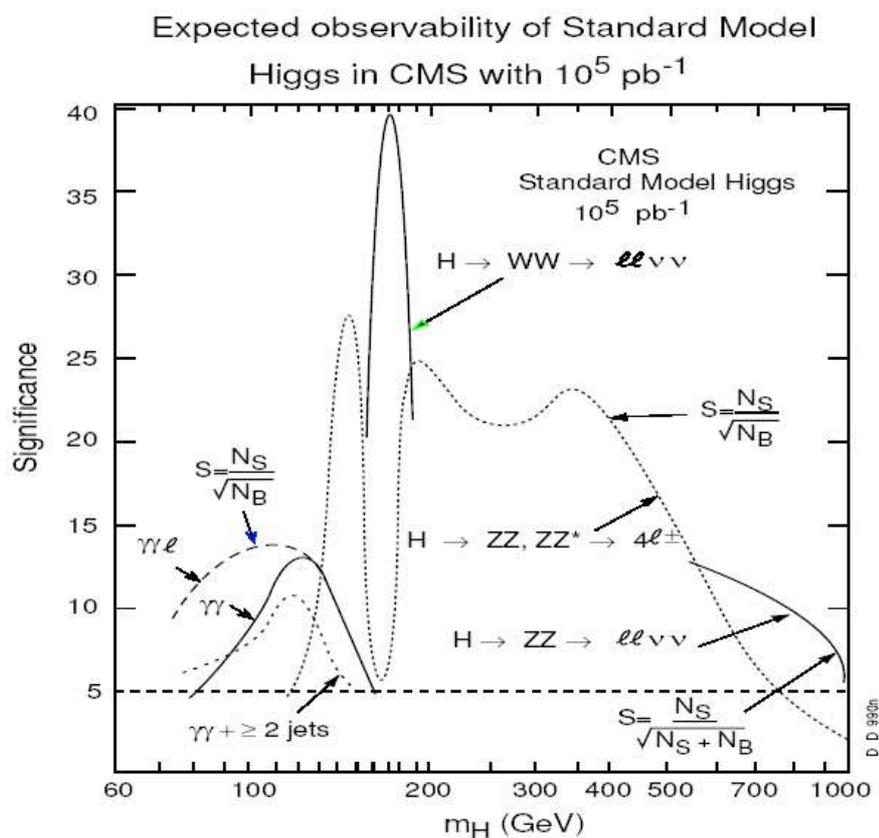


Figura 1.7: Significatività, o potenziale di scoperta, del bosone di Higgs nei vari canali in funzione di m_H .

ne e per la comprensione degli apparati sperimentali, lavoro estremamente importante nella prima fase di LHC. Tra le varie misure di questo settore bisogna sottolineare la misura della massa della W che insieme alla misura della massa del quark top limitano il range della massa del bosone di Higgs attraverso le correzioni radiative. Una misura precisa di m_W ed m_t consentono quindi di restringere i limiti sul valore di m_H sia nel modello SM che in quello MSSM. Attualmente la massa della W è nota con un errore di circa 30 MeV, errore che potrà diventare circa 15 MeV dopo qualche mese di LHC. Questo, insieme ad un errore sulla massa del top di circa 1.5 GeV porterà ad un restringimento della regione possibile del valore della massa dell'Higgs di

circa il 30%. La produzione Drell-Yan di coppie di leptoni è un processo che ha una segnatura molto chiara e pulita ed un basso fondo sperimentale. Per questo motivo sia la misura della sezione d'urto che quella della asimmetria avanti-indietro in funzione della rapidità y e della massa invariante dei leptoni è di estremo interesse in quanto può mostrare evidenza di nuova fisica e può essere usata per verificare le correzioni radiative fino ad energia del TeV

1.2.4 SUSY

Diverse motivazioni teoriche inducono a pensare che il modello standard altro non sia che un'approssimazione a basse energie di una teoria più generale, che si basa sul concetto di supersimmetria. L'idea di base è che per ogni particella descritta dal Modello Standard esista un "partner supersimmetrico" avente statistica opposta. La struttura supersimmetrica prevede infatti l'esistenza di multipletti di particelle aventi uguale massa e il cui spin differisce di $1/2$. Di conseguenza bosoni e fermioni saranno definiti da una struttura a multipletto che differisce dal relativo partner supersimmetrico per un fattore di spin $1/2$, cancellando in tal modo le divergenze presenti nel modello standard. L'estensione Minimale Supersimmetrica del Modello Standard (MSSM) predice l'esistenza di una famiglia di 5 bosoni di Higgs supersimmetrici: 3 particelle neutre (h, H, A) e due cariche (H^\pm). Nei modelli supersimmetrici i canali di produzione e di decadimento di ogni particella saranno gli stessi del relativo partner supersimmetrico. Grazie all'alto range di masse raggiungibile da LHC, sarà possibile verificare la presenza di eventuali partner supersimmetrici con sezioni d'urto dell'ordine di qualche pb.

1.2.5 Fisica del quark Top

L'alta luminosità raggiungibile permette ad LHC di comportarsi come una t -factory in grado di produrre da 8 a 80 milioni di coppie $t\bar{t}$ all'anno. Lo studio dei processi di produzione e decadimento di coppie di quark $t\bar{t}$ potrebbe completare le nostre conoscenze nel settore della rottura di simmetria elettrodebole e rivelare fenomeni di nuova fisica, essendo il quark top l'unica particella fondamentale conosciuta con massa paragonabile alla scala elettro-

debole. Grazie all'alto rate di eventi e ad una sezione d'urto di circa 830 pb già a bassa luminosità, LHC consentirà di migliorare la misura della massa ottenuta al Fermilab raggiungendo un'accuratezza di ~ 2 GeV dovuta quasi completamente ad errori sistematici, di calcolare la sezione d'urto effettiva e di studiare i possibili decadimenti esotici all'interno del SM ($t \rightarrow Z c$) o nel quadro del Modello Standard Supersimmetrico Minimale ($t \rightarrow H^+ b$). I principali canali di decadimento del quark Top coinvolgono un leptone ad elevato p_T ed uno o più getti adronici ($t\bar{t} \rightarrow (l\nu b)(j\bar{j}b)$). E' quindi necessaria buona risoluzione energetica da parte dello spettrometro e dei calorimetri, sia per il tagging dell'evento che per la ricostruzione della massa invariante.

1.2.6 Fisica dei B

Il canale $b\bar{b}$, come si evince dalla figura 1.3, è caratterizzato da un'alta sezione d'urto che consente di produrre circa $2.3 \cdot 10^{10}$ eventi/anno offrendo la possibilità di esplorare un ampio range di canali della fisica del B. L'alto tasso di eventi prodotti consentirà di studiare dettagliatamente le caratteristiche relative alla violazione della simmetria CP nei differenti rate di decadimento del bosone B^0 e della corrispondente antiparticella \bar{B}^0 e raffinare i parametri della matrice di Cabibbo-Kobayashi-Maskawa, individuando eventuali discrepanze del Modello Standard. I processi più promettenti nella violazione CP sono i canali $B_d^0 \rightarrow J/\Psi K_s^0$, $J/\Psi \rightarrow \mu\mu$. La maggiore difficoltà consiste nel fatto che i leptoni che decadono dal b sono abbastanza leggeri e difficilmente distinguibili dall'alto fondo dovuto ai decadimenti leptonici di pioni, kaoni e quark charm. In tale campo è incentrato prevalentemente lo studio e la progettazione dell'esperimento LHCb, mentre sarà sviluppato dagli esperimenti ATLAS e CMS prevalentemente durante la prima fase a bassa luminosità di LHC.

1.3 Il rivelatore CMS

La grande molteplicità di particelle prodotte, il breve intervallo temporale tra gli eventi e un'intensa radiazione di fondo sono i prerequisiti fondamentali su cui si basano le scelte progettuali di qualsiasi esperimento ad LHC; l'esperi-

mento CMS (*Compact Muon Solenoid*) è stato sviluppato come un rivelatore multifunzionale in grado di rispondere a tali requisiti ottimizzando ogni singolo sottoelemento per sfruttare a pieno le potenzialità offerte da LHC. Le scelte progettuali in tale direzione hanno condotto alla definizione delle seguenti caratteristiche per il rivelatore:

- granularità fine per la separazione del gran numero di tracce prodotte.
- rapida risposta per minimizzare gli effetti di sovrapposizione fra differenti BX (effetti di *pile-up*).
- sistema trigger e DAQ ottimizzati a lavorare all'altissima frequenza di incrocio dei fasci (40 MHz).
- buona resistenza alla radiazione per tutti i componenti, con particolare attenzione alle zone adiacenti alla zona di interazione.

L'intera struttura è composta da un sezione cilindrica longitudinale centrata sul punto di incrocio dei fasci (barrel) di lunghezza di 21.6 m e 15 m di raggio, chiusa lateralmente da due dischi (endcap) (fig. 1.8). L'elemento principale del rivelatore è un solenoide superconduttore lungo circa 13 m, di 3 m di raggio, capace di creare all'interno un campo magnetico di 4 Tesla, tenuto uniforme da un giogo di ritorno di ferro (YB, YE). L'uso di un campo magnetico di tale intensità assicura una precisa determinazione del momento dei muoni, sia per il sistema di tracciamento esterno che interno, selezionando le tracce e aumentandone la spiralizzazione. All'interno del solenoide sono collocati, sotto forma di cilindri coassiali, il sistema di tracciamento, il calorimetro elettromagnetico e quello adronico; all'esterno, interposte nella struttura in ferro che richiude il giogo del ferro, sono presenti le stazioni muoniche costituite, nel barrel, da RPC (*Resistive Plate Chambers*) e DT (*Drift Tube*), negli endcap da RPC e CSC (*Cathode Strip Chambers*). Il rivelatore, per assicurare l'ermeticità della struttura e la capacità di misurare l'energia persa, è chiuso longitudinalmente da due calorimetri in avanti molto vicini alla linea dei fasci, coprendo la regione pari a $3 \leq |\eta| \leq 5$.

Il rivelatore è riferito ad un sistema di coordinate ortogonali centrato rispetto al punto di interazione (fig. 1.10): l'asse del fascio coincide con l'asse

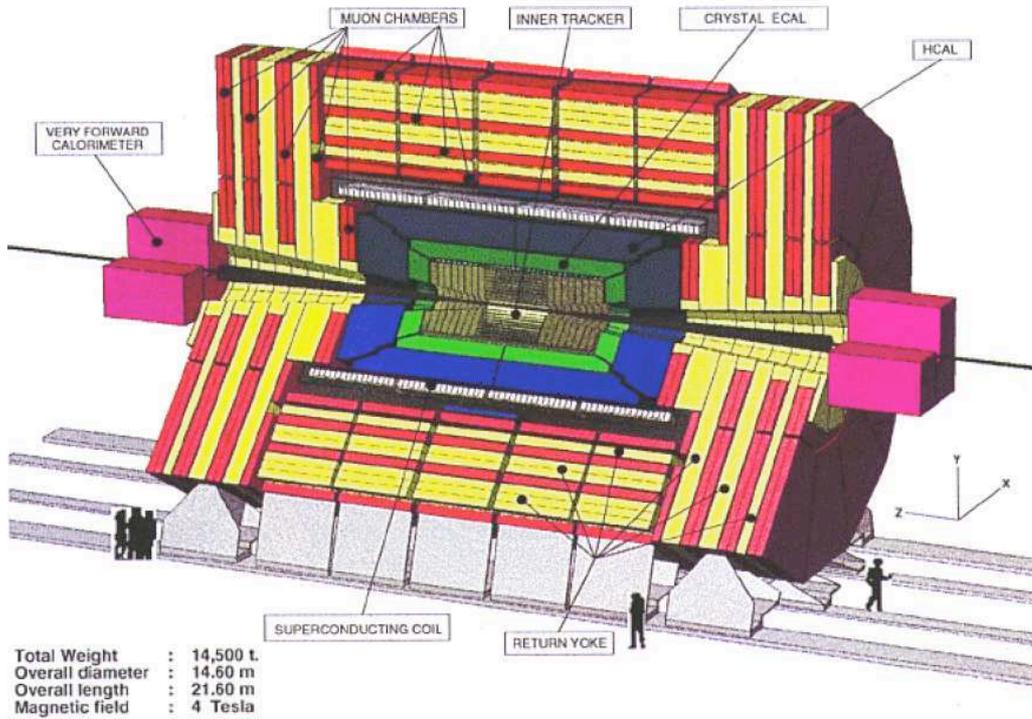


Figura 1.8: Vista prospettica di CMS.

z , mentre gli assi x e y diretti rispettivamente verso il centro dell'anello e verso l'alto completano il sistema destrorso di riferimento. Alternativamente può essere utile utilizzare un sistema di riferimento cilindrico che segua la geometria del rivelatore in cui oltre alle coordinate r e ϕ nel piano ortogonale al fascio, si introduce la coordinata nel piano rz definita pseudorapidità, $\eta = -\ln \tan \frac{\theta}{2}$, con θ angolo rispetto all'asse z . Il vantaggio di utilizzare tale sistema di riferimento risiede nel fatto che la molteplicità media della particelle prodotte è uniforme rispetto a η ($dn/d\eta = \text{cost}$). Nei prossimi paragrafi si descriveranno brevemente le caratteristiche dei singoli componenti che costituiscono il sistema, ad eccezione del sistema muonico, a cui è dedicato il prossimo capitolo.

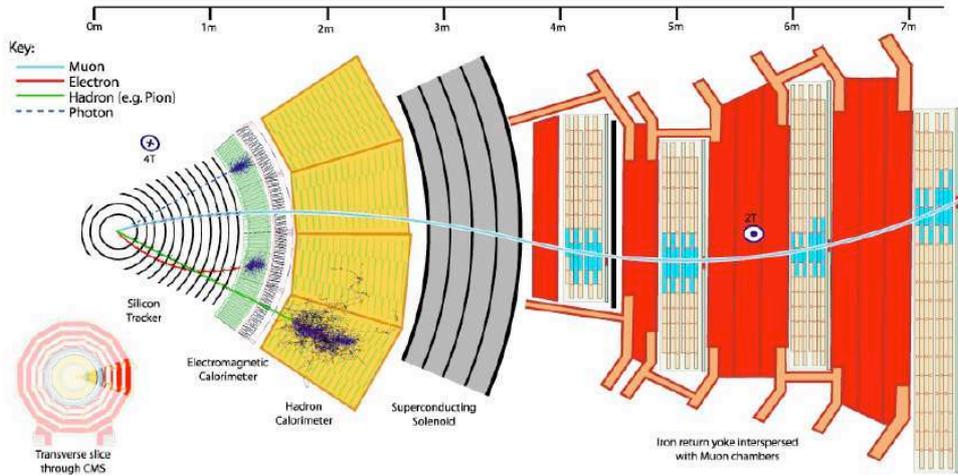


Figura 1.9: Significatività, o potenziale di scoperta, del bosone di Higgs nei vari canali in funzione di m_H .

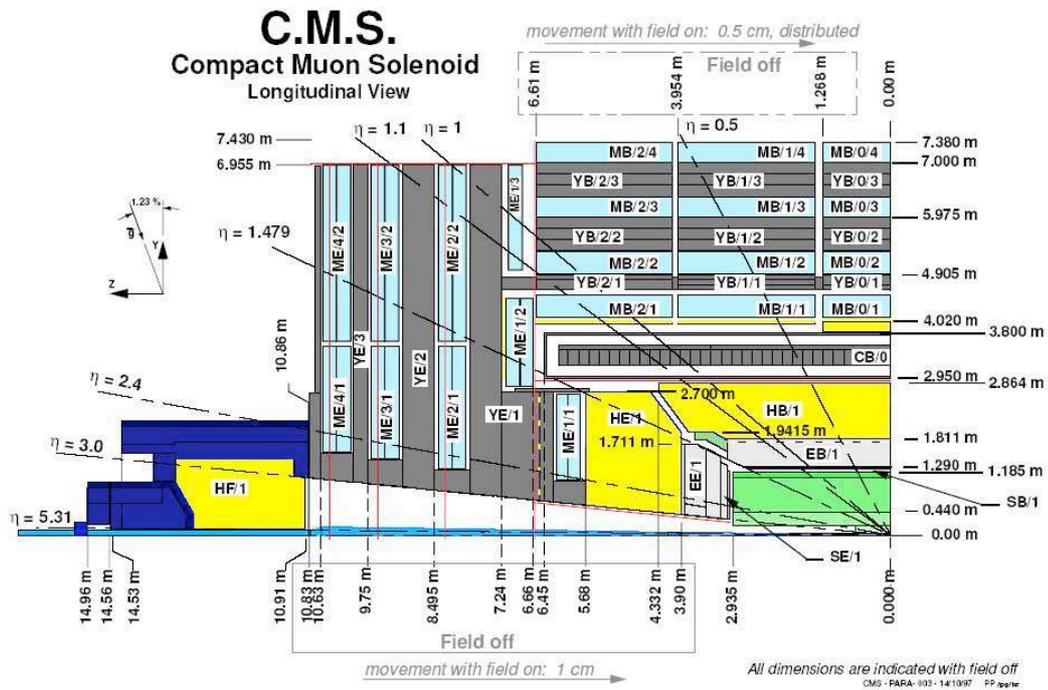


Figura 1.10: Vista longitudinale di un quarto di CMS.

1.3.1 Il sistema di tracciamento

Il sistema di tracciamento [12] [13] è il rivelatore più interno che consente, sfruttando il campo magnetico generato dal solenoide, di ricostruire le tracce delle particelle cariche, di misurarne il momento e di ricostruirne i vertici di decadimento primari e secondari, nella regione di $|\eta| < 2.5$. Combinando le informazioni ottenute con quelle dei calorimetri e del sistema muonico è possibile identificare il passaggio di elettroni, fotoni e muoni e ricostruirne i vertici con una grande efficienza e alta risoluzione grazie alla sua granularità. La struttura del sistema di tracciamento scelta per CMS è composta completamente da rivelatori al silicio, rispettivamente con rivelatori a pixel per la parte più interna (fig. 1.11) e da rivelatori a microstrip per le parti esterne (fig. 1.12). L'utilizzo di rivelatori a pixel nella zona più vicina all'interazione del fascio consente una maggiore risoluzione per la costruzione del vertice di decadimento grazie alla doppia segmentazione lungo z e ϕ , eliminando in tal modo le tracce fantasma.

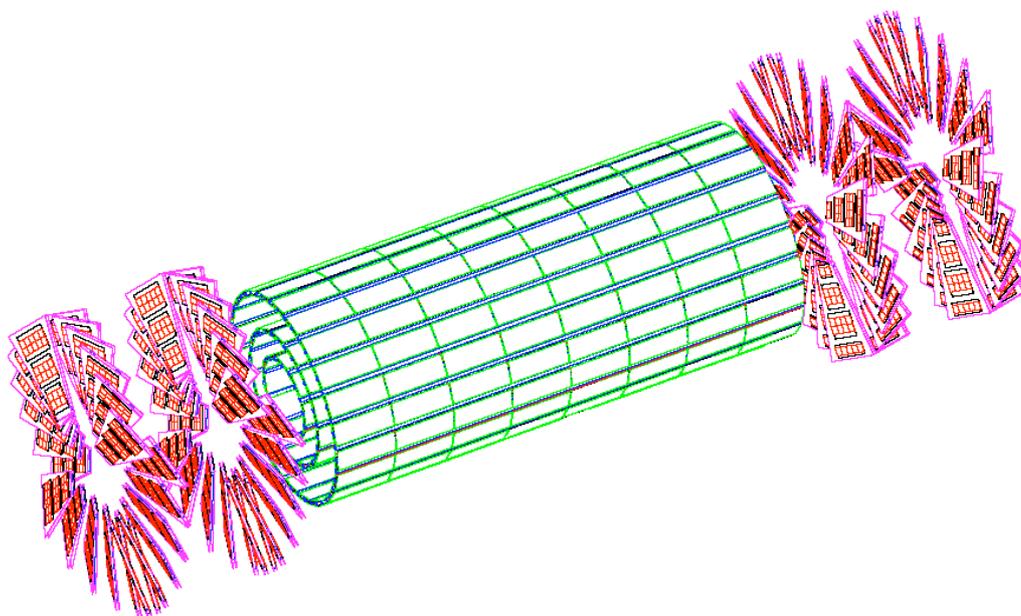


Figura 1.11: Vista tridimensionale del sistema di tracciamento a Pixel.

Particolare attenzione nella scelta progettuale del tracker è stata fatta sulle caratteristiche del materiale utilizzato e della sua geometria; infatti oltre agli ingombri meccanici, è importante sviluppare una struttura che limiti le perturbazioni sulle particelle prodotte dall'interazione col rivelatore stesso (scattering e bremsstrahlung) che possano compromettere il funzionamento dei restanti rivelatori di CMS. La struttura scelta ha quindi una forma cilindrica (barrel) in cui i vari strati di rivelatori al silicio sono posizionati coassiali con la direzione dei fasci di particelle di LHC chiusa lateralmente da dischi (endcap) che coprono la restante zona in pseudorapidità.

Il rivelatore a pixel

Il rivelatore a pixel è composto da circa 45 milioni di pixel e la struttura base è formata da un quadrato di materiale di dimensione $150 \times 150 \mu\text{m}^2$ ottenuti impiantando zone di tipo n^+ in un substrato di tipo n . Grazie al campo magnetico e all'ampio angolo di deflessione di Lorentz da esso prodotto sulle particelle, è possibile ottenere per interpolazione di carica su pixel adiacenti, una risoluzione nel barrel di $10 \mu\text{m}$ lungo ϕ e $15 \mu\text{m}$ lungo z . Il primo strato del barrel è stato posto ad una distanza di 4.3 cm dal punto di interazione del fascio, a cui si succedono altri due strati di rivelatori a pixel posti ad una distanza di 7.2 e 11.0 cm rispettivamente; la struttura è chiusa ermeticamente da ambo i lati da due dischi a pixel posti ad una distanza di 32.5 cm e di 46.5 cm dal centro di interazione dei fasci e ortogonalmente rispetto all'asse z in modo da assicurare l'interazione delle particelle prodotte con $|\eta| < 2.5$ in almeno due punti (fig. 1.11).

Il rivelatore a microstrip di silicio

Globalmente il tracker è formato da ~ 15000 rivelatori a microstrip per un totale di oltre 10 milioni di canali di lettura e con una superficie totale ricoperta di oltre 300 m^2 . La struttura geometrica di tale rivelatore ricalca la filosofia di progettazione del rivelatore a pixel: tale struttura è composta da una serie di strati (10) formati da moduli a microstrisce di silicio di spessore differente : gli strati 4-7 di spessore $320 \mu\text{m}$ compongono il TIB (Tracker

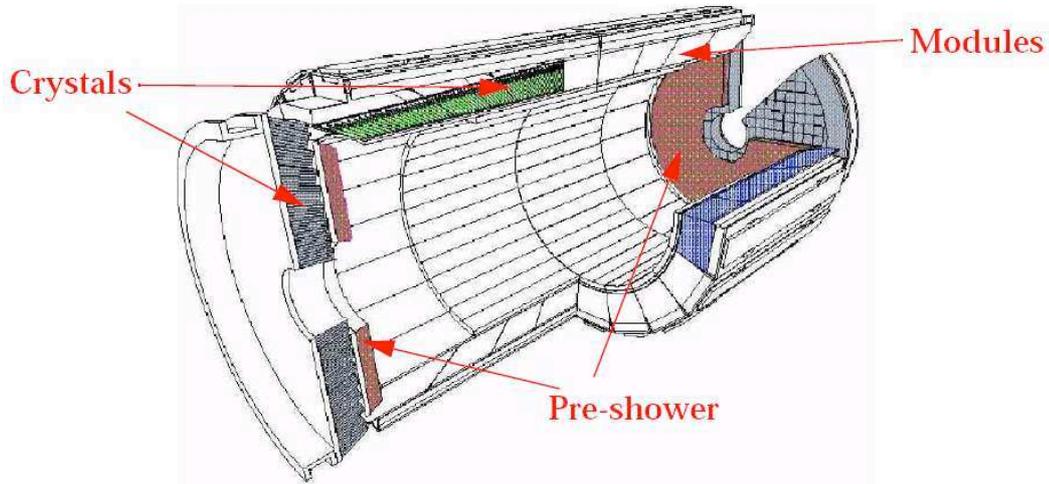


Figura 1.13: Vista interna del calorimetro elettromagnetico.

(HCAL)[15] posto esternamente a questo; l'ermeticità dell'intero sistema è assicurata dalla presenza di ulteriori calorimetri adronici posti a 11 m dal punto di interazione che coprono la regione $3.0 < |\eta| < 5.0$.

Il calorimetro elettromagnetico

Uno dei compiti principali del calorimetro elettromagnetico è la rilevazione dei fotoni e la determinazione delle loro tracce al fine di indagare il canale dell'Higgs leggero ($H \rightarrow \gamma\gamma$) e ricostruirne la massa invariante. La struttura base dell' ECAL (fig.1.13) è costituita da circa 8000 cristalli di tungsteno di piombo (PbWO_4) caratterizzati da una breve lunghezza di radiazione ($X_0 = 0.9$ cm) e da un raggio di Moliere di 2.2 cm che consentono di contenere le dimensioni del calorimetro, una veloce formazione e propagazione del segnale ed un'alta resistenza alle radiazioni. Ogni singolo cristallo ha una struttura trapezoidale con base quadrata rivolta verso il centro di interazione di area variabile ($22 \times 22 \text{ mm}^2$ di sezione \times 230 mm di profondità nel barrel e $30 \times 30 \text{ mm}^2 \times 220$ mm nell'endcap) che comporta una copertura pari a $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.0175 \times 0.0175$ nel barrel e $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.5 \times 0.5$ nell'endcap. Per la raccolta e la propagazione del segnale ogni singolo cristallo è collegato ad un sistema di amplificazione e di raccolta del segnale formato da fotodiodi a valanga

(APDs) nel barrel e da fototriodi a vuoto (VPTs) nell'endcap che rispetto ai primi assicurano una minore corrente di perdita indotta. La risoluzione attesa per nel barrel e nell'endcap rispettivamente è pari a :

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{2.7\%}{\sqrt{E}} \oplus \frac{0.210}{E} \oplus 0.55\%$$

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{5.7\%}{\sqrt{E}} \oplus \frac{0.245}{E} \oplus 0.55\%$$

somma in quadratura di termini dipendenti rispettivamente dal numero di processi elementari prodotti e da fluttuazioni fotostatistiche, dal rumore dovuto al pile-up e all'elettronica di lettura e dal processo di intercalibrazione e alla non uniformità dei cristalli.

I calorimetri adronici

Il calorimetro adronico è costituito da due sistemi: un calorimetro centrale in grado di assicurare un'eccellente identificazione dei getti e buona risoluzione in energia e un calorimetro in avanti caratterizzata da prestazioni minori dovute al diverso ambiente in cui opera. Il compito principale del calorimetro adronico consiste nel misurare l'energia e la direzione dei jet adronici e nello stimare l'energia trasversa mancante, unico parametro utile per l'identificazione dei neutrini; a tal scopo fondamentale è l'ermeticità della struttura assicurata dalla geometria scelta. Il calorimetro centrale è formato dal barrel che si estende nella regione di pseudorapidità pari a $|\eta| < 1.74$ e da due dischi che formano l'endcap ($1.3 < |\eta| < 3.0$); l'intera struttura è contenuta all'interno del campo magnetico del solenoide e ciò impone la scelta di materiali non ferromagnetici per la rivelazione. Il calorimetro adronico di CMS è un calorimetro a campionamento costituito da lastre di assorbimento di rame intervallate da lastre di scintillatore plastico come elemento attivo. Il valore di circa $6.5 \lambda_I$ (lunghezze di interazione nucleare) dello spessore del barrel rende necessario l'aggiunta di un ulteriore stadio del calorimetro per assicurare il completo contenimento degli sciami adronici; quest'ulteriore elemento per le code, posto fuori dal magnete, incrementa la profondità fino a $10 \lambda_I$ nella zona per $|\eta| < 1.74$. Una buona risoluzione spaziale per la separazione dei

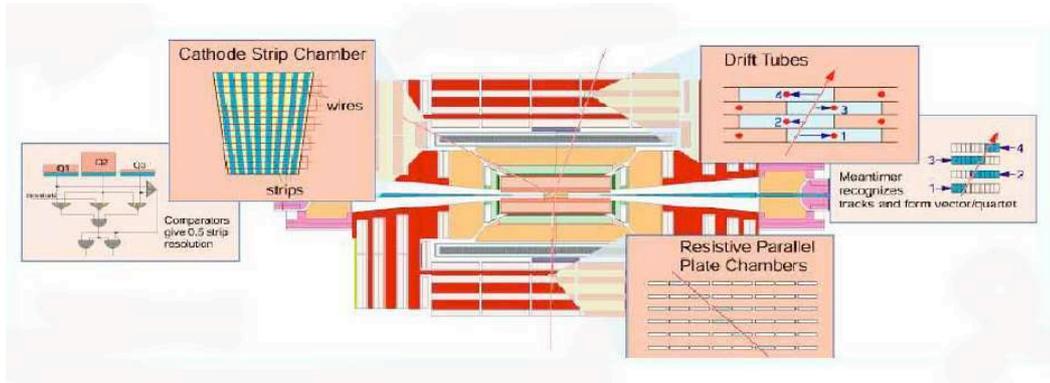


Figura 1.14: Il sistema muonico di CMS.

jet e per la misurazione dell'energia è assicurata da una risoluzione spaziale pari a $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.087 \times 0.087$. L'ermeticità dell'apparato è assicurata grazie all'utilizzo di due ulteriori calorimetri posto lateralmente alla struttura che assicurano la completezza nella regione fino a $|\eta| = 5$. L'ambiente di lavoro in tale configurazione è soggetto ad una dose di radiazione più alta che non permette l'uso degli stessi materiali del calorimetro centrale; per ovviare a tale inconveniente la struttura è costituita da rame e fibre di quarzo come mezzo attivo che, colpite da alcune componenti dello sciame adronico producono luce per effetto Cherenkov.

1.3.3 Il sistema muonico

Il sistema muonico di CMS [11], descritto in figura 1.14, è composto da cinque ruote poste attorno al magnete e da due endcap. Quattro stazioni per il barrel e altrettante nell'endcap sono integrate all'interno del giogo in ferro di ritorno del magnete e coprono una regione in pseudorapidità che va da 0 a 2.4. Il sistema muonico è composto da tre tipi di rivelatori differenti : drift tube nel barrel, cathode strip chambers nell'endcap e resistive plate chamber in entrambe le zone, assicurando mediante questa configurazione un sistema efficiente e ridondante sia per il sistema di trigger che per l'identificazione dei muoni e la determinazione del loro momento trasverso. Una più dettagliata

descrizione del funzionamento, delle scelte e dei componenti verrà offerta nel prossimo capitolo.

1.4 Trigger e sistema DAQ

Lo studio delle sezioni d'urto dei processi fisici nell'interazione protone-protone ad ogni BX sviluppato nel paragrafo ha messo in luce che le sezioni d'urto dei fenomeni interessanti sono diversi ordini di grandezza inferiori della sezione d'urto totale inelastica all'energia di LHC (fig. 1.15); di conseguenza la maggior parte degli eventi prodotti saranno eventi di fondo poco interessanti. Alla luminosità massima nominale di LHC il numero di eventi prodotti

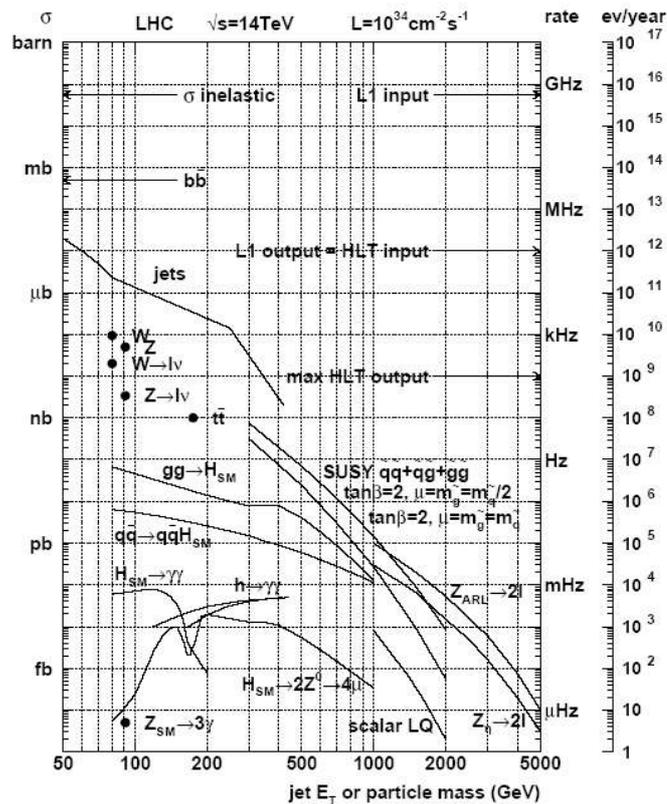


Figura 1.15: Sezione d'urto a rate degli eventi alla max luminosità in relazione alla massa degli oggetti prodotti

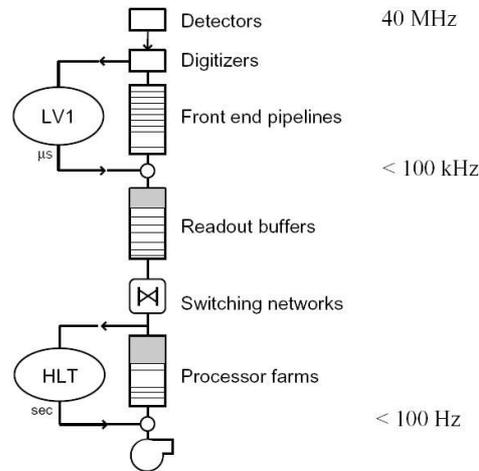


Figura 1.16: Flusso dati del sistema di trigger di CMS.

all'interno di ogni BX sarà circa 17, cioè circa 10^9 eventi al secondo, valore estremamente superiore alle capacità di archiviazione delle memorie di massa. La selezione degli eventi interessanti e la riduzione del flusso dati a valori accessibili per le moderne tecnologia rappresenta l'obiettivo principale del TRIDAS (sistema di trigger e di acquisizione dati) di CMS, in grado di ridurre il flusso dati fino 100 Hz assicurando un fattore di riduzione pari a $40 \text{ MHz}/100\text{Hz} = 4 \cdot 10^5$. L'architettura del trigger di CMS (fig. 1.16) è sviluppata in due livelli in serie che compiono una differente riduzione del flusso dati: L1 e HLT. Il primo stadio è costituito dal trigger di primo livello che acquisisce in ingresso i dati provenienti dal Bx a 40 MHz.

Tale struttura non è però in grado di analizzare e rigettare gli eventi in un tempo compreso tra due BX ; di conseguenza la struttura è stata integrata con una serie di memorie pipeline in grado di memorizzare i dati provenienti da ogni BX, eliminando così i tempi morti (latency) e trattenendoli per il tempo necessario ($\sim 3.2\mu\text{s}$ pari a 128 BX) alla loro rielaborazione da parte del primo stadio di trigger. Il trigger di primo livello è basato sui soli dati provenienti dal sistema calorimetrico e dal sistema muonico ed è implementato attraverso un'elettronica custom in grado di compiere una riduzione dei dati di un fattore circa 10^3 fornendo in uscita un flusso di dati di 75 kHz.

Gli eventi selezionati dal trigger di primo livello sono trasmessi dal set di memorie FIFO al sistema di DAQ dove vengono elaborati dal secondo stadio del trigger, l'High Level Trigger (HLT), aggiungendo le informazioni ulteriori provenienti dal sistema di tracciamento. Tale struttura è sviluppata attraverso una successione di filtri compiuti da farm di processori commerciali su cui girano gli algoritmi software che implementano la selezione e la riduzione degli eventi. Dei 75 kHz disponibili per la elaborazione degli algoritmi sono un terzo della banda è utilizzato dal primo stadio dell'HLT, L2, allocando il resto della banda come margine di sicurezza per prevenire errori dovuti a valori di aspettazione errati nella simulazione dei processi fisici e nella stima delle sezioni d'urto attese. Soltanto al livello 3 del trigger, vengono elaborati i dati provenienti dal tracker che costituiscono circa l'80% della dimensione dell'evento prodotto (~ 1 MByte) che richiedono gli algoritmi più complessi per la ricostruzione. La frequenza dei dati in uscita da tale livello del trigger sarà pari a 100 Hz che rappresenta il valore massimo di acquisizione delle odierne memorie di massa che consentiranno un'analisi offline dei dati provenienti dal BX. Essendo la latency di circa $\sim 3.2\mu s$ e la dimensione media di un evento è pari ad 1 MB, ciò implica che la frequenza di archiviazione richiesta dal sistema è pari a:

$$1MBytes \cdot 100Hz = 100MB/s$$

. Oltre alla selezione degli eventi e alla ricostruzione delle informazioni provenienti da tutti i sottorivelatori di CMS, il sistema di DAQ provvede anche al controllo e al monitoraggio degli elementi del rivelatore assicurando il corretto funzionamento del rivelatore e l'alta qualità dei dati acquisiti.

Capitolo 2

Il Trigger per muoni

2.1 Il sistema Muonico

Il sistema muonico rappresenta l'anello finale della struttura che assicura completezza ed efficienza all'intero sistema; particolare attenzione è stata data nella progettazione di CMS all'apparato di identificazione dei muoni sia per il ruolo che essi ricoprono nella scoperta del bosone di Higgs nel cosiddetto "canale d'oro", sia per l'importanza che rivestono per il funzionamento del rivelatore come trigger degli eventi e per l'identificazione del BX. Il principale obiettivo del sistema muonico è quindi identificare muoni e, in combinazione col tracciatore, misurare accuratamente il loro momento trasverso sfruttando l'interazione col campo magnetico; tutto ciò è stato implementato attraverso l'utilizzo combinato di tre tipi differenti di rivelatori, allocati all'interno del giogo di ferro, che assicurano completezza e ridondanza al sistema. Il sistema è costituito tre differenti elementi per la rilevazione di muoni: DT (Drift Tube) nel barrel, dove il campo magnetico è più basso e il rate di eventi è minore, da CSC (Cathode Strip Chambers) nell'endcap, ambiente più ostile caratterizzato da un alto flusso di particelle, e da RPC (Resistive Plate Chambers), sia nell'endcap che nel barrel, che assicurano ridondanza al sistema. Tutte le camere muoniche sono allineate perpendicolarmente alla traiettoria dei muoni e coprono una regione di spazio pari a $|\eta| < 2.4$ (fig. 2.1).

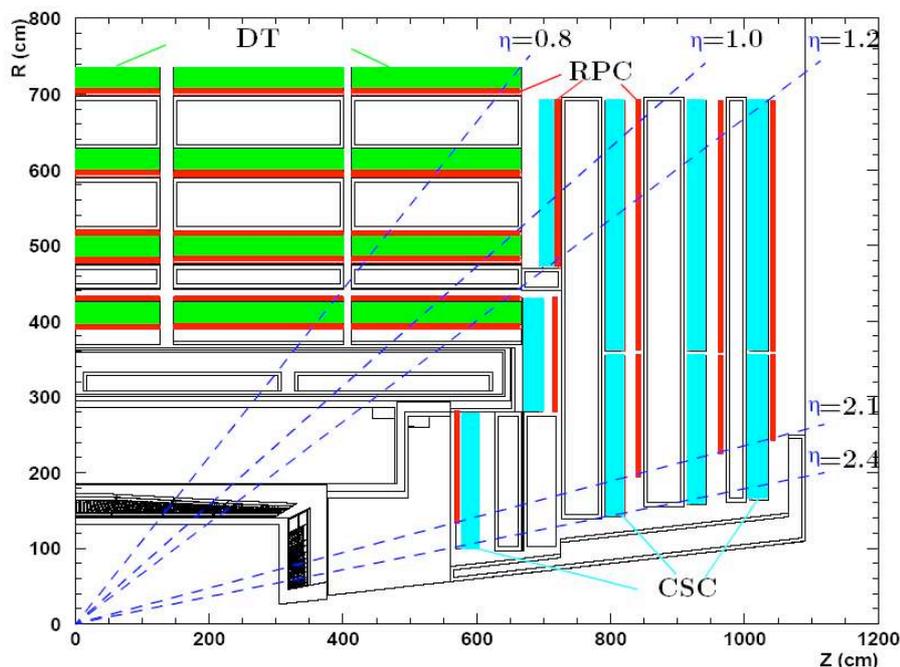


Figura 2.1: Vista longitudinale di un quarto del sistema muonico di CMS.

2.1.1 Drift Tube

L'elemento base di una DT, schematizzato in fig.2.2 (a), misura 42 mm di larghezza, 13 mm di altezza e può avere una lunghezza massima di 4.2 m. L'anodo è costituito da un filo di acciaio inossidabile con diametro di $50 \mu\text{m}$ posto al centro della cella, mentre i catodi sono realizzati con barre di alluminio a forma di "T", posizionate su entrambi i lati della cella e in comune con la cella adiacente. All'interno di ogni cella lungo i bordi superiori e inferiori sono presenti ulteriori elettrodi che migliorano l'uniformità del campo elettrico e assicurano una velocità di drift della particella di circa $5.6 \text{ cm}/\mu\text{s}$, con un tempo massimo di drift di 375 ns. Come mezzo attivo all'interno della cella è stata scelta una miscela di Argon e CO_2 (80%/20%) che assicurano buone proprietà di quenching e una velocità di deriva ragionevolmente costante. Una singola cella ha un'efficienza di $\sim 99.8\%$ e una risoluzione spaziale di $\sim 180 \mu\text{m}$. Le DT sono allocate all'interno del giogo in ferro seguendo la disposizione in figura 2.2 (b) in cui quattro piani di celle, disposte affian-

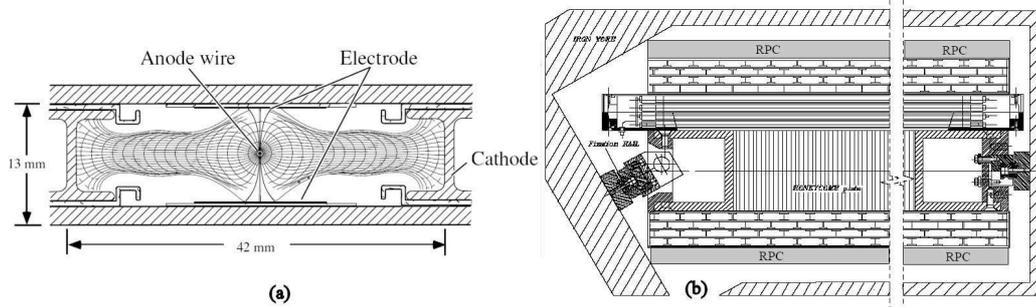


Figura 2.2: Il sistema delle DT di CMS. Schema di funzionamento di una DT (a) e disposizione all'interno di un SL (b)

cate e sfasate di mezzo passo fra piani adiacenti, formano un super-layer; ogni camera è composta da tre super-layer, due disposti lungo la direzione parallela alla linea dei fasci e alle linee di forza del campo magnetico per misurare la coordinata $r-\phi$ e la curvatura della traccia (e quindi il suo p_T) ed uno ortogonale a questo per misurare le coordinate $r-z$.

2.1.2 Cathode Strip Chambers

Il sistema muonico all'interno dell'endcap è costituito da camere a strisce catodiche (CSC), preferite alle DT per le loro migliori prestazioni in un ambiente ad alto flusso di particelle e in presenza di un elevato e disomogeneo campo magnetico. La disposizione delle camere ricalca la struttura in ferro dei dischi dell'endcap. L'intero sistema è costituito di 540 camere suddivise in 4 stazioni (fig.2.3(a)): la stazione più interna è formata da tre anelli concentrici di camere mentre le restanti tre sono formate da due anelli. Ogni anello della stazione più interna è formato da due layer, che si sovrappongono in ϕ (eccetto ME1/3), da 36 camere di forma trapezoidale con fili paralleli alla base del trapezio che coprono 10° , mentre per le restanti stazioni gli anelli più interni sono costituiti da 18 camere, che coprono ognuna 20° , mentre il numero di quelle esterne è il doppio coprendo di conseguenza angolo di 10° . La struttura base di ogni camera è composta da 6 strati sovrapposti formati ognuno da array di fili anodici tra piani catodici; il segnale sui catodi è rac-

colto grazie a piani di strip segmentati in direzione ortogonale ai fili anodici (fig. 2.3 (b)). La larghezza della gap è di 9.5 mm ed è riempita con una miscela di gas di Ar/CO₂/CF₄ con percentuali di 30%/50%/20%. La formazione del

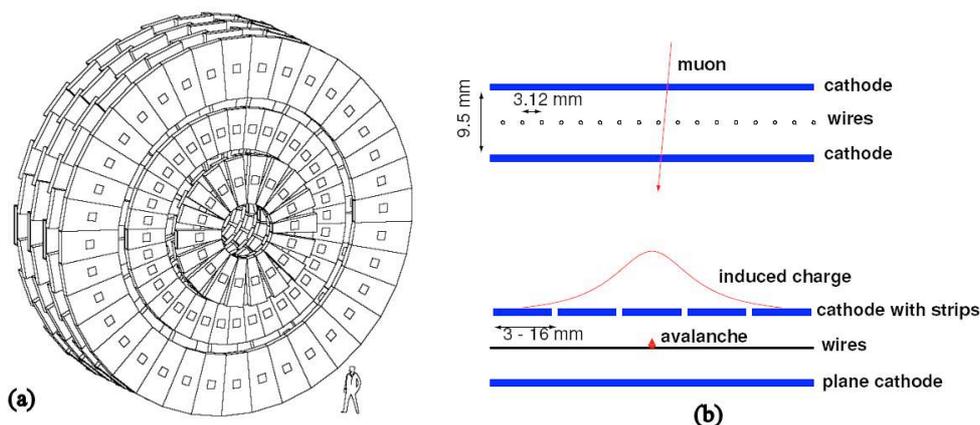


Figura 2.3: Descrizione della disposizione delle CSC all'interno dell'endcap (a). Rappresentazione dettagliata delle geometrie delle Cathode Strip Chambers (b)

segnale avviene sia sui fili anodici (coordinata R) sia sulle strip (coordinata ϕ) a seguito della ionizzazione prodotta dal passaggio della particella carica all'interno del volume gas e nella amplificazione in prossimità del filo anodico; la risoluzione spaziale lungo R è di ~ 5 mm, mentre lungo ϕ , grazie all'individuazione del baricentro del segnale indotto su strip adiacenti, risulta di $\sim 50 \mu\text{m}$. La diversa risoluzione spaziale richiesta è legata alle caratteristiche del campo magnetico all'interno dell'endcap, con le linee di forza per lo più in direzione radiale e all'algoritmo di trigger scelto. Particolare attenzione nella progettazione del sistema dell'endcap è stata fatta nella realizzazione della camera più interna della prima stazione che è posta in una regione ad alto campo magnetico (>3 T) e ad altissime dosi di radiazione: i fili anodici sono stati inclinati di 25° per compensare l'effetto di deflessione negli elettroni di deriva dovuto al campo magnetico (angolo di Lorentz), lo spessore della gap è stato diminuito a 6 mm e raddoppiato il numero di strip per far fronte all'alto rate di eventi.

2.2 I Rivelatori a piatti piani resistivi

I contatori a piatti piani paralleli resistivi (RPC), sviluppati agli inizi degli anni '80 da R. Santonico e R. Cardarelli [19] [20], sono rivelatori piani con elettrodi resistivi. La scelta della particolare geometria consente di creare un intenso e uniforme campo elettrico tra i due piatti vincolando il comportamento della carica prodotta all'interno del gas dal passaggio della particella; l'uso di elettrodi resistivi consente di limitare la regione in cui avviene la scarica, di ridurre i tempi morti del rivelatore e di migliorare il rate di eventi rivelabili.

Nella sua configurazione base un RPC è costituito da due piatti piani paralleli resistivi (elettrodi), spazati tra di loro di qualche mm, che delimitano il volume occupato dalla miscela gas (gap) e da pannelli metallici esterni per la lettura del segnale (pannelli di strip) (fig. 2.4). Ogni elettrodo è costituito di laminato plastico (bakelite), di spessore di ≈ 2 mm, ed è ricoperto da una sottile pellicola di vernice grafitata con conducibilità sufficiente per assicurare un'uniforme distribuzione della carica, ma allo stesso tempo "trasparente" ai segnali elettrici, che devono essere rilevati all'esterno. I due elettrodi, connessi all'alta tensione e a massa, creano all'interno della gap un campo elettrico costante e uniforme di $\approx 4-5$ KV/mm. La lettura del segnale è effettuata mediante strisce (strips) di alluminio, affacciate sui piani esterni alla gap e accoppiate capacitivamente con la gap, lungo le quali il segnale generato è raccolto ed è propagato in direzioni opposte con bassa attenuazione; le strip presentano un'estremità connessa all'elettronica di front-end e l'altra terminata a massa attraverso una resistenza di valore nominale pari all'impedenza caratteristica della strip ($\approx \Omega$) in modo da evitare eventuali riflessioni del segnale lungo la strip.

Gli RPC sono caratterizzati da un'ampia superficie di rivelazione (dell'ordine dei m^2), alta efficienza ($\geq 95\%$), un'ottima risoluzione temporale (≤ 2 ns) e una risoluzione spaziale dell'ordine del cm; inoltre la capacità di operare ad alto tasso di irraggiamento, unite al costo di produzione relativamente basso, rendono questi rivelatori i più adatti alla costruzione di sistemi di trigger per muoni di grande estensione e con capacità tracciante.

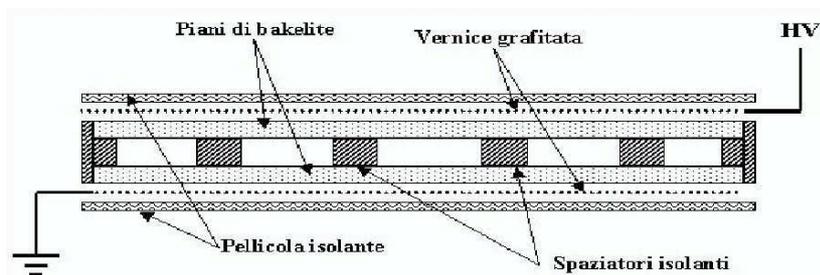


Figura 2.4: Sezione schematica di un RPC "monogap"

A differenza dei precedenti esperimenti in cui gli RPC sono stati utilizzati (ad es. NADIR, E771, WA92, MINI, L3 e BABAR) nei quali operavano in regime di streamer, le stringenti condizioni operative di LHC e il loro utilizzo all'interno del sistema di trigger per gli esperimenti ATLAS e CMS, hanno imposto un radicale cambiamento nella scelta delle condizioni di lavoro a favore del regime avalanche, caratterizzato da un segnale più debole ma da una minore area interessata dalla scarica che permette di operare a flussi di particelle maggiori. Nei paragrafi che seguiranno verranno descritte le principali caratteristiche di questi rivelatori, partendo dalla loro struttura meccanica, descrivendo i principi fisici di funzionamento fino ad arrivare ai possibili modi di funzionamento.

2.2.1 Geometria del sistema muonico ad RPC

Gli RPC sono stati scelti dalla collaborazione CMS come rivelatori muonici dedicati per il sistema di trigger: la loro configurazione, la struttura meccanica e la geometria del sistema sono state ottimizzate per ottenere un sistema di trigger completo, efficiente e ridondante. Il sistema muonico ad RPC è stato sviluppato all'interno della struttura del giogo di ritorno del campo magnetico ed è composto, oltre che dagli RPC, destinati al trigger, dalle DT nella zona a bassa pseudorapidità (barrel), e da CSC nella zona a più alto η (endcap), destinate al tracciamento ed alla misurazione dell'impulso trasverso dei muoni. La struttura del barrel, simmetrica rispetto al punto

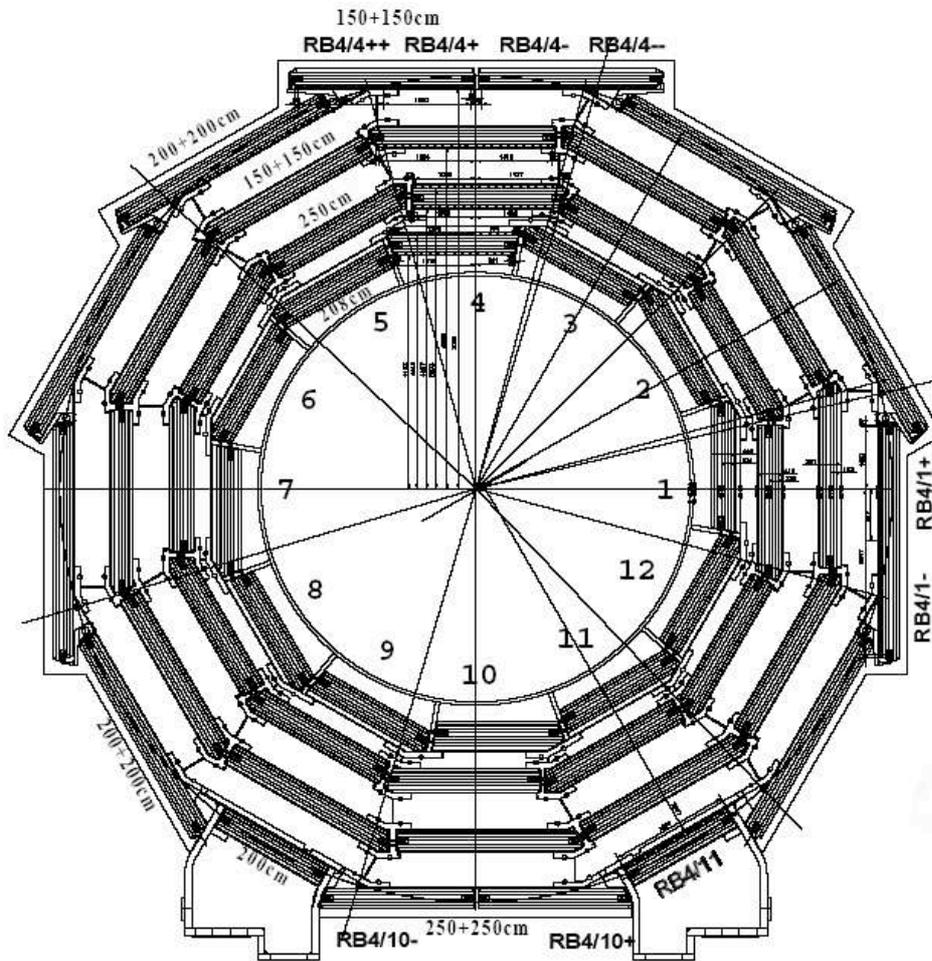


Figura 2.5: Struttura generale degli RPC nel barrel

d'interazione, è suddivisa in cinque ruote di ferro di forma dodecagonale; lo schema delle camere a muoni, seguendo questa struttura, si sviluppa su 12 settori, numerati in senso antiorario partendo da $\phi=0$ (fig.2.5). Ogni settore è composto da quattro stazioni muoniche (RB1-RB4) costituite da RPC e DT: di queste soltanto le prime due conterranno due camere RPC (in-out) fra i quali è frapposta la camera a DT secondo lo schema proposto in figura 2.2 (b), mentre RB3 e RB4 conterranno un'unica camera RPC. Ogni RPC nelle camere RB3 e RB4 è suddiviso in due parti rispetto a ϕ (+, -), mentre le stazioni RB4/4 e RB4/10 di ogni ruota presentano un'ulteriore suddivisione

in quattro parti ($++$, $+$, $-$, $--$) nella direzione di ϕ . Il numero totale di RPC presenti nel barrel è pari a 480 in grado di coprire una superficie totale di 2400 m².

Ognuno dei due endcap è costituito da 4 stazioni (ME1-ME4) di RPC, per un totale di 540 camere; ogni stazione ha forma trapezoidale ed è disposta all'interno di anelli composti da 18 o 36 camere concentriche con la linea del fascio. La prima stazione è composta da tre anelli di camere, mentre le altre stazioni sono suddivise in soli due anelli seguendo la geometria delle CSC (fig.2.3).

2.2.2 Principi di funzionamento

Formazione e sviluppo della valanga

Il principio di funzionamento di un RPC si basa sull'interazione della particella con il gas. Una particella relativistica carica, attraversando il gas, subisce una perdita di energia per interazione Coulombiana causando sia l'eccitazione sia la ionizzazione del mezzo; l'andamento della perdita di energia per unità di lunghezza segue la ben nota formula di Bethe Bloch:

$$-\frac{dE}{dx} = D\rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e \gamma^2 c^2 \beta^2}{\bar{I}} \right) - \eta \right] \quad (2.1)$$

con

$$D = \frac{4\pi N_A}{m_e c^2} = 0.307 \text{ MeV cm}^2 \text{ g}^{-1} \quad (2.2)$$

dove

- N_A è il numero di Avogadro e m_e la massa dell'elettrone;
- ρ, Z e A sono la densità, il numero atomico e il peso atomico del mezzo attraversato;
- z è la carica e βc la velocità della particella incidente;
- $\gamma = \left(\sqrt{1 - \beta^2} \right)^{-1}$;
- \bar{I} è il potenziale medio del mezzo¹;

¹una stima sperimentale del valore per $Z > 20$ è $I/Z \sim 10 \text{ eV}$

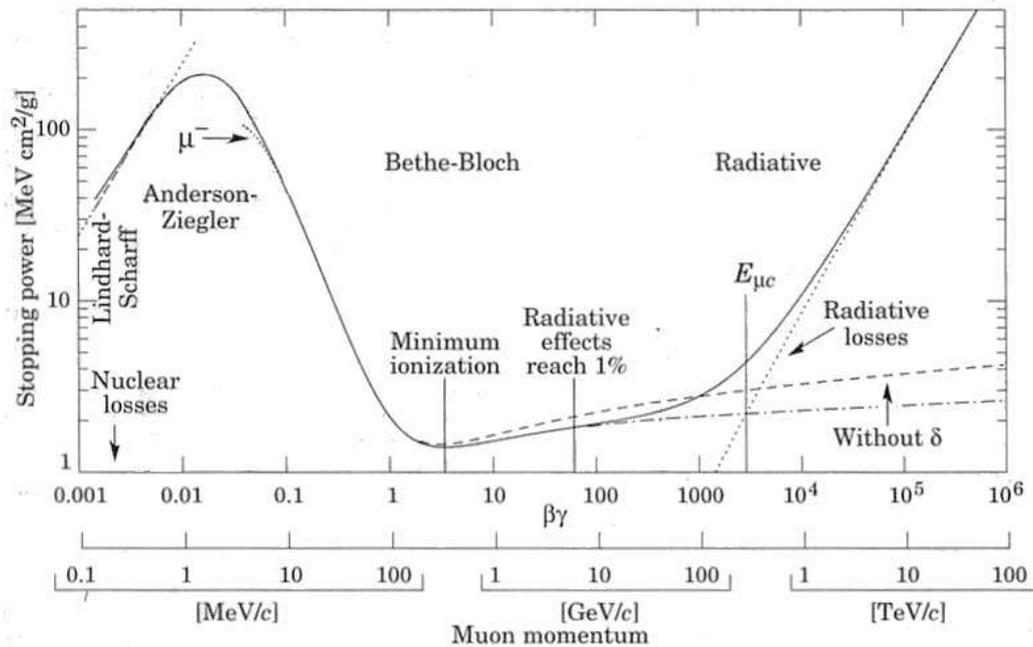


Figura 2.6: Andamento della perdita di energia per unità di lunghezza (Formula di Bethe Block)

- η è un parametro di densità.

L'andamento tipico della curva è descritto in figura 2.6 dove si può notare che prima della salita relativistica dove domina il fattore logaritmico, la curva presenta un minimo di ionizzazione per $\beta\gamma \sim 4$ compreso tra 1-2 MeV/g cm⁻².

Lungo la traiettoria della particella l'interazione col mezzo porta alla formazione di coppie primarie, ione - elettrone ($X + q \rightarrow X^+ + q + e^-$); gli elettroni generati dalla ionizzazione primaria a loro volta, se posseggono un'energia maggiore del minimo di ionizzazione del gas, possono portare alla creazione di nuove coppie (ionizzazione secondaria) all'interno del gas. Il numero di ionizzazioni primarie, all'interno di un dato materiale e di specificato spessore, segue una distribuzione di tipo Poissoniano completamente determinata noto il cammino medio di ionizzazione della particella (λ); quindi per una particella al minimo di ionizzazione, il numero di coppie prodotte per unità di lunghezza sarà pari a $n_p = 1/\lambda$. Il valore che otteniamo dal rivelatore è

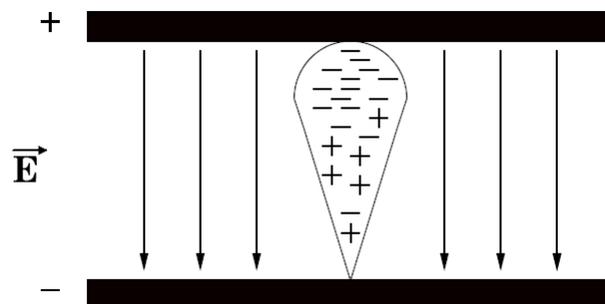


Figura 2.7: Forma della valanga in un RPC dovuta alla maggiore mobilità degli e

il numero totale (n_T) di coppie create, ottenuto come somma della ionizzazione primaria e secondaria, definito come il rapporto tra l'energia lasciata all'interno del gas dalla particella incidente (ΔE) e l'energia media necessaria alla creazione di una coppia (W_i); tale parametro per un gas come l'Argo con potenziale di estrazione (W_i) pari a 26 eV è di circa 94 coppie/cm. Per limitare i fenomeni di ricombinazione e per ottenere un effetto di amplificazione della ionizzazione primaria, si fornisce agli elettroni formati con la ionizzazione dall'esterno un'energia sufficiente a creare nuove coppie ione - elettrone, causando un moto di deriva degli elettroni formati. Tutto ciò può esser fatto mediante l'applicazione di un campo elettrico uniforme, intenso ($\sim 50\text{kV/cm}$), all'estremità del volume di gas; tale campo permette agli elettroni di raggiungere velocemente un'energia superiore alla soglia di ionizzazione dando così luogo alla formazione della valanga. La distribuzione delle cariche generata dall'applicazione del campo sarà infatti fortemente asimmetrica a causa della differente velocità di deriva degli ioni e elettroni ($v_d/v_e \sim 10^3$); ciò crea la tipica forma a valanga in cui la distribuzione delle cariche negative si addensa verso il anodo, mentre quella positiva (degli ioni) in coda (fig. 2.7).

L'evoluzione della valanga può essere descritta utilizzando il primo coefficiente di Townsend (α), legato al numero di elettroni prodotti (N_0) lungo

la traiettoria della particella da:

$$dn = N_0 \alpha dx \quad (2.3)$$

per cui il numero di elettroni prodotti lungo lo spazio Δx sarà:

$$N(x) = N_0 e^{\alpha \Delta x} \quad (2.4)$$

Il primo coefficiente di Townsend, legato al cammino libero medio della particella nel gas ($\alpha = 1/\lambda$), dipenderà dai parametri di funzionamento del mezzo attivo secondo la seguente legge (approssimazione di Korff [21]):

$$\frac{\alpha}{p} = A e^{-\frac{Bp}{E}} \quad (2.5)$$

con A e B costanti dipendenti dal tipo di gas, mentre p ed E sono rispettivamente la pressione nel gas ed il campo elettrico in esso applicato.

L'evoluzione della valanga non dipende solo dal valore di α , ma anche da effetti di ricombinazione e^- - ione⁺ e da eventuali fenomeni di cattura elettronica, da parte di atomi neutri, che tendono a ridurre le dimensioni della valanga; la stima di questi effetti è definita mediante il parametro β , coefficiente di attaccamento, il cui peso è particolarmente rilevante qualora la miscela fosse composta anche da gas elettronegativi. Il guadagno effettivo A, dato dal rapporto fra la carica finale sviluppata con la valanga e la carica indotta dalla particella, dipenderà da entrambi i fattori secondo il seguente andamento:

$$A = \frac{N(x)}{N_0} = \exp \int_{x_0}^x \eta(x) dx \quad \eta = \alpha - \beta \quad (2.6)$$

Il valore dell'amplificazione può essere corretto tenendo in considerazione il contributo degli elettroni liberati dai fotoni ultravioletti nella diseccitazione degli atomi interessati da collisioni. Per evitare tale fenomeno, nella miscela gassosa vengono usati gas in grado di assorbire i fotoni ultravioletti senza subire ionizzazione (gas di "quenching").

Generazione dello streamer

Il guadagno è un utile parametro per selezionare il regime di operatività del rivelatore e definire il limite di separazione fra i diversi regimi di funziona-

mento selezionabile tramite opportune scelte di gas e tensione. L'evoluzione della carica prodotta in funzione del campo elettrico segue un andamento esponenziale, così come visto nella teoria di Townsend, nella regione di tipo proporzionale in cui l'ampiezza è proporzionale alla ionizzazione primaria; a tensioni più alte si osserva la presenza di una regione di transizione tra la valanga e lo streamer, regione caratterizzata dalla saturazione dell'impulso proporzionale, in cui il gas si presenta localmente allo stato di plasma. Dopo tale limite, fissato per valori di A corrispondente a $\alpha g \simeq 20$ (condizione di Reather ??), dove g è lo spessore della gap, l'ampiezza del segnale non dipende più dalla differenza di potenziale e si sviluppa la presenza di un impulso di streamer ritardato rispetto a quello proporzionale, e di ampiezza anche 100 volte maggiore. Le condizioni sperimentali, in particolare il flusso di particelle da rivelare, faranno optare tra il regime proporzionale (impulsi bassi, alti flussi) o streamer (impulsi alti, bassi flussi).

Formazione del segnale indotto

L'informazione sviluppata in seguito al passaggio della particella all'interno del rivelatore viene letta sotto forma di variazione di tensione sugli elettrodi e trasmessa alle strip dei piani di lettura per accoppiamento capacitivo. L'uso di piatti ad alta resistività, non consentendo la dispersione della carica sull'intera superficie, limita la regione della scarica ad una piccola porzione di superficie, consentendo al rivelatore di essere contemporaneamente attivo al passaggio di ulteriori particelle; il suo comportamento può essere quindi schematizzato come una matrice di celle di rivelazione indipendenti la cui unità base è la cella di scarica. Il modello elettrico di tali celle è descritto in fig.2.8 in cui l'intero sistema è visto come due capacitori posti in serie. In questa descrizione, \mathbf{C} e \mathbf{R} sono rispettivamente la capacità e la resistenza della bakelite, mentre \mathbf{C}_{gas} e \mathbf{R}_{gas} quelli della porzione di gap interessata al passaggio della particella. In assenza di ionizzazione, la resistenza della gap è infinita e la tensione è interamente applicata alla capacità della gap di gas. Quando una particella ionizzante attraversa la superficie del rivelatore, il suo effetto sulla cella di scarica è di produrre un flusso di corrente costante \mathbf{I}_g che scarica la capacità equivalente del gas \mathbf{C}_{gas} trasferendo la tensione appli-

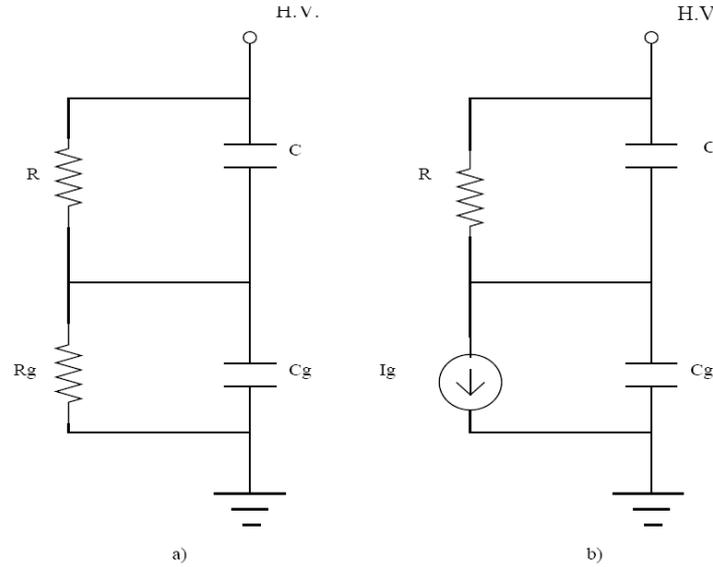


Figura 2.8: Schema elettrico equivalente di una cella di scarica

cata ai suoi capi sulla capacità degli elettrodi (fig.2.8 b). Dalla risoluzione del circuito equivalente si può ricavare una stima del tempo caratteristico τ entro il quale il sistema ritornerà nelle condizioni iniziali .

$$\tau = R(C + C_{gas}) = \rho\epsilon_0 \left(\epsilon_r + 2\frac{d}{g} \right) \quad (2.7)$$

dove g è la dimensione della gap, ϵ_r è la costante dielettrica e d è lo spessore dei piatti di bakelite.

Per $\epsilon_r \cong 5$, e se si assume il valore di $5 \times 10^{10} \Omega\text{cm}$ per la resistività della bakelite, il valore di $\tau \sim 31$ ms. Tale intervallo temporale, confrontato col tempo di durata della scarica all'interno della regione interessata (tipicamente dell'ordine di qualche ns) , risulta decisamente più alto; ciò implica che durante il tempo di scarica gli elettrodi si comportano come isolanti impedendo la riformazione della valanga e inibendo l'evoluzione di un nuovo processo. Supponendo che il rivelatore possa schematizzarsi come l'insieme di piccoli elementi indipendenti, posti in parallelo, e che ciascuna cella si scarichi completamente dopo il passaggio della particella rilevata, si può stimare l'estensione \mathbf{S} della cella elementare di scarica partendo dal valore della

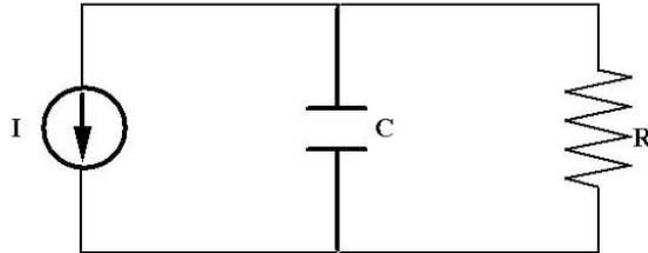


Figura 2.9: Schema elettrico equivalente di un elettrodo di pick-up

carica raccolta Q attraverso la seguente formula:

$$S = \frac{Qd}{\varepsilon_0 V} = \frac{Cd}{\varepsilon_0} \quad (2.8)$$

dove d è lo spessore della gap, V è la tensione inizialmente applicata agli elettrodi e C è la loro capacità. Il valore della carica Q è tipicamente ~ 1 pC in avalanche mode e ~ 100 pC in streamer: nei due casi si ha quindi una $S_{avalanche} = 2 \text{ cm}^2$ e $S_{streamer} = 200 \text{ cm}^2$.

La scelta di un piccolo valore di Q comporta migliorie sia per la riduzione della superficie della cella di scarica, con aumento del massimo flusso rivelabile, sia per limitare gli effetti di deterioramento del rivelatore nel tempo.

La corrente così prodotta induce sulle strip di lettura un segnale proporzionale alla carica generata. Le strip si comportano come linee di trasmissione con impedenza caratteristica dipendente dalle caratteristiche geometriche e costruttive. Il comportamento elettrico degli elettrodi di prelievo può essere descritto dal circuito equivalente in fig. 2.9 in cui un generatore carica la capacità C equivalente degli elettrodi in parallelo alla loro resistenza R verso massa. La costante di tempo del circuito sarà quindi:

$$\tau = RC = \frac{Z}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d} \quad (2.9)$$

dove Z è l'impedenza caratteristica della strip, S è la superficie della cella interessata e d è lo spessore della bakelite. Il valore di S è di $\sim 2 \text{ cm}^2$ per $C \simeq 1 \text{ pF}$, mentre l'impedenza caratteristica della strip, trattata come una

Efficienza	$> 95\%$
Risoluzione temporale	$\leq 3\text{ns}$ (98% in Δt)
Grandezza media del cluster	≤ 2.5 strips
Noise Rate	≤ 10 Hz/cm ₂
Corrente oscura	< 10 μA
‡ Streamers	$< 10\%$

Tabella 2.1: Requirements di CMS per gli RPC

linea di trasmissione, è di $\sim 50 \Omega$; ciò comporta un valore di τ di ~ 50 ps, molto più piccolo del tempo di salita del segnale indotto, evitando in questo modo integrazioni o distorsioni del segnale in corrente.

2.2.3 Caratteristiche strutturali degli RPC di CMS

Gli RPC di CMS sono stati sviluppati per garantire alte prestazioni in un ambiente con elevati flussi di particelle incidenti; ottima risoluzione temporale, grandezza dei cluster limitata, un'elevata efficienza globale e alto rate sono i principali requirements (tab. 2.1) richiesti per ottenere un sistema di trigger performante.

La struttura base di una camera ad RPC per il Barrel di CMS (fig. 2.10) è formata da due moduli di RPC a doppia gap, Backward (BW) e Forward (FW), di dimensioni variabile a seconda della collocazione, tenuti assieme da un profilo in alluminio. Ogni RPC a doppia gap a sua volta è costituito da due volumi di gas, di spessore di 2 mm, sovrapposti ed inframmezzati da un piano comune di strip per la raccolta del segnale prodotto. Ogni piano di bakelite delle gap ha uno spessore di 2 mm ed una resistività $\rho \sim 2-3 \times 10^{10} \Omega\text{cm}$; la superficie interna della gap è inoltre trattata con una miscela di olio di lino e pentano in grado di ridurre le rugosità della superficie che potrebbero creare irregolarità nel campo e di assorbire parte dei fotoni ultravioletti che potrebbero estrarre elettroni dalla bakelite. Un reticolo di distanziatori di policarbonato (2 mm di spessore, 8 mm di diametro, resistività volumetrica $\rho \geq 10^{13} \Omega \text{ cm}$, 100 in 1 m²), posto all'interno della gap ed incollati tra le lastre di bakelite, fissa lo spessore della gap ed evita la formazione di sagitte e deformazioni della struttura volume del gas che renderebbero il

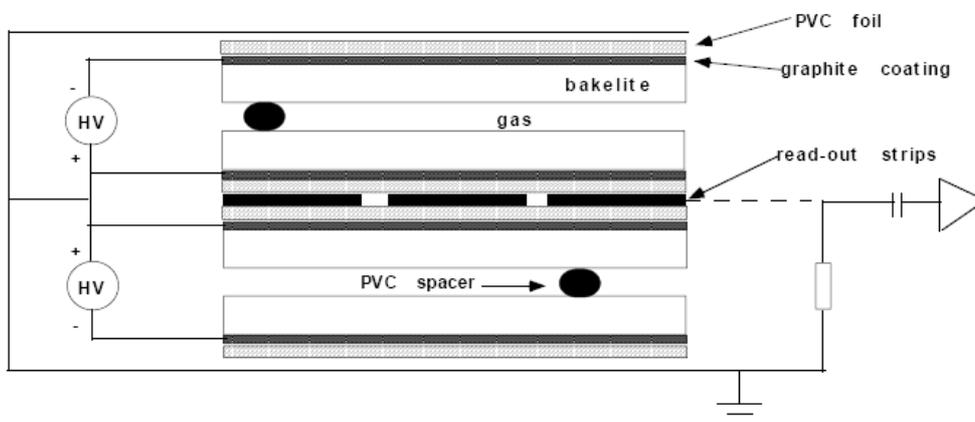


Figura 2.10: Schema strutturale di un RPC di CMS

campo elettrico non uniforme. L'utilizzo di tali dischi produce una zona morta all'interno del rivelatore di $\sim 1\%$. Lo stesso materiale è utilizzato per chiudere i bordi della gap, assicurando in tal modo la tenuta di gas del rivelatore. Le strip di read-out, di larghezza di variabile (20 a 40 mm a seconda della posizione) distanziate 2 mm l'una dall'altra, sono lunghe 1.3 m con un ritardo medio di propagazione del segnale pari a ~ 5.5 ns/m. Avendo il segnale indotto un tempo di salita (~ 1 ns) minore del ritardo di propagazione, è possibile schematizzare il suo comportamento come una linea di trasmissione con resistenza caratteristica variabile tra 15 e 40 Ω e capacità pari a ~ 160 pF; tale linea è terminata ad un estremo con una resistenza con valore nominale pari alla resistenza caratteristica di linea e all'altro capo con lo stadio di ingresso di un preamplificatore con resistenza d'ingresso dello stesso valore per limitare eventuali distorsioni o riflessioni del segnale. L'intera struttura è racchiusa all'interno di una struttura metallica che funge da gabbia di Faraday che assicura il disaccoppiamento elettrico dall'ambiente esterno.

Regime di funzionamento

Una delle richieste primarie per gli RPC di tutti gli esperimenti ad LHC è quella di sostenere alti flussi di particelle incidenti (un incrocio dei fasci ogni 25 ns) senza un deterioramento delle prestazioni. Per tale motivo tutti gli RPC di CMS, sia quelli dell'endcap che quelli del barrel, operano in regime di valanga proporzionale. Infatti gli RPC in regime di streamer, pur producendo segnali d'intensità superiore rispetto alla configurazione avalanche (100 mV rispetto a 2-3 mV), a causa della maggiore carica prodotta, presentano tempi morti superiori rendendoli inefficienti a flussi più elevati, 10Hz/cm² in streamer rispetto a 1kHz/cm² in avalanche. La scelta del regime di funzionamento impone una serie di richieste su tutti i componenti del rivelatore da ottimizzare per stabilizzare il punto di lavoro.

Caratteristiche degli elettrodi

Uno dei parametri cruciali da cui dipendono le prestazioni degli RPC operanti ad alti flussi è la resistività di volume della bakelite. L'uso di materiale a bassa resistività consente di migliorare il rate dell'RPC (fig. 2.11) in quanto permette di ridurre la costante di tempo di ricarica degli elettrodi ($\tau = \varepsilon_0(\varepsilon_r + 2)\rho$); allo stesso tempo l'aumento della conduttività degli elettrodi comporta maggiore corrente oscura, maggiore dissipazione e rumore nel segnale con caduta di tensione V_d attraverso la bakelite e quindi con riduzione del campo elettrico applicato alla gap. Tali effetti possono essere minimizzati scegliendo un opportuno valore per la resistività [23] [24] considerando la seguente legge che regola l'andamento della caduta di tensione attraverso le due lastre di bakelite:

$$V_d = 2Q_e\phi s\rho \quad (2.10)$$

dove s è lo spessore dell'elettrodo, ϕ è il rate e Q è la carica media di ciascun impulso legato ad una particella incidente. Assumendo un valore di Q di ~ 25 pC e $\phi = 1$ kHz/cm², un valore di ρ di $1 - 2 \cdot 10^{10}$ Ω cm², si limita V_d ad una caduta di 10-20 Volt che può essere trascurata. Il valore della resistività della bakelite dipende anche dai parametri ambientali; l'andamento della

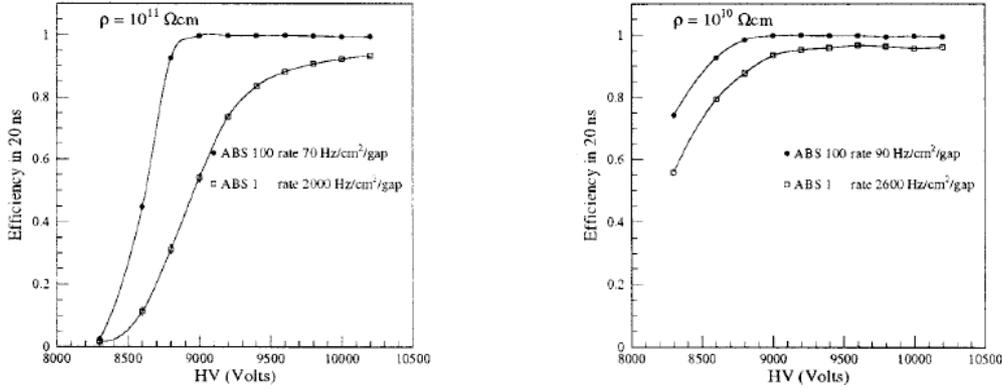


Figura 2.11: Confronto dell'efficienza di due camere con diversa resistività

resistività in funzione della temperatura è del tipo:

$$\rho = \rho_{20} e^{(20-T)/7.8}$$

dove T è la temperatura misurata in gradi Celsius e 7.8 è un parametro costante ottenuta da test dedicati[29]. Se da un lato è stato dimostrato [22] che nell'intervallo di operatività degli RPC nell'ambiente in cui opera CMS ($21 \div 23$ °C) il valore della resistività rimane pressoché costante, questo dipende fortemente dalle variazioni d'umidità dell'ambiente. Per limitare tale effetto è stato scelto di stabilizzare il valore dell'umidità dell'ambiente aggiungendo una frazione ($\sim 2.8\%$) di vapore acqueo all'interno della miscela gassosa. Le caratteristiche ambientali hanno un notevole impatto anche sul valore effettivo del campo elettrico generato all'interno della gap da cui dipende il regime di funzionamento; il valore del campo elettrico applicato alla gap dipenderà dalla temperatura e dalla pressione secondo la seguente legge:

$$HV_{eff} = HV_{app} \frac{P_0}{P} \frac{T}{T_0}$$

dove T_0 (293°) e P_0 (1010 mbar) sono i valori di riferimento.

Caratteristiche dei piani di lettura

L'uso degli RPC per l'identificazione e la misurazione della traccia dei muoni impone caratteristiche stringenti sulla capacità di risoluzione spaziale del

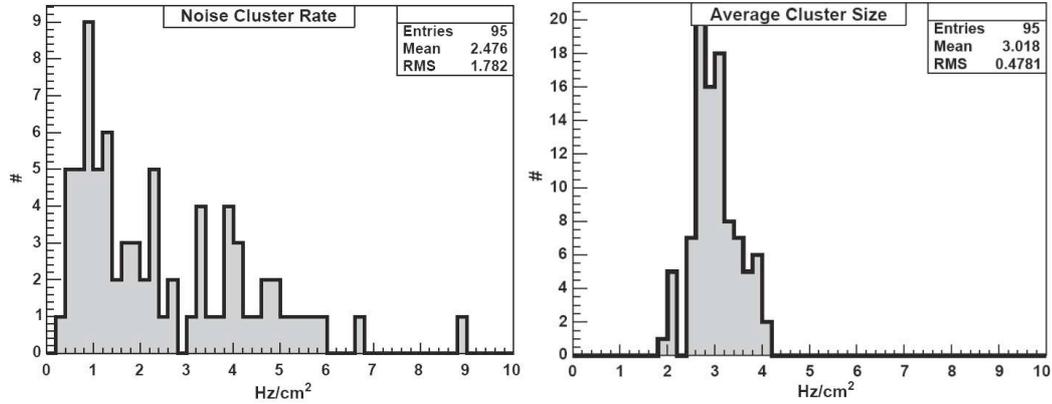


Figura 2.12: Spettro a gap singola per gap di differente spessore

rivelatore; il sistema di raccolta del segnale è sviluppato negli RPC tramite strip di alluminio che corrono, nel barrel, parallelamente al fascio (z) e, nell'endcap, radialmente. Per assicurare granularità al sistema e una precisa misurazione di ϕ da cui dipende la risoluzione del momento trasverso, il valore richiesto per la risoluzione spaziale degli RPC di CMS è di $\Delta\phi \cdot \Delta\eta = 5/16^\circ \cdot 0.1$ che corrisponde a circa 2-3 cm di spessore delle strip nelle stazioni più interne del barrel e quindi a circa 96 strip per camera. Il passaggio di una particella all'interno del rivelatore induce il segnale su più strip adiacenti all'interno della finestra di trigger formando un cluster; il punto d'impatto della particella verrà stimato utilizzando la strip centrale del cluster. Per migliorare la risoluzione spaziale è necessario ridurre la grandezza del cluster sia limitando il fenomeno del cross-talk fra strip adiacenti sia controllando il noise rate, definito come il numero di strip accese al di fuori della finestra temporale di trigger. Tale parametro è stato accuratamente misurato [28] in diverse condizioni presentando un valore medio pari a 2.4 Hz/cm² (fig. 2.12) in accordo con i requisiti imposti da CMS (< 10 Hz/cm²).

Elettronica di front-end

Le caratteristiche dell'elettronica di front-end [26] sviluppata per acquisire le informazioni dai piani di lettura sono legate essenzialmente alle caratteristi-

che del segnale indotto dal passaggio della particella. Il segnale in corrente generato all'interno della gap, per quanto visto nei precedenti paragrafi, ha un andamento esponenziale del tipo

$$i_S(t) = i_0 e^{t/\tau}$$

dove τ , costante di tempo del gas (~ 1 ns alle condizioni nominali di lavoro), è legata alle caratteristiche della miscela di gas mediante il coefficiente effettivo di Townsend ($\tau = 1/\eta v$). Il tempo massimo di durata del segnale così prodotto sarà di circa 13 ns per le gap di CMS, avendo la miscela di gas basata sul freon una velocità di deriva di circa $150 \mu\text{m/ns}$. Il ritardo di propagazione del segnale lungo le strip è dell'ordine di 6 ns/m e dipende dalle caratteristiche geometriche delle strip; per il barrel queste hanno una lunghezza media di circa 1.3 m e una impedenza caratteristica variabile in un intervallo che va da 15 a 40 Ω . L'ampiezza del segnale dipende dalla quantità di carica indotta sulla strip la cui dinamica spazia tipicamente da ~ 20 pC fino a più di 50 pC. L'architettura di ogni canale di front-end è

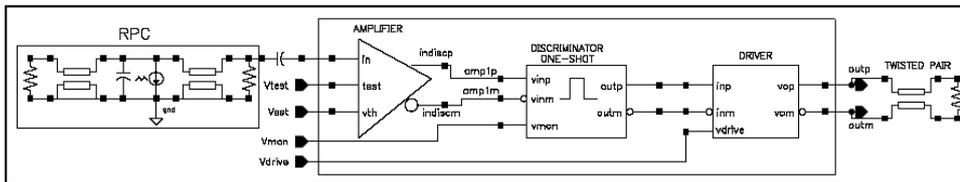


Figura 2.13: Schema a blocchi delle schede di front-end.

composta da una serie di stadi in cascata: come si evince dal diagramma a blocchi in figura 2.13, lo stadio iniziale è sviluppato da un preamplificatore a cui è collegato in serie un discriminatore monostabile e uno driver come stadio d'uscita. Il primo elemento è costituito da uno stadio d'ingresso a transconduttanza con impedenza d'ingresso pari all'impedenza caratteristica della linea ; ciò consente di preservare le caratteristiche del segnale evitando riflessioni e distorsioni dello stesso nei limiti imposti dall'ampia dinamica del segnale d'ingresso. Lo stadio successivo è costituito da un integratore (discriminatore a zero-crossing) che genera il segnale di trigger in relazione

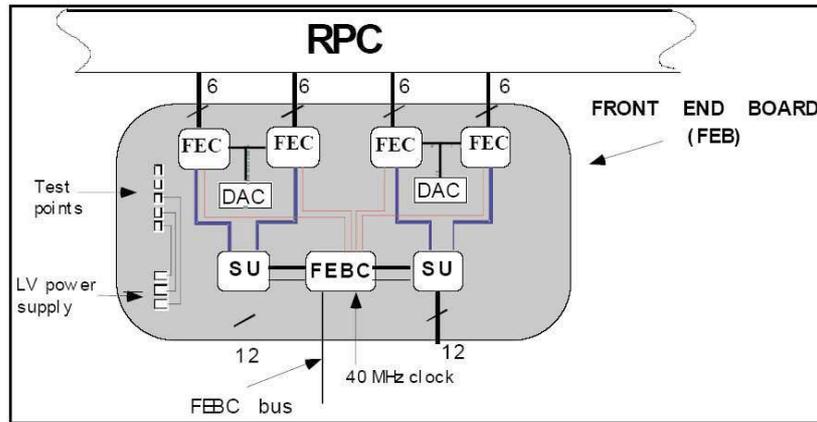


Figura 2.14: Schema di una Front End Board.

al fronte di salita del segnale introducendo un primo polo dominante a 20 MHz; la successiva frequenza di taglio è impostata dal preamplificatore con valori dell'ordine di 100-200 MHz. Le caratteristiche in frequenza del circuito così sviluppato non ledono la bontà del segnale raccolto, comportando tagli di componenti dello spettro in frequenza del segnale trascurabili (valori di coda corrispondenti a ~ 30 ns). Tale circuito di discriminazione è sviluppato attraverso due stadi di amplificatori differenziali in cascata, con un valore di soglia impostabile mediante controllo di tensione esterno che spazia da 5 a 500 fC. La sensibilità di carica ottenibile è di 1.6 mV/fC con un rumore di carica equivalente (ENC) limitato a valori minori di 1.7 fC. Lo stadio successivo è costituito da un circuito monostabile che forma il segnale con periodo tipicamente dell'ordine di 100 ns prevenendo così lo sviluppo di un eventuale segnale di trigger dovuto ad impulsi ritardati che in generale si sviluppano negli RPC in modalità avalanche dopo circa poche decine di ns. La scelta dell'intervallo temporale di tale impulso è ottimizzata per mascherare tale impulso e allo stesso tempo limitare il tempo morto di rivelazione. Lo stadio in uscita successivo al one-shot è un driver con uscita differenziale che consente di adattare il segnale a 250 mV su 100 Ω per i cavi twister-pair, così come richiesto dallo standard LVDS. La potenza dissipata dai quattro stadi in cascata è limitata a valori pari a 19 mW. Tale struttura è integrata

all'interno delle schede di front-end (FEB) poste direttamente su ogni camera (4 FEB per ogni camera) e contenenti 24 canali di elettronica ognuna, così come descritto in figura 2.14. Ogni frontend chip (FEC), di dimensioni $10 \times 10 \times 2 \text{ mm}^3$ e composto da 64 pin, è stato sviluppato usando una tecnologia semicustom bipolare della Maxim. Ogni FEC contiene al 6 blocchi amplificatore/discriminatore/driver per ottimizzare l'uso delle risorse interne del chip e per gestire facilmente le interconnessioni con le singole strip. Per ogni chip sono inoltre previsti due pin per ogni tre canali che consentono di inviare segnali di test e fissare la soglia di discriminazione. Ogni chip lavora con valori di tensione di +3V e -2V, dissipando una quantità di potenza per canale pari a 30 mW. Oltre ai 4 FEC all'interno di ogni FEB sono integrati ulteriori componenti per il controllo e la sincronizzazione dei segnali. Ogni FEB contiene:

- 4 FEC per un totale di 24 canali
- 2 unità di sincronizzazione (SU)
- 2 DAC per settare le soglie
- un Frontend Board Controller (FEBC).

L'unità di sincronizzazione (SU) immagazzina i dati provenienti dalle uscite di ogni singola FEC sincronizzandoli in relazione al corretto bunch cross. Le FEBC gestiscono il funzionamento dell'intera scheda e la comunicazione con l'esterno; i principali compiti sono:

- immagazzina e distribuisce le soglie per le FEC gestendo appositi DAC posti all'interno della scheda
- controlla il corretto funzionamento inviando segnali di test ad ogni singola FEC
- definisce le proprietà temporali delle SU inviandoli il corretto segnale di clock
- legge le informazioni in uscita delle SU
- gestisce la comunicazione in uscita dalla FEB

La doppia gap

La scelta di CMS di utilizzare una configurazione a doppia gap per le camere ad RPC permette di ottenere importanti miglieorie sia sull'efficienza totale della camera sia sulle caratteristiche del segnale prodotto sulle strip di read-out. Una delle caratteristiche più stringenti richieste agli RPC di CMS è un valore di efficienza maggiore del 90% per tutto il periodo di funzionamento (~ 10 anni); la configurazione a doppia gap consente di diminuire i fattori d'inefficienza causati sia dalla presenza di zone morte dovute agli spaziatori ($\sim 1\%$), sia dalla probabilità non nulla che il passaggio di una particella carica non porti alla formazione di una coppia e quindi di un segnale rilevabile. Il comportamento di formazione della valanga segue infatti una distribuzione di tipo Poissoniano del tipo:

$$P(m) = \frac{\bar{n}^m e^{-\bar{n}}}{m!}$$

dove m rappresenta il numero di coppie elettrone-ione prodotte ed \bar{n} rappresenta il valor medio di coppie elettrone-ione prodotte per la miscela di gas usata. Di conseguenza l'efficienza del rivelatore all'interno di una singola gap sarà pari a :

$$\varepsilon_{\text{det}} = 1 - P(0) = 1 - e^{-\bar{n}}$$

L'utilizzo della struttura a doppia gap consente di diminuire l'inefficienza totale della camera in quanto i contributi d'inefficienza delle singole gap contribuiscono all'efficienza totale della camera secondo la seguente legge:

$$\varepsilon_{\text{det}} = 1 - (1 - \varepsilon_{sg})(1 - \varepsilon_{sg})$$

Il valore di \bar{n} per la miscela utilizzata da CMS comporta una inefficienza statistica di ogni singola gap di circa il 3%: di conseguenza il valore di efficienza totale della bigap risulterà essere pari a circa 99%. Inoltre la decisione di operare in regime di valanga proporzionale penalizza l'informazione contenuta nel segnale avendo la valanga prodotta un'amplificazione minore; la configurazione a doppia gap consente di migliorare l'efficienza del rivelatore aumentando il segnale raccolto dalle strip. Infatti essendo il piano di lettura frapposto tra le due gap il passaggio della particella ionizzante interesserà

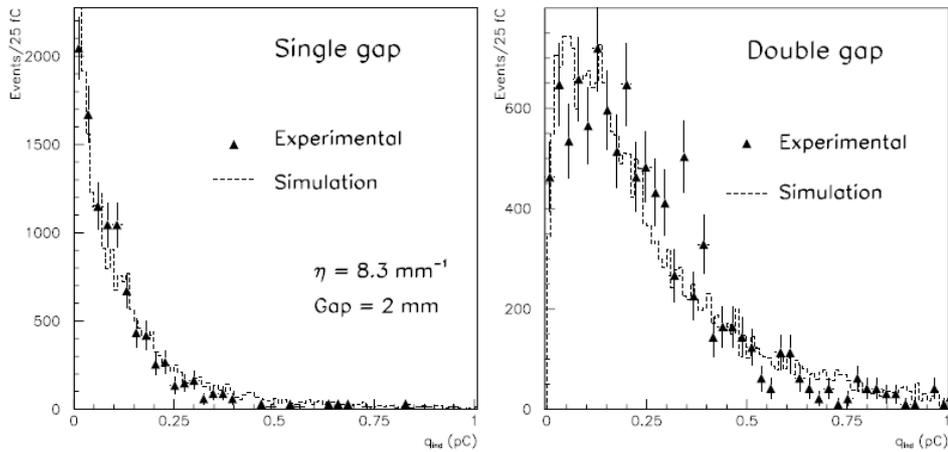


Figura 2.15: Distribuzione di carica per un RPC a singola e doppia gap.

entrambe le gap creando una quantità di carica di drift in entrambe le gap. La carica indotta sulla strip risulta quindi la somma dei segnali prodotti da entrambe le gap e la distribuzione di carica prodotta risulta essere la convoluzione delle distribuzioni di carica di due identiche gap singole. L'andamento di tale distribuzione è descritto in fig. 2.15 in cui si può notare come l'utilizzo della doppia gap oltre nell'ampiezza del segnale presenti un comportamento meno critico per bassi valori di carica migliorando l'efficienza in tale regione di bassa amplificazione con minore probabilità di streamer.

La larghezza della gap

La larghezza della gap influisce in maniera determinante sulla risoluzione temporale del rivelatore. La risoluzione temporale in un RPC, non è legata al tempo di transito della particelle primarie nella gap, ma dipende dal numero di cluster primari per evento, elettroni per cluster e fluttuazioni statistiche dei processi coinvolti nella generazione del segnale; tutte queste quantità possono variare evento per evento. Uno studio della variazione della σ_t [25], risoluzione temporale, in relazione alla tipologia di RPC scelto (a gap singola e doppia) e allo spessore della gap, consente di trarre utili informazioni per le scelte costruttive. Come si può dedurre dalla figura 2.16,

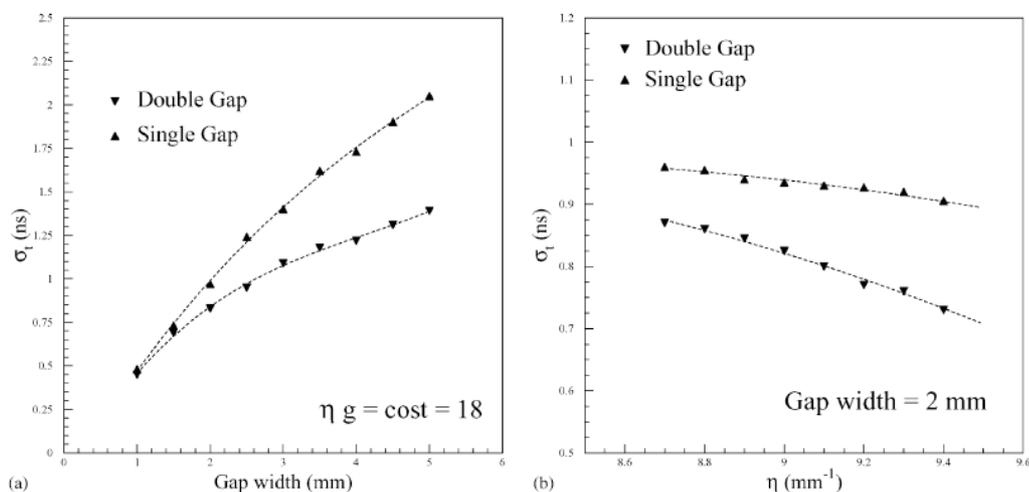


Figura 2.16: Risoluzione temporale per RPC a gap singola e doppia

fissando prima l'amplificazione ($G = \eta g$) e in seguito lo spessore della gap, la migliore risoluzione è ottenuta riducendo la grandezza della gap incrementando la tensione operativa e aumentando il numero di gap. Naturalmente la possibilità di incrementare la risoluzione temporale è limitata dagli effetti che tali parametri hanno sul funzionamento globale del rivelatore; un aumento eccessivo della tensione di lavoro infatti potrebbe portare il rivelatore a lavorare in streamer mode, mentre ridurre oltre un certo limite lo spessore della gap è svantaggioso in quanto riduce il numero di elettroni primari prodotti e, conseguentemente, l'efficienza.

Miscela gas

Un ruolo importante nelle caratteristiche di funzionamento e di operatività del rivelatore riveste la scelta della miscela di gas sia per l'amplificazione della valanga che per la probabilità di streamer. La composizione della miscela di gas scelta per gli RPC di CMS è : tetrafluoroetano (Freon $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$ al 96.2%), isobutano($(\text{CH}_3)_3\text{CH}$ al 3.5%) e di esafluoro di zolfo (SF_6 al 0.3%) . Il tetrafluoroetano agisce come target per le particelle ionizzanti: la scelta di tale tipo di gas è giustificata dal fatto che, a parità di campo elettrico e pressione, l'alto valore del primo coefficiente di Townsend α assicura un

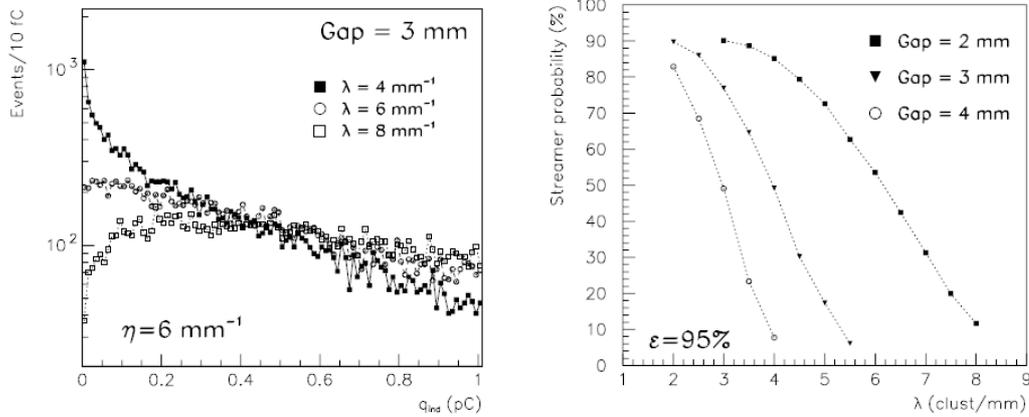


Figura 2.17: Dipendenza della distribuzione di carica da λ

guadagno dell'ordine di 10^4 - 10^5 . Altra caratteristica di tale tipo di gas è la non infiammabilità e il costo contenuto.

Un parametro fondamentale che caratterizza la miscela di gas è la densità di cluster (λ), numero di cluster primari /unità di lunghezza prodotti da una particella ionizzante; il comportamento dello spettro di carica e della probabilità di streamer in funzione di tale parametro è sottolineata in fig. 2.17. Come si può vedere in figura, la distribuzione di carica cambia, allargandosi, all'aumentare di λ ; il numero di cluster primari prodotti aumenta all'aumentare di λ , incrementando la carica media indotta. Per tale motivo è stato scelto il Freon ($\lambda \approx 5.5 \text{ mm}^{-1}$) piuttosto che l'Argon ($\lambda \approx 2.5 \text{ mm}^{-1}$) come elemento principale (95%) per la miscela di gas di tutte le camere di CMS.

Per poter raggiungere guadagni maggiori senza entrare in regime di scarica si mescola al Freon l'isobutano e l'esafioruro di zolfo in grado di smorzare il processo di scarica agendo da quenching. Il primo è un gas organico costituito da una molecola complessa in grado di assorbire i fotoni ultravioletti risultanti dai processi di ricombinazione; tutto ciò è possibile grazie alla sua struttura caratterizzata da un alto numero di livelli vibrazionali e rotazionali attraverso i quali riesce a dissipare l'energia acquisita senza indurre la formazione di una nuova valanga. L'aggiunta di una piccola percentuale di

un gas elettronegativo (SF_6) ha una duplice importanza [27]: in primo luogo è in grado di controllare la quantità di carica libera all'interno del gas catturando gli elettroni liberati al catodo e limitando la formazione dello streamer all'interno della gap, e dall'altra diminuisce sensibilmente la grandezza dei cluster ad alti rate migliorando la risoluzione spaziale del rivelatore.

2.3 Il trigger di primo livello dei muoni

Il sistema di trigger per muoni, integrato nel livello L1 della struttura generale del trigger di CMS, ha il compito di identificare i muoni, ricostruire la loro posizione e il loro momento trasverso risalendo al bunch crossing in cui sono stati generati. Il funzionamento incrociato dei rivelatori a DT, CSC ed RPC, grazie all'ottima risoluzione spaziale dai primi due e all'eccellente risoluzione temporale assicurata dagli ultimi, consente di coprire un'area pari a $\eta=2.4$ ottenendo un sistema complementare, robusto, altamente efficiente e con una buona reiezione degli eventi di fondo. La massima frequenza di output possibile dipende dalla luminosità di lavoro di LHC: alla massima luminosità ($10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) l'input rate richiesto dall'HLT è 100 kHz che, tenendo in considerazione un margine di sicurezza di un fattore tre dovuto a possibili errori di stima delle sezioni d'urto o di variazioni di luminosità, è ridotto a 30 kHz, da suddividere tra calorimetro e sistema muonico. Solo 5-10 kHz di banda sarà assegnata al sistema muonico richiedendo un fattore di reiezione pari a $\sim 10^{-5}$.

I possibili modi di produzione di muoni nell'interazione protone-protone sono:

- Decadimento di oggetti pesanti (W, Z, top, higgs, etc.).
- Decadimento di quark b e c .
- Decadimento di adroni composti da quark u, d e s (principalmente π e K).
- Punch-through di getto adronico.

I muoni dei primi due tipi, definiti *prompt*, sono prodotti molto vicini al vertice d'interazione; di questi solo quelli ad alto impulso trasverso riescono

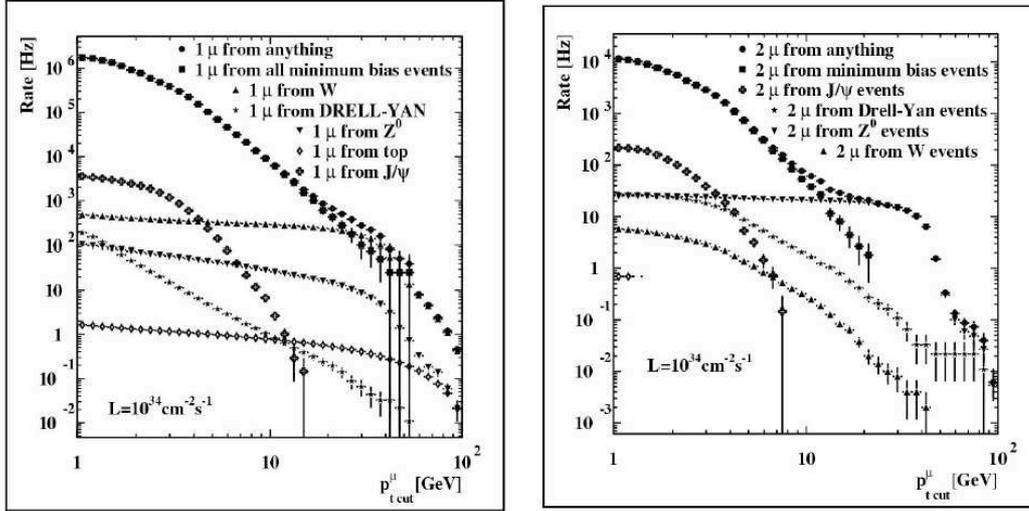


Figura 2.18: Frequenze attese di eventi ad uno (sx) e a due (dx) muoni nello stato finale alla massima luminosità

ad essere rilevati e rappresentano signature di canali di interesse fisico. I restanti muoni a basso momento trasverso, assieme a quelli provenienti sia dai raggi cosmici sia dall'interazione con gli elementi costituenti di LHC (*beam halo muon*, costituiscono il segnale di fondo a cui il sistema di trigger deve far fronte. Le relative frequenze di produzione attese, visualizzate in figura 2.18 per eventi a uno e due muoni, permettono di scegliere il giusto valore di p_T^{cut} come compromesso tra l'efficienza e il rate massimo di eventi del LV1 trigger. Come si evince dalla figura, il valore massimo possibile di p_T^{cut} è circa 100 GeV oltre il quale l'efficienza del segnale di vari oggetti pesanti (ad es. W e Z) è fortemente degradata. La scelta del limite inferiore è operata in relazione alla banda disponibile per il trigger muonico: assumendo che il sistema di trigger debba selezionare eventi ad una frequenza massima di 15 kHz, è necessaria una soglia almeno pari a 20 GeV nel caso di muoni singoli, mentre per gli eventi a due muoni è possibile raggiungere frequenze di lavoro di ~ 1 kHz già per p_T di 5 GeV, che corrisponde all'impulso minimo dei muoni che riescono a raggiungere il barrel.

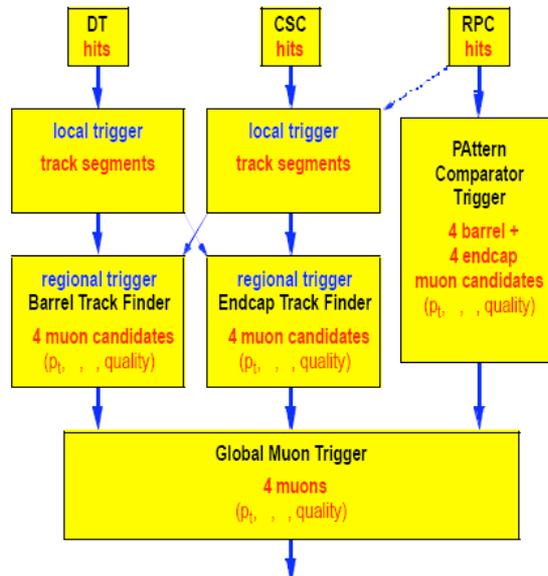


Figura 2.19: Struttura schematica del sistema di trigger per muoni

2.3.1 Struttura del L1 Trigger

L'architettura del sistema muonico del trigger, descritta in figura 2.19, si sviluppa attorno al GMT (*Global Muon Trigger*) che ricostruisce l'informazione finale da mandare al Global Trigger attraverso le informazioni provenienti dai singoli sistemi di trigger regionali. L'informazione da inviare al GMT è ricostruita in passi differenti dai singoli sistemi di trigger. Per le DT e le CSC, le informazioni di ogni camera è inizialmente processata da sistemi locali che ricostruiscono il segmento di traccia; i segmenti ricostruiti da stazioni differenti vengono successivamente collegati fra loro dai sistemi di trigger regionale (Regional Track Finders) che formano la traccia totale dei muoni e ne identificano il relativo momento trasverso. L'informazione così ottenuta viene mandata al GMT assieme ad una serie di bit che ne indicano la qualità della ricostruzione. L'identificazione univoca delle tracce sviluppate nella zona di sovrapposizione tra differenti tipi di rivelatori è assicurata grazie a collegamenti incrociati fra i differenti Track Finder preservando il sistema da ricostruzioni fantasma.

A differenza dei precedenti il sistema di trigger ad RPC non presenta una ricostruzione locale degli eventi, ma le informazioni provenienti da tutti gli RPC sono mandate al PACT (Pattern Comparator Trigger), il cui compito è di ricostruire le caratteristiche dell'evento attraverso la comparazione del percorso misurato con un set di percorsi predefiniti memorizzati in una look-up table. L'algoritmo di identificazione dei muoni ricerca la coincidenza spaziale e temporale degli hit in quattro stazioni e ne assegna l'evento in caso di almeno tre coincidenze su quattro con un differente valore di qualità (qualità 3 nel caso 4/4, 2 per coincidenza 3/4 senza il piano 3 o 4, 1 (0) senza il piano 1 (2)); nel barrel, dove sono presenti sei stazioni, la ricerca è sviluppata indipendentemente per i muoni a basso p_T , nelle stazioni MB1-MB2, e per i muoni ad alto p_T utilizzando un layer per ogni stazione. Il GMT riceve quindi 4 candidati dai DT, 4 dalle CSC e ne cerca la corrispondenza spaziale rispetto a η e ϕ con 4+4 ricevuti dagli RPC: in caso di esito positivo il GMT invia al Trigger globale di CMS le quattro migliori tracce, di tutto il rivelatore, per ciascun evento. La selezione delle tracce da inviare al trigger global avviene sia se un evento è visto da entrambi i sottosistemi (RPC e DT/CSC), senza vincoli di qualità (AND logico), sia se è rilevato da un unico sottosistema ma con alta qualità (OR logico); ciò consente di avere contemporaneamente un'elevata efficienza e una buona reiezione del fondo. Al fine di stabilire la presenza di un muone rivelato all'interno di un *jet*, il GMT riceve informazione anche dal trigger del calorimetro attraverso due bit: quiet bit e MIP bit. Il primo indica la presenza di zone ad alto rilascio di energia, mentre il secondo indica il passaggio di una particella con un'energia comparabile col minimo di ionizzazione di un muone.

Capitolo 3

Sistema on-line di controllo e di monitoraggio di CMS

Le caratteristiche costruttive di CMS descritte nei precedenti paragrafi hanno messo in luce la complessità della struttura di CMS e l'enorme mole di informazioni che produrrà durante il suo funzionamento. Tali informazioni verranno raccolte attraverso milioni di canali di dati fisici alla frequenza di BX generando per ognuno di essi una quantità di dati pari a 1 MB, corrispondente a $\sim 100\text{Gb/s}$. Di fondamentale importanza risulta quindi sviluppare un sistema online in grado di gestire il flusso dati in tali condizioni operative, di assicurare l'effettiva qualità delle informazioni raccolte e di provvedere alla loro archiviazione: tale compito sarà implementato in CMS attraverso il funzionamento cooperativo del sistema di acquisizione dati (DAQ) e dai due sistemi di trigger (L1 e HLT). Naturalmente la complessità di un sistema di questo tipo, l'alto numero di elementi che lo compongono e le caratteristiche intrinseche degli ambienti in cui lavorano comportano la necessità di sviluppare, in parallelo ai sistemi di acquisizione dati, un sistema di controllo distribuito che garantisca un sicuro e coerente funzionamento dell'intero apparato. La struttura e la complessità dell'architettura di un sistema di questo tipo impone un approccio distribuito nello sviluppo della rete di controlli sia da un punto di vista geografico che funzionale; la redistribuzione delle risorse e delle funzionalità consente di far fronte all'eterogeneità degli elementi che costituiscono la rete, alla diversa collocazione dei componenti da gestire ed alla richiesta di un sistema robusto, ridondante e performante. Tutte le in-

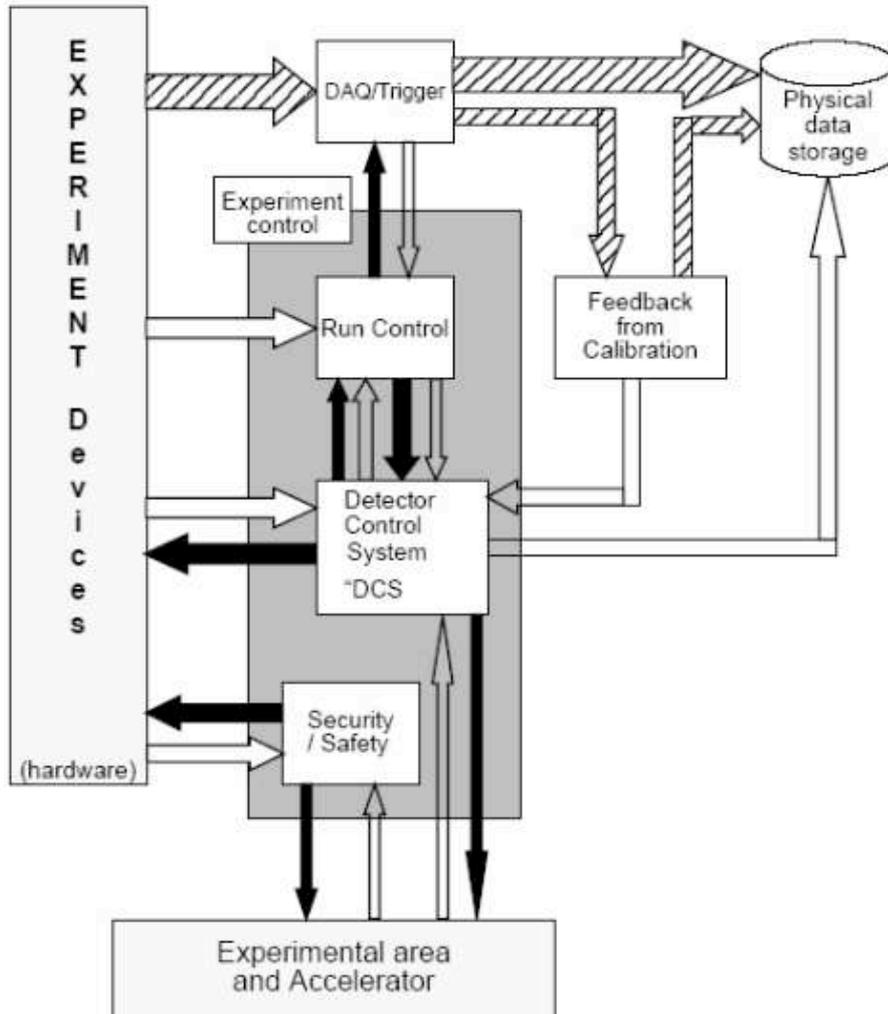


Figura 3.1: Architettura del sistema di controllo e interfacciamento con il DAQ

frastrutture che costituiscono il DAQ sono gestite attraverso un pacchetto di “software-online” e comunicano tra di loro all’interno di un ambiente software, sviluppato con un approccio middleware, che consenta la trasmissione, il controllo e l’implementazione delle singole procedure operative assicurando un uniforme, flessibile ed efficiente meccanismo di accesso all’hardware ed ai servizi di sistema (fig. 3.2).

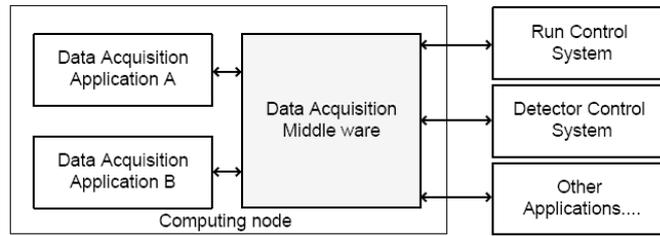


Figura 3.2: Schema del software online in un nodo e dell'interfaccia con i sistemi esterni

3.1 DAQ: il Sistema di Acquisizione Dati

Un ruolo importante nella progettazione del rivelatore CMS riveste il sistema di acquisizione dati (DAQ) che rappresenta il primo posto in cui si analizza l'informazione completa ottenuta in seguito alla collisione. Compito del DAQ è di leggere i dati provenienti dall'elettronica di front-end dell'intero sistema, assemblare le informazioni relative ad ogni BX in un'unica struttura per la selezione da parte dell'HLT, trasmettere le informazioni accettate alla fitta rete di servizi online che provvederanno, tra i vari compiti, all'archiviazione dell'evento. Oltre a tali finalità, un altro aspetto cruciale del sistema del DAQ consiste nel controllo e nel monitoraggio di tutti gli elementi che compongono il rivelatore in modo da garantire una corretta operatività e l'alta qualità dei dati acquisiti. Tali caratteristiche vengono sviluppate nei seguenti blocchi funzionali in cui è possibile suddividere l'intera architettura del sistema (fig.3.3):

1. **Detector front-end e Readout system:** è formato dai moduli relativi ai singoli sottomoduli in cui vengono immagazzinati i dati acquisiti dall'elettronica di front-end ed accettati in seguito alla ricezione del segnale proveniente del LV1 trigger.
2. **Builder Network:** la rete di collegamenti che gestiscono la trasmissione dei dati tra i moduli di readout e il sistema di selezione.
3. **Filter System:** è formata dalla rete di processori che eseguono gli

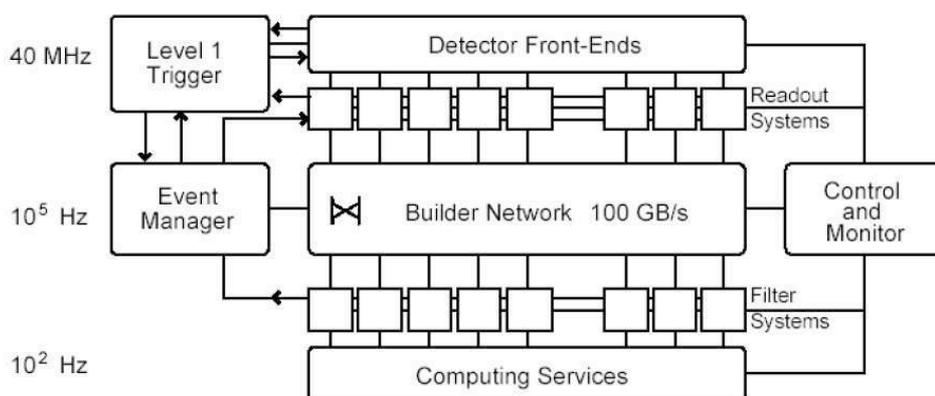


Figura 3.3: Architettura del sistema di DAQ di CMS.

algoritmi di selezione degli eventi dell'HLT per produrre l'informazione da immagazzinare sui dispositivi di massa.

4. **Event Manager:** la struttura responsabile del controllo del flusso dei dati del DAQ.
5. **Computing Service:** è costituito dalla rete di processori e di interconnessioni responsabile dell'acquisizione online e offline degli eventi accettati dal HLT.
6. **Controls:** la struttura adibita al controllo e al monitoraggio del funzionamento dei singoli moduli del HLT e dell'intera struttura dei sottorivelatori di CMS.

Un ruolo importante nell'architettura del DAQ è rivestito dalla rete di controllo e monitoraggio sviluppata in CMS in tre livelli distinti. Il livello più basso è implementato attraverso una serie di FEC, Front-end Controller, il cui compito è di controllare e monitorare il comportamento dei singoli moduli di front-end. I livelli superiori sono sviluppati attraverso il DCS, Detector Control System, e l'RCMS, Run Control and Monitor System, che gestiscono il sistema di configurazione, controllo e monitoraggio di tutti gli

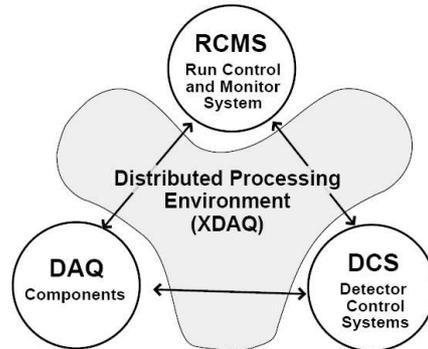


Figura 3.4: Architettura del software online di CMS.

elementi che costituiscono rispettivamente il rivelatore e il sistema di DAQ stesso.

La gestione delle risorse e la comunicazione fra i singoli componenti del DAQ (fig.3.4) è gestita attraverso un framework appositamente sviluppato per tale scopo da CMS: il XDAQ. Il XDAQ [32] è un ambiente sviluppato per lo gestione di un sistema di acquisizione distribuito composto da componenti standard industriali, protocolli di comunicazione aperti e da un set completo di librerie; scritto completamente in C++ e sviluppato in modo da essere indipendente dalla piattaforma operativa, tale framework offre le seguenti funzionalità:

- consente la comunicazione asincrona tra componenti appartenenti sia alla stessa unità di elaborazione sia tra processi di unità differenti all'interno del sistema distribuito, assicurando la corretta interoperatività indipendentemente dal protocollo usato. Tutto ciò è sviluppato attraverso delle speciali applicazioni, i *peer transport*, che sfruttano le potenzialità di protocolli unicast e multicast, quali TCP/IP e SOAP (Simple Object Access Protocol)[33], e di formati per i dati di tipo I₂O [34]e XML [35].
- permette l'accesso, il controllo e la configurazione di tutti i parametri applicativi di ogni singolo nodo del sistema, definisce l'architettura della

rete e ne controlla il corretto funzionamento attraverso un'interfaccia grafica che ne facilita l'utilizzo.

- assicura la robustezza, la scabilità, la portabilità e la flessibilità della rete ed un'efficiente gestione della memoria di tipo "buffer loaning" che permette l'ottimizzazione delle risorse.

3.2 Run Control

La complessità del sistema di DAQ e la serie di funzionalità e finalità che esso ricopre impone lo sviluppo di un ambiente di lavoro in grado di interfacciare l'utente col sistema e facilitarne le normali attività di accesso, controllo e configurazione durante la presa dati; a tale scopo è stato sviluppato l'RCMS (Run Control and Monitor System), composto da una serie di componenti hardware e software, che rappresenta un "centro di calcolo virtuale" attraverso il quale gestire tutte le funzionalità del DAQ. I principali compiti dell'RCMS sono:

- fornire un'interfaccia grafica che consenta all'utente di gestire tutte le operazioni per l'acquisizione dei dati durante la fase di presa dati.
- controllare e monitorare col supporto del DCS il corretto e sicuro funzionamento dell'esperimento CMS,
- controllare e monitorare il corretto funzionamento del sistema di acquisizione e del trigger,
- offrire un'interfaccia utente per la gestione e l'accesso al sistema, sviluppare una serie di informazioni di controllo sullo stato operativo del sistema (statistiche, errori, warning, informazioni di debug).

L'RCMS rappresenta l'elemento principale nella gestione della struttura globale del DAQ composta da circa $O(10^4)$ oggetti; una struttura di tale spessore impone un approccio gerarchico, scalare e partizionato nella progettazione e nell'organizzazione della rete di controllo. Per tale motivo l'intera

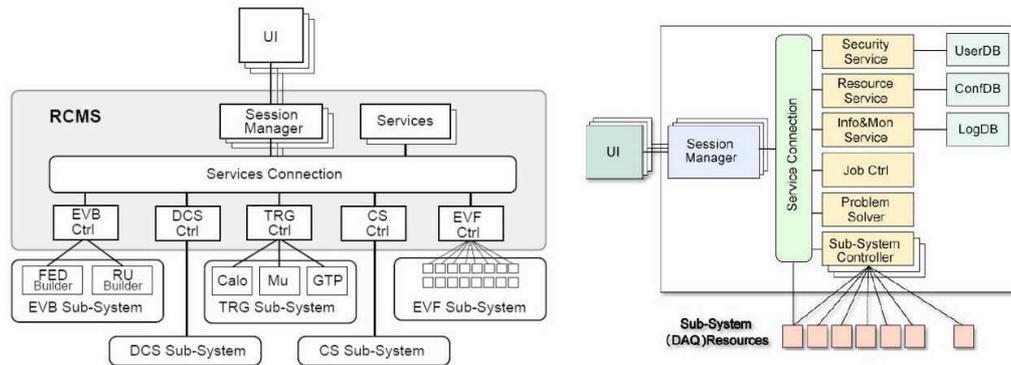


Figura 3.5: Session Manager e Sottosistemi definiti nel RCMS.

struttura dell'esperimento è sviluppata dal RCMS come una serie di partizioni, costituite da un gruppo di risorse come mostrato in fig.3.5. Più partizioni possono essere attive contemporaneamente, scambiare risorse fra loro consentendo il funzionamento di diverse sessioni di lavoro indipendentemente. Il funzionamento di una partizione è definito come una "sessione", a cui è associata un Session Manager (SMR) che coordina le attività di accesso ai singoli sottoelementi, la trasmissione delle informazioni e dei comandi ai singoli Sub-System Controllers (SSC). La comunicazione con le risorse avviene mediante sessioni di lavoro sviluppate tramite delle Function Manager (FM), che ricevono le richieste dai relativi SMR e trasformano questi in una serie di comandi per le risorse, consentendo di sviluppare l'intero sistema come una macchina a stati finiti (fig.3.6). Le singole partizioni saranno definite da uno stato del sistema e risponderanno ai comandi delle FM, sviluppati tramite messaggi SOAP, variando il loro stato e trasmettendo un messaggio di acknowledge. Di particolare importanza nella progettazione dell'architettura del sistema è l'interconnessione tra l'RCMS e il DCS; in seguito a tale prerogativa sono state sviluppate due soluzioni differenti [31] che prevedono un ruolo diverso del DCS all'interno del RCMS. Nella prima configurazione (fig.3.6(a)) ogni sottorivelatore DCS è incluso esclusivamente nella struttura gerarchica del DCS: in tal modo ogni singolo sottoelemento è gestito completamente dalla sistema centrale che rappresenta l'unico elemento di comunicazione col

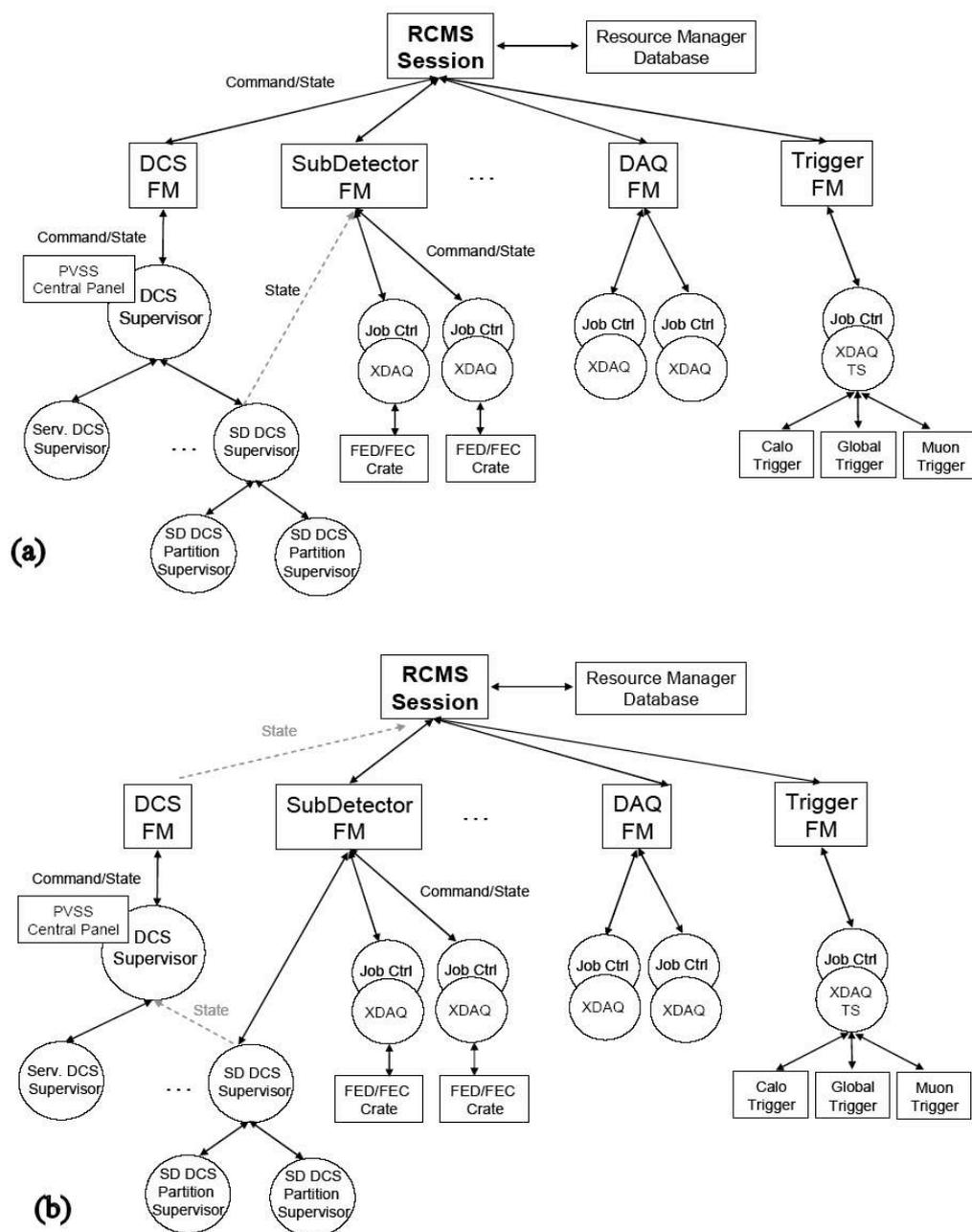


Figura 3.6: Configurazioni possibili DCS-RCMS: a) versione con i sottotelementi del DCS integrati nella gerarchia totale del DCS; b) versione con i sottotelementi inclusi nella struttura dei sottorivelatori.

RCMS. Nella seconda configurazione il DCS di ogni sottorivelatore è integrato della struttura stessa del rivelatore ed è gestita non più dal sistema centrale del DCS che potrà avere soltanto informazioni sul relativo stato, ma da SubDetector Function Manager come gli altri elementi del relativo sottorivelatore. Tale versione permette una più stretta integrazione dei componenti di readout del sottorivelatore con le attività del DCS.

L'RCMS è costituito da una serie di servizi supplementari per la gestione delle risorse dell'intero sistema. I singoli elementi, schematizzati in figura 3.5, sono:

- Security Service: gestisce le attività di accesso ai servizi, l'autenticazione e le autorizzazioni alle infrastrutture di archiviazione.
- Resource Service: gestisce l'accesso alle configurazioni e ai relativi database di ogni singola partizione.
- Information and Monitor Service: raccoglie tutte le informazioni e i messaggi provenienti dal DAQ e dai componenti del RCMS e le immagazzina negli appositi database (LogbB), attribuendo loro informazioni ausiliari sul tipo, sulla priorità di errore e sulla data in cui si è presentato.
- Job Control: controlla e monitora l'evoluzione dei processi di tutti i componenti durante la presa dati.
- Problem Solver: struttura adibita all'identificazione dei possibili malfunzionamenti del sistema e alla determinazione delle possibili procedure di risoluzione dell'errore.

3.3 DCS: Detector Control System

I principali scopi del Detector Control System sono di garantire un corretto e sicuro funzionamento dell'apparato sperimentale per assicurare la qualità dell'informazione raccolta e di offrire un'omogenea interfaccia a tutti i sottorivelatori e alle infrastrutture che compongono l'esperimento. Il compito del DCS consiste nel monitorare continuamente tutti i parametri operativi, controllare i segnali generati da un possibile comportamento anomalo e sviluppare automaticamente azioni e procedure per prevenire e risolvere eventuali malfunzionamenti dell'apparato.

Dagli esperimenti LEP a quelli di LHC e quindi negli ultimi 15 anni, i sistemi di DCS si sono evoluti molto velocemente, nel tentativo di inseguire il progredire degli apparati e della loro elettronica, fino ad avere tutte le caratteristiche di un vero e proprio sistema online di acquisizione dati da milioni di canali anche se logicamente con richieste inferiori in termini di prestazioni e di mole di dati da gestire ed archiviare. In questo periodo di rapida evoluzione dei DCS vanno sicuramente menzionati alcuni cambiamenti fondamentali che hanno completamente modificato la loro fisionomia; come il passaggio da sistemi d'acquisizione basati sul bus CAMAC e sulla schede ISA a quelli basati sul bus VME e sulle schede PCI, come la scelta di abbandonare quasi del tutto la trasmissione dati su linee seriali del tipo RS232 per passare a linee seriali veloci (USB) ed all'uso di protocolli seriali commerciali ed altamente affidabili come il CANbus ed il ProfiBus, come la necessità di progettare sistemi SCADA capaci di gestire milioni di canali e come la necessità di usare sistemi di archiviazione dati (database) che fossero in grado di gestire un flusso di dati sempre più crescenti fino alle centinaia di MB all'ora previste per gli esperimenti LHC. L'evoluzione dei sistemi SCADA è avvenuta ancora più rapidamente del previsto a causa dell'enorme sviluppo di tutto il mondo del software relativo al mondo del WEB che fino ad una quindicina di anni fa era quasi del tutto inesistente. Basti pensare che nell'esperimento BaBar, iniziato intorno al 1995, il sistema dei DCS fu progettato sulla base di un software SCADA, chiamato EPICS, e sviluppato a Berkeley per il mondo della fisica delle particelle elementari, mentre oggi i DCS di CMS si basano

su di un software commerciale PVSS e su di una serie di pacchetti software ampiamente usati in campi completamente diversi.

Ogni sottoelemento del rivelatore è interfacciato col DCS che si fa carico di controllare tutte le azioni impostate dall'operatore esterno e di monitorare eventuali errori, messaggi di attenzione e allarmi. Il DCS deve inoltre farsi carico del monitoraggio dei parametri ambientali dell'esperimento e della comunicazione con il DAQ e con i sistemi di controllo esterni dell'acceleratore LHC, del magnete e del DSS (Detector Control System). Molte delle funzionalità richieste al DCS devono essere assicurate in qualsiasi condizione operativa del rivelatore per tutta la durata dell'esperimento, imponendo la scelta di soluzioni all'avanguardia e di tecnologie sempre più spinte.

3.3.1 Requisiti del DCS

L'alto numero dei componenti, la complessità del progetto e le stringenti caratteristiche ambientali impongono una serie di richieste alla progettazione del DCS per il raggiungimento degli obiettivi del sistema.

Richieste essenziali nella progettazione del DCS di CMS sono:

Modularità Tale caratteristica è assicurata attraverso una struttura gerarchica del DCS dove ogni singolo sottoblocco, sia hardware che software, è in grado di operare indipendentemente e sviluppa le proprie funzionalità all'interno della struttura globale del DCS.

Partizionabilità Tale richiesta è fondamentale per sviluppare controlli sui singoli sottorivelatori indipendentemente e per permettere, allo stesso tempo, facilmente l'integrazione dei singoli componenti fra di loro all'interno del sistema globale.

Automaticità Tale caratteristica consente di velocizzare le operazioni da effettuare e di prevenire eventuali errori umani nelle azioni ripetitive.

Facilità d'utilizzo Il sistema deve poter essere utilizzato da qualsiasi utente non esperto per le normali procedure operative.

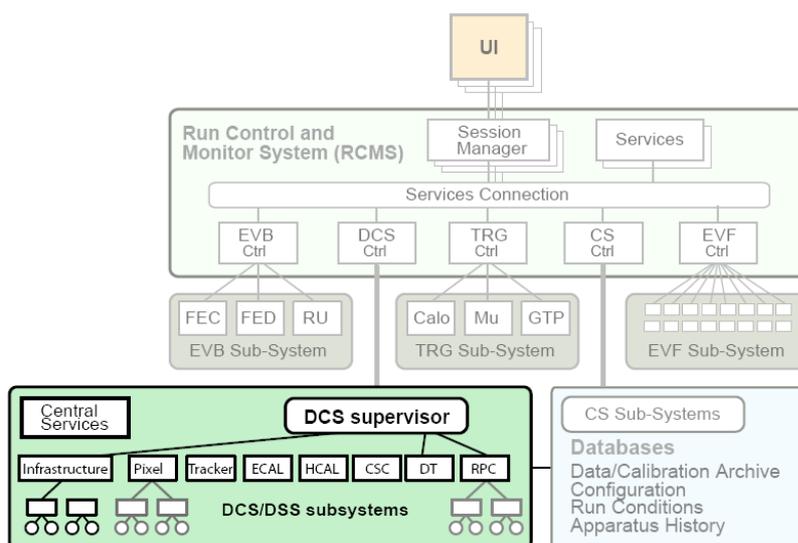


Figura 3.7: Integrazione del DCS nel sistema online.

Omogeneità La durata dell'esperimento e l'alto numero di apparecchiature utilizzate impongono la scelta per tale finalità di componenti commerciali e di standard industriali nella progettazione del sistema comportando migliorie sia nella progettazione che nella manutenzione della struttura.

Tolleranza alle radiazioni L'ambiente operativo del rivelatore è un ambiente fortemente radioattivo, con livelli variabili a seconda della distanza dal punto di interazione da 1 a 100 kGy/anno. Tale caratteristica influisce notevolmente sulla scelta dei componenti hardware che compongono il DCS e sulla loro collocazione all'interno della struttura.

Scalabilità Il sistema deve essere facilmente integrabile con nuovi componenti e facilmente interfacciabile con le strutture esterne quali ad esempio l'RCMS e l'acceleratore.

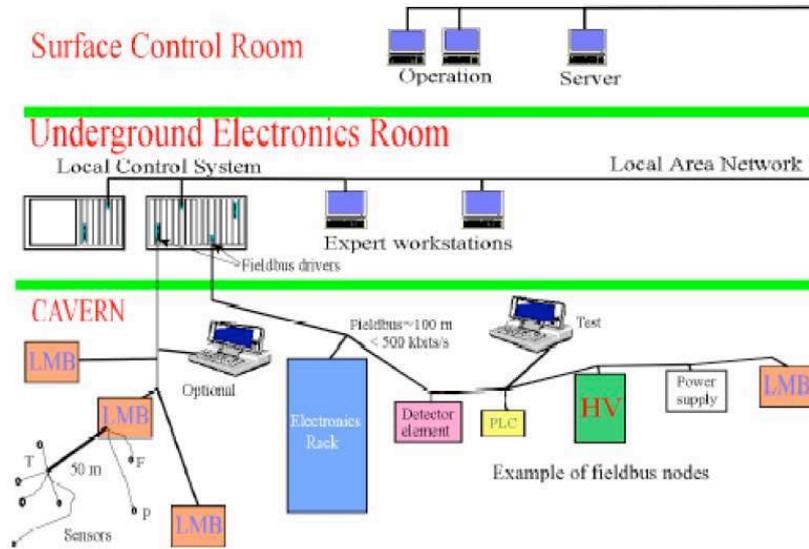


Figura 3.8: Architettura generale del DCS.

3.3.2 Architettura del DCS

L'architettura del DCS e le tecnologie usate per implementarla sono state scelte in relazione alle caratteristiche funzionali e ambientali dell'esperimento; infatti l'alto livello di radiazione presente nelle vicinanze dell'esperimento e l'intensità del campo magnetico impongono di sviluppare in sistema su 3 livelli geografici distinti come mostrato in figura 3.8. La struttura del DCS è composta da un sistema di controllo distribuito (SCADA) e da una serie di elementi di front-end collocati lungo tutta la struttura del rivelatore. Il sistema di front-end è costituito da un'ampia varietà di componenti, dai semplici elementi quali sensori e attuatori, fino a sistemi di elaborazione più complessi (PLC); la comunicazione con le stazioni SCADA, collocate nel centro di controllo sotterraneo o in superficie in ambiente sicuro, avviene attraverso fieldbus standard. La struttura logica del DCS di CMS è stata sviluppata in maniera gerarchica in cui i DCS locali dei singoli sottosistemi sono connessi tra loro per ottenere una piena integrazione delle parti ed un coerente funzionamento dell'intero sistema. Dal punto di vista dei controlli, il rivelatore è composto da una serie di blocchi funzionali indipendenti organizzati in una

struttura ad albero sviluppata su più livelli (fig. 3.7). Ogni blocco fornisce una rappresentazione del sottorivelatore sviluppabile sia dal punto di vista funzionale, in relazione ai sottosistemi che la compongono (gas, tensioni), che da quello topologico (endcap, barrel). La partizionabilità del sistema così ottenuta consente ai singoli sottosistemi di operare indipendentemente facilitando le operazioni di manutenzione e di sviluppo. Tale organizzazione consente di sviluppare il flusso delle informazioni, sia dati che comandi, verticalmente minimizzando la comunicazione tra sottoelementi e permettendo la gestione dell'intero sistema con un'unica interfaccia utente dal livello superiore. La comunicazione tra il blocco centrale del DCS e i vari sottosistemi deve essere bidirezionale. Le informazioni riguardo lo stato dei differenti sottosistemi devono essere trasmesse al sistema generale che provvederà a definire un quadro generale dello stato dell'intero sottosistema all'utente attraverso un'opportuna interfaccia grafica. Allo stesso modo il sistema deve prevedere la possibilità di inviare una serie di comandi dal livello più alto ai singoli sottosistemi che provvederanno ad interpretarli come azioni da svolgere sugli specifici sottosistemi che rappresentano. La struttura gerarchica del sistema permette la rappresentazione di ogni nodo come una macchina a stati finiti definita attraverso un insieme di stati e dalle possibili transizioni fra questi che facilita l'automatizzazione dei processi.

3.3.3 Il sistema hardware dei DCS

Per quanto visto precedentemente, la strumentazione che compone il DCS è sviluppata geograficamente su tre regioni differenti. La scelta della strumentazione hardware e la relativa collocazione è stata ottimizzata in relazione alle condizioni ambientali che si svilupperanno attorno al rivelatore durante la presa dati. I principali requisiti su cui si basa la scelta dei componenti hardware del DCS sono:

Tolleranza alla radiazione Il livello di radiazione presente all'interno della caverna in cui verrà alloggiato il rivelatore varia di molti ordini di grandezza, da 1 a 10^5 Gy/anno, a seconda della posizione rispetto al punto di interazione del fascio. La radiazione sviluppata è costituita

prevalentemente da neutroni e ciò impone in tale regione l'utilizzo essenzialmente di sensori e attuatori spostando l'ulteriore elettronica di servizio in zone più sicure.

Operatività in campo magnetico Il campo magnetico nella caverna varia sia in intensità che in direzione a seconda della posizione raggiungendo valori fino a qualche centinaia di Gauss. Di conseguenza i componenti elettronici il cui funzionamento si basa su bobine, induttanze, trasformatori e alcuni tipi di convertitori DC/DC non possono essere utilizzati in tale ambiente.

Inaccessibilità della caverna Durante il funzionamento di LHC la caverna in cui è posto il rivelatore non è accessibile, di conseguenza tutti gli interventi di aggiornamento e manutenzione di componenti in loco possono essere sviluppati solo occasionalmente.

Dimensioni dell'apparato La complessità dell'apparato sperimentale comporta un alto numero di terminali di I/O da monitorare e un sistema distribuito di cablaggio ottimizzato in grado di trasmettere le informazioni dal rivelatore alla zona di sicurezza per l'hardware coprendo distanze fino a 200 m.

Durata dell'esperimento L'ampia durata dell'esperimento comporta una serie di possibili interventi di manutenzione sull'apparato; per limitarne il numero e i costi la scelta dei componenti, ove possibile, è stata incentrata prevalentemente su soluzioni standard commerciali.

Sensori e Attuatori

Il set di sensori e attuatori utilizzati sono stati scelti tra le soluzioni standard offerte dal mercato industriale. Questi lavorano prevalentemente in ambiente ostile e sviluppano principalmente i seguenti compiti:

- Misure di Temperatura
- Misure d'umidità

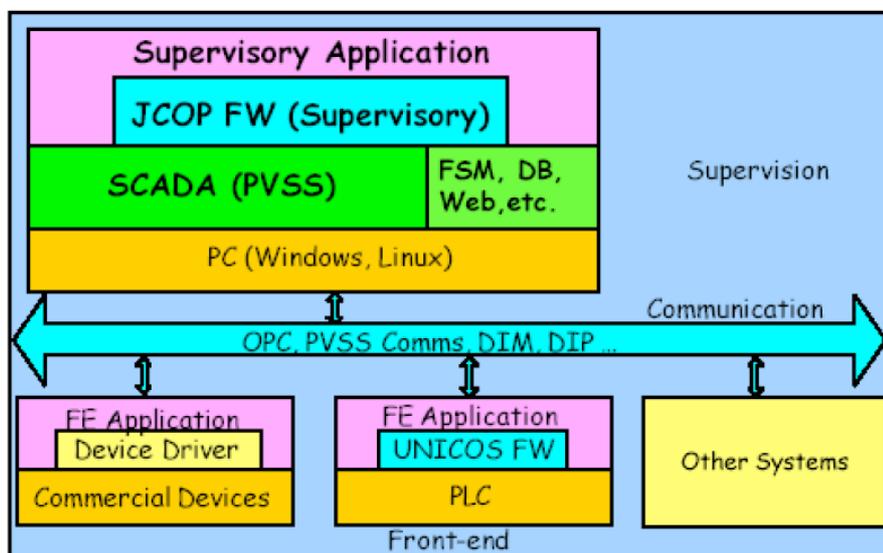


Figura 3.9: Architettura delle risorse del DCS.

- Controllo della strumentazione del gas quali valvole e miscelatori
- Misure di radiazione
- Misure di pressione
- Misure di deformazione

PLC

Le caratteristiche ambientali discusse precedentemente rendono proibitivo l'utilizzo di componenti elettronici complessi per i sistemi di frontend dei vari rivelatori; una soluzione ottimale a tale inconveniente è offerta da semplici unità di elaborazione di front-end di cui le PLC (Programmable Logic Computer) rappresentano lo standard industriale. Tali componenti, per la loro semplicità, flessibilità e attendibilità sono largamente usati nelle applicazioni di controllo e sono stati scelti da LHC per interfacciamento e la comunicazione fra i vari sistemi. Tali elementi sono in grado di gestire l'accesso ai sensori e alle singole device e, quando necessario, svilupparne i controlli locali per le strutture più complesse del DCS; tutto ciò è sviluppato grazie ai molteplici

linguaggi di programmazione standard supportati e grazie alla capacità di gestirne la comunicazione attraverso reti di tipo seriale, fieldbus ed Ethernet.

Fieldbus

Tutti gli esperimenti di LHC hanno scelto come soluzione comune per la trasmissione delle informazioni tra i vari sottoelementi lo standard industriale dei fieldbus. Un fieldbus è un semplice bus multifilare, connesso tra nodi “intelligenti” attraverso un ben definito protocollo. Le soluzioni industriali offerte dai fieldbus sono abbastanza eterogenee e differiscono per banda, per topologia della rete, per lunghezza, robustezza e gestione degli errori. Essi possono dunque essere suddivisi nelle seguenti sottocategorie:

- Bus per sensori, usati per connettere sensori intelligenti alle PLC o alla strumentazione di frontend
- Bus per device, che connettono moduli di I/O alle PC o ai frontend
- Bus complessi, simili allo standard LAN, che gestiscono la comunicazione tra unità complesse come PLC e stazioni di supervisione.

Nei primi due casi la comunicazione è sincrona, mentre nei sistemi più complessi la trasmissione è generalmente asincrona e si sviluppa in seguito a richiesta di attenzione. Essendo uno standard industriale le soluzioni fieldbus sono accompagnate da una serie di supporti industriali sia nell’ambiente hardware (chip dedicati per l’interfacciamento, moduli general-purpose) che nel software (drivers, strumenti di diagnostica e di amministrazione). La scelta di CMS, integrata all’interno di una scelta comune per tutti e quattro gli esperimenti di LHC, è stata incentrata su tre tipi di fieldbus industriali, complementari fra loro, che consentono di coprire l’ampio dominio di applicazione e di richieste di tale strumentazione all’interno dell’esperimento: CAN, WorldFip e Profibus. WorldFip è particolarmente indicato in applicazioni in cui si gestisce un ampio volume di dati, mentre WorldFip è utilizzato prevalentemente nelle comunicazioni con richieste temporali critiche. CAN è utilizzato prevalentemente per interfacciare sensori e moduli di

readout di semplici device grazie alla sua alta flessibilità e attendibilità nella trasmissione dati.

3.3.4 Il sistema software del DCS: le soluzioni SCADA

Un sistema SCADA racchiude tutta una serie di pacchetti commerciali normalmente usati per la supervisione di sistemi industriali. Le potenzialità offerte da tali sistemi sono incentrate sulla raccolta delle informazioni dall'hardware, l'elaborazione dei dati e la visualizzazione per l'utente finale. Sebbene i prodotti SCADA non sono sviluppati per applicazioni all'interno degli esperimenti di LHC, offrono una flessibile e distribuita architettura ideale per le finalità del sistema dei DCS dei vari esperimenti ad LHC. Oltre alle funzionalità standard di un qualsiasi sistema di acquisizione quali l'interfaccia uomo-macchina (HMI), la gestione degli allarmi, dell'archiviazione e degli accessi, i prodotti SCADA provvedono una serie di facilitazioni sia con l'hardware dedicato dell'esperimento come ad esempio i fieldbus e le PLC, che col software attraverso API (Application Program Interface), per la comunicazione con applicazioni esterne, e attraverso interfacce con i database con protocolli industriali quali ODBC e JDBC (Open o Java Database Connectivity).

PVSS II e JCOP

Per facilitare l'integrazione fra i vari sistemi e standardizzare le funzionalità fra i quattro esperimenti ad LHC è stato sviluppato dal CERN il progetto JCOP (Joint Control Project) con lo scopo di determinare una soluzione comune con cui implementare i DCS dei vari esperimenti. Tale commissione ha scelto come sistema SCADA comune a tutti gli esperimenti il pacchetto software PVSS II dell'azienda austriaca ETM. La scelta è stata indirizzata verso questa soluzione in quanto risponde ad una serie di requisiti richiesti per lo sviluppo di un sistema distribuito. Tale sistema offre una filosofia aperta nella gestione della connettività con sistemi e database esterni e offre la possibilità di integrare facilmente le proprie funzionalità per interfacciare strumentazioni e applicazioni custom. Tale programma è inoltre concepito

come sistema distribuito fornendo la possibilità di suddividere i processi di supervisione su più elementi di elaborazioni all'interno della rete. La comunicazione avviene infatti seguendo la struttura client/server sfruttando le potenzialità del protocollo di comunicazione TCP/IP. Le singole funzionalità sono infatti sviluppate da processi indipendenti (Manager) che comunicano tra di loro attraverso un processo principale (Event Manager) che gestisce la comunicazione all'interno della rete distribuita. Maggiori dettagli sull'architettura del software verranno descritti in seguito.

Sebbene PVSS II è stato scelto come base per i controlli per gli esperimenti di LHC, non offre una soluzione completa per lo sviluppo di un sistema di controllo omogeneo e completo; a tal fine il JCOP ha sviluppato un framework in grado di implementare le funzionalità richieste. Il framework è un insieme integrato di linee guida e strumenti utili per sviluppare le applicazioni all'interno del DCS. Il framework include una serie di template, elementi standard e funzioni richieste per lo sviluppo di un sistema di controllo completo riducendo al minimo il lavoro del progettista ed evitando duplicazioni. Fornisce una serie di linee guida per la progettazione, la gestione degli allarmi, il controllo degli accessi ottimizzando lo sviluppo in previsione dell'integrazione nel sistema finale. Ottimizza le prestazioni in termini di robustezza e di attendibilità del sistema e copre le carenze di PVSS in relazione all'interfaccia con componenti non standard (Moduli VME o CANbus) e nell'integrazione della macchina a stati. Per lo sviluppo della FSM il framework integra il pacchetto SMI++, soluzione custom sviluppata in linguaggio SML, che consente di descrivere ogni singolo elemento del sistema in termini di oggetti come una macchina a stati. SMI++ permette di definire le regole base per l'automatizzazione dei processi e per le procedure di recupero da eventuali errori.

Database

PVSS II include un database interno dove poter archiviare i valori dei parametri che definiscono lo stato del sistema. Tale sistema è gestito attraverso dedicati manager ed è ottimizzato per un accesso veloce ai dati, caratteristica fondamentale per un sistema real time. L'enorme quantità di dati

prodotti rende più conveniente l'utilizzo di un sistema di database esterno interfacciabili con PVSS II attraverso il framework con API dedicate. I database esterni sono sviluppati con tecnologia ORACLE in XML e utilizzati prevalentemente per immagazzinare la configurazione statica del sistema e i parametri operativi del DCS all'interno del condition database. Il condition database racchiude i dati relativi alle caratteristiche ambientali del sistema e lavorative (HV, LV, GAS,...) durante la presa dati necessari per la ricostruzione offline degli eventi.

3.3.5 Sistemi Comuni

Molte delle funzionalità sviluppate dai sistemi di controllo di CMS sono comuni a tutti gli esperimenti di LHC. Per questo motivo è stato deciso di istituire gruppi di lavoro comune che sviluppassero soluzioni standard idonee per tutti gli esperimenti soprattutto su sistemi ausiliari per il funzionamento dei singoli esperimenti.

Rack e Crate Control

Il sistema di controllo dei Rack è sviluppato in un unico progetto per gestire tutti gli esperimenti di LHC. Il sistema di controllo dei Racks deve farsi carico del controllo e monitoraggio dell'ambiente all'interno del quale i racks operano e delle infrastrutture ad esso associate per assicurare il corretto funzionamento dell'apparato. Tale sistema è sviluppato per controllare tutti i possibili fattori di errore e malfunzionamento dei rack che operano all'interno della zona sicura, per i quali, quindi, è possibile sviluppare procedure di manutenzione durante la presa dati. I principali sottosistemi che deve gestire sono:

Sistema di distribuzione dell'alimentazione Tale sistema estende il ruolo del sistema principale di distribuzione dell'alimentazione primario e controlla la distribuzione del primario trifase a tutti i sottomoduli presenti nei rack

Sistema di raffreddamento Controlla e monitora il sistema di raffreddamento sia ad acqua che ad aria presente per i singoli sottomoduli. Con-

trolla lo stato di funzionamento delle ventole e le possibili perdite da parte del sistema di raffreddamento liquido provvedendo a correggere eventuali malfunzionamenti.

Rivelazione di incendi e prevenzione Controlla la presenza di fumo o principi d'incendio e automatizza le procedure di recupero

3.3.6 Servizi esterni

Per assicurare un corretto funzionamento del DCS di CMS ed avere un quadro globale dell'ambiente operativo è necessario sviluppare un sistema di interconnessione con i sistemi esterni al rivelatore che offrono informazioni sullo stato e sulle caratteristiche delle infrastrutture con cui il sistema coopera. Il DCS è interfacciato al livello più alto con i sistemi di controllo relativi alle Infrastrutture tecniche del CERN e all'acceleratore LHC. Sebbene la comunicazione con tali sistemi sia bidirezionale, le azioni possono essere sviluppate solo in un'unica direzione per tutelare l'indipendenza dei sistemi. Le infrastrutture tecniche sono composte da sistemi indipendenti quali ad esempio il Detector Control System (DSS) o il sistema di controllo del Magnete il cui stato è fondamentale per definire lo stato generale del DCS. Il Detector Safety System (DSS) [37] è un progetto sviluppato al CERN sotto la supervisione del JCOP, col compito di gestire tutte le funzionalità necessarie ad assicurare la protezione ambientale e operativa per i quattro esperimenti ad LHC. Tale struttura è sviluppata complementariamente al DCS di ogni esperimento assicurando un'alta sicurezza dell'ambiente operativo. Il principale obiettivo del DSS è rivelare possibili malfunzionamenti e potenziali situazioni di pericolo che possano ledere la sicurezza del personale e delle infrastrutture; situazioni di pericolo derivanti da possibili fughe di gas o da incendi devono essere gestite dal DSS tramite opportune procedure di allerta e di messa in sicurezza dell'ambiente.

Capitolo 4

Il sistema hardware per i DCS degli RPC

Il sistema di controllo e di monitoraggio degli RPC di CMS è progettato e sviluppato seguendo i requisiti generali trattati nel capitolo precedente per assicurare integrabilità e modularità all'intero sistema. La struttura hardware del sistema è inquadrata in tre livelli principali. Il livello superiore è costituito dalla strumentazione per la supervisione del sistema, composta essenzialmente da unità di elaborazione general-purpose per la gestione dell'accesso ai servizi. Il livello più basso è sviluppato mediante una serie di moduli di frontend custom ed industriali e da infrastrutture di supporto per il corretto funzionamento della strumentazione. La connessione tra i due livelli è assicurata attraverso una struttura di rete integrata nella rete del CERN e da una serie di componenti hardware per l'interfacciamento dei vari elementi. La distribuzione geografica dell'attrezzatura si sviluppa su quattro livelli a seconda della capacità dei singoli componenti di poter operare all'interno dell'ambiente ostile presente nei pressi dell'esperimento: la stanza di controllo, la galleria laterale della caverna, sul rivelatore e all'interno della struttura degli stessi. Fisicamente, l'elettronica posta fuori dal rivelatore è generalmente collocata all'interno di crate di tipo VME, mentre all'interno del rivelatore, l'elettronica risiede sul bordo o sulla superficie di ogni camera. L'accesso ai dati è assicurato attraverso una connessione di rete con i crate dedicati al DCS presenti nella stanza di controllo, nei quali è presente un ulteriore processore che gestisce la comunicazione col sistema di DCS generale.

Il sistema di slow control per gli RPC ha come compiti principali il controllo e il monitoraggio dell'elettronica di frontend e dei servizi per il funzionamento degli RPC quali il sistema di distribuzione delle alimentazioni, il sistema del gas e quello della temperatura. Nei prossimi paragrafi verranno analizzati in dettaglio i singoli sistemi e le soluzioni adottate per la loro implementazione.

4.1 Il sistema del DCS per l'elettronica di frontend

Uno dei compiti principali di un sistema di controllo completo ed efficace consiste nel controllo e monitoraggio dell'evoluzione dell'informazione e di tutte le infrastrutture che le gestiscono per assicurare un'alta qualità dei dati raccolti. Particolarmente importante è per il sistema di controllo per lo spettrometro muonico ad RPC lo sviluppo di una rete di controllo in grado di monitorare sia il flusso dati in uscita da ogni singola unità che la sua trasmissione fino alle strutture adibite per l'elaborazione e l'archiviazione. L'architettura della rete di trasmissione dei dati dal rivelatore fino alla stanza di controllo è stata sviluppata in differenti stadi hardware, come è descritto in figura 4.1. Come descritto nei precedenti capitoli, l'informazione in uscita dei piani di lettura viene raccolta attraverso una serie di schede di frontend poste in vicinanza di ogni camera. La struttura totale è composta da circa 12,000 schede FEB in grado di gestire ognuna 16 canali di strip. Il segnale raccolto viene in tale stadio formato e digitalizzato in logica LVDS per essere trasmesso, tramite cavi di tipo twister pair di lunghezza tipica di 5 m, alle schede di link board (LB) alloggiare in un crate custom (Link Board Box) posto in appositi rack di DAQ, posizionati sul rivelatore. In tale stadio i dati sono sincronizzati con il clock mandato dal sistema di DAQ (TTC) consentendo l'identificazione del relativo BX. Dovendo essere trasmessa alla stanza di controllo attraverso fibre ottiche, l'informazione in uscita dalle LB viene compressa mediante opportuni algoritmi e multiplexata temporalmente per ridurre il numero di collegamenti ottici necessari alla trasmissione. Tale compito è sviluppato mediante l'utilizzo congiunto di schede custom ([11]): le master link board (MLB) e le slave link board (SLB); queste invieranno

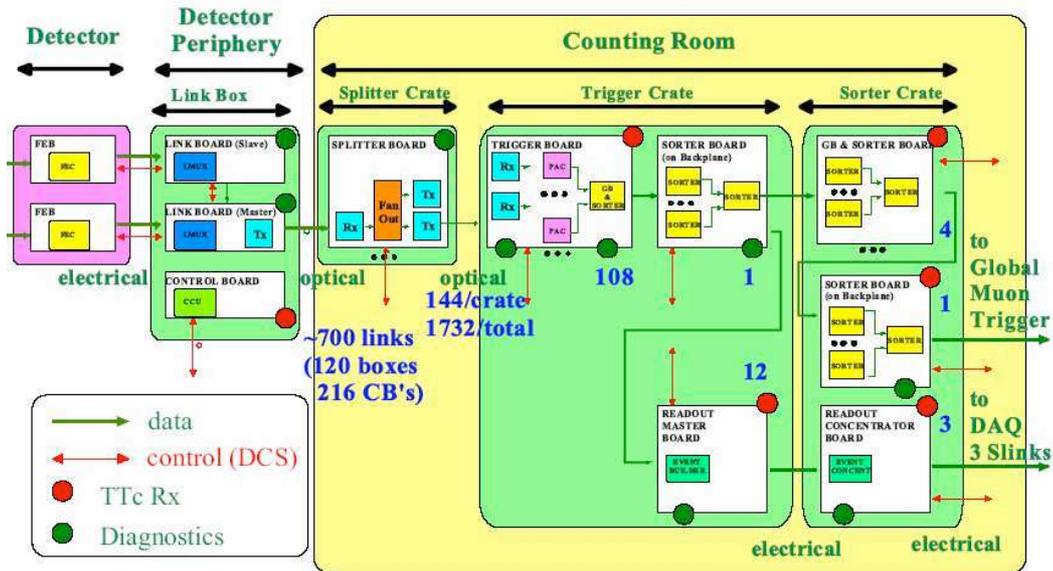


Figura 4.1: Architettura del sistema di frontend degli RPC del barrel.

l'informazione adattata a tale protocollo lungo i circa 100 m che separano le schede dalla stanza di controllo dove l'informazione viene trasmessa alle trigger board per l'elaborazione.

Data la complessità della rete di trasmissione, l'importanza dell'informazione contenuta e l'ambiente ostile in cui si sviluppa, è importante progettare una rete di controllo sui vari stadi per assicurare un'alta qualità dell'informazione da trasmettere alle trigger board. I principali compiti del DCS per il controllo di questo sottosistema sono:

- controllare il sistema di LV per le FEB
- controllare il sistema di LV per le LB
- settare le soglie di ogni FEC
- definire il valore delle soglie dello stadio di discriminazione di ogni FEC
- definire il valore dell'ampiezza dei segnali di ogni FEC

A cui vanno aggiunte le richieste relative al sistema di trasmissione e controllo dati quali:

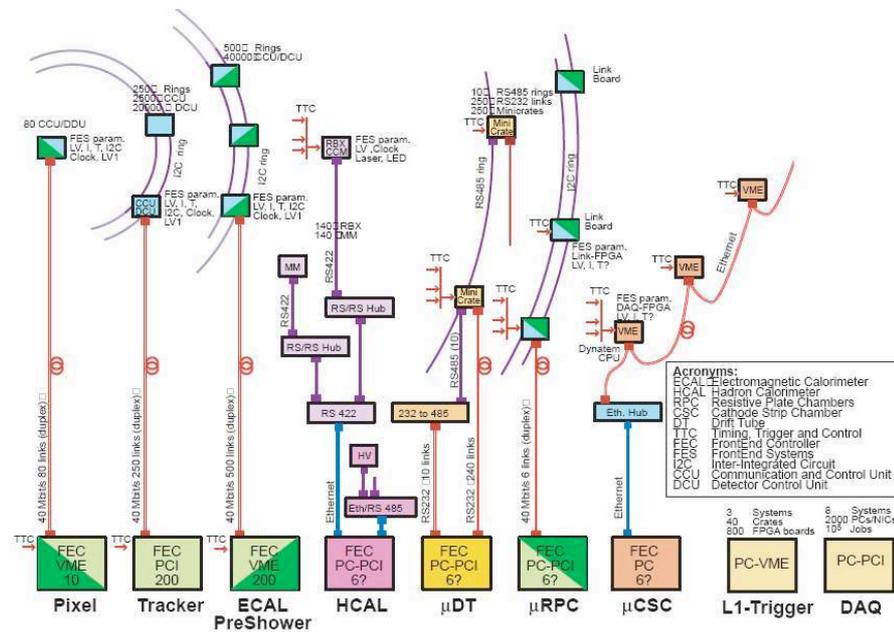


Figura 4.2: Struttura *token-ring* per la rete di controllo delle FEC.

- usare la linea di test di ogni FEC per verificare il loro corretto funzionamento
- monitorare e controllare la trasmissione lungo i cavi ottici, gestita dal GOL chip presente sulla Link Board.
- rivelare e correggere eventuali errori causati dall'ambiente altamente radiativo tramite una struttura ridondante e algoritmi di controllo e di ripristino.

Tali caratteristiche sono state implementate sfruttando un'architettura comune a tutti i rivelatori di CMS (fig.4.2); il sistema è stato sviluppato attraverso l'utilizzo integrato di una rete basata su un'architettura token-ring [42] tra il centro di controllo, l'elettronica da gestire e un controller di frontend posizionato in un crate VME nella stanza di controllo che funge da master della rete e un chip che gestisca i controlli e le comunicazioni (CCU)[42]. Il controllo è gestito interamente dalla Control Board (CB) su cui sono allocate le singole CCU in grado di servire fino a 8 LB e di gestire la comunicazione

attraverso i protocolli I2C e LBus (local bus). All'interno della è presente il modulo TTCx (Trigger Time Control) attraverso il quale servire il segnale di sincronizzazione a tutti gli elementi della rete. Grazie a tale configurazione le CCU possono scambiarsi informazioni con tutti i moduli e adempiere al controllo e al monitoraggio della struttura. Il DCS così sviluppato può essere facilmente integrato all'interno della struttura globale del DCS degli RPC di CMS e gestito mediante il XDAQ.

4.2 Il sistema del DCS per le alimentazioni degli RPC

Uno dei sistemi ausiliari fondamentali in un apparato sperimentale composto da 1000 gap di gas e da circa 5000 cartoline di front-end è il sistema di alimentazione delle gap di gas, comunemente chiamato sistema delle alte tensioni ed il sistema d'alimentazione del front-end, chiamato sistema delle basse tensioni. Entrambi i sistemi giocano un ruolo fondamentale in quanto devono garantire il corretto funzionamento sia del rivelatore che della sua elettronica di front-end; per questo motivo la collaborazione degli RPC di CMS ha dedicato molta attenzione allo sviluppo del loro progetto, tenendo conto sia delle richieste tecniche di base, molte delle quale sono uno standard in questo tipo di esperimenti, che delle richieste aggiuntive dettate da LHC come il dover lavorare in un ambiente altamente ostile per un periodo di almeno 10 anni. Le severe condizioni ambientali di LHC, in cui lavorerà gran parte dei sistemi di alimentazione, possono essere ben descritte dalla presenza di un forte campo magnetico, che può arrivare fino ad 1 Tesla sulle balconate poste nei dintorni delle ruote, da un alto tasso di radiazioni ($5 \cdot 10^{10}$ p/cm², $5 \cdot 10^{11}$ n/cm² e 12-15 kRad), che logicamente influiscono sul comportamento dei componenti elettronici quali trasformatori, induttori con bobine ferromagnetiche e motori elettrici usati dai sistemi di raffreddamento. Di conseguenza tutto il progetto ha richiesto uno studio preliminare molto attento che consentisse di focalizzare l'attenzione sulle richieste da rispettare. E' chiaro che in questo contesto diventa estremamente cruciale il ruolo di un sistema di controllo e di monitoring di ogni sistema ausiliare ed in particolar

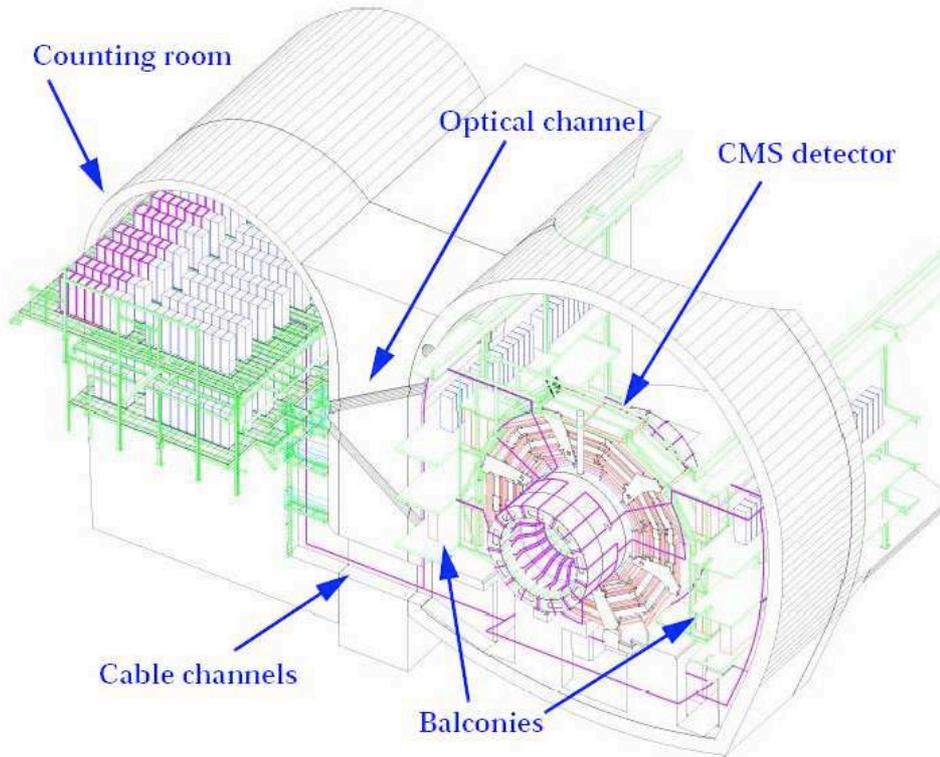


Figura 4.3: Descrizione della distribuzione delle risorse sull'intera area operativa di CMS.

modo del sistema di alimentazione che come abbiamo visto è uno dei cardini dell'apparato sperimentale, e che a differenza dei precedenti esperimenti d'alta energia, verrà posto in un ambiente ostile dove la possibilità di avere malfunzionamenti o eventi inusuali è altamente probabile. A questo va aggiunto che tutta l'elettronica posta vicino al rivelatore sarà difficilmente accessibile per l'elevato fondo radiattivo prodotto da un acceleratore adronico e perciò saranno molto rari i casi in cui l'operatore potrà entrare nella sala sperimentale per riparare o sostituire gli eventuali alimentatori e componenti non funzionanti. Proprio da tutte queste considerazioni è nata subito la necessità di avere un sistema distribuito, con pochi componenti posti nella sala sperimentale e con una ridondanza di controlli e di monitoraggio che consentisse un corretto funzionamento del sistema per un periodo così lungo.

	HV	LV
Working Value	12KV/1mA	7V/3A
Ripple	< 100 mV pp per f<20 MHz	< 10 mV pp per f<20 MHz
Programmable voltage	0-12KV	0-8V
Voltage step	10V	100 mV
Voltage precision	<10V	100 mV
Info	V/I/Trip/Status	V/I/Trip/Status

Tabella 4.1: Richieste per il sistema di alimentazione per gli RPC

Le richieste progettuali

Le richieste progettuali comuni al sistema di alta tensione (HV) e di bassa tensione (LV) sono quelle di avere un sistema distribuito composto da un “oggetto master”, che racchiudesse tutte le funzionalità di controllo e di monitoring, e da una serie di “oggetti slave” dedicati allo sviluppo della potenza collegati al master tramite un protocollo di trasmissione commerciale. Nel caso degli RPC la parte master sarebbe stata posta in control room e quindi in una zona relativamente tranquilla in quanto posta a circa 100 metri dall’apparato sperimentale, mentre la parte di potenza (slave) sarebbe stata posizionata nei dintorni del rivelatore e quindi in una zona altamente ostile. Le richieste più tecniche dei due sistemi di alimentazioni sono riportate nella tabella 4.1 e sono descritte nel prossimo paragrafo. Le basi di questo progetto furono sviluppate nel 2001 come progetto INFN per LHC in collaborazione con alcune ditte specializzate nei sistemi di potenza. Solo nel 2003 il progetto ha portato alla nascita di un primo prototipo funzionale che è stato ampiamente analizzato presso i laboratori del gruppo di Napoli e con il quale il sottoscritto ha sviluppato la maggior parte del software dei DCS.

Parametri operativi

Ogni RPC deve operare alla tensione di 10 kV con una corrente limite di circa 200 μ A; per ottimizzare le risorse e per far fronte all’alto numero di gap singole che necessitano di una connessione, è stato sviluppato un sistema di alimentazione generale per ogni camera tramite il quale viene distribuita

la tensione a tutte le gap. Lo schema di sviluppo di un singolo settore è descritto in figura 4.4. A tal scopo è previsto un bus di distribuzione che alimenti più camere contemporaneamente ed offra la possibilità di controllare singolarmente la tensione di lavoro ed eventuali comportamenti anomali. La soluzione finale prevede, per l'alimentazione di una singola ruota, l'utilizzo di 96 canali per l'alto voltaggio e 144 per il basso voltaggio (in totale per tutto il barrel saranno rispettivamente 480 e 720). I principali requisiti di un modulo per l'alimentazione di una gap sono:

- Valore di tensione massima supportata di 12 kV, raggiungibile tramite step da 10 V con 4 V di risoluzione
- valore di corrente a fondoscala massimo di 1 mA
- massimo ripple picco picco < 800 mV

Il sistema di distribuzione delle basse tensioni serve ad alimentare l'elettronica di frontend collocata all'interno di ogni camera attraverso due connessioni differenti. Ogni scheda di frontend (FEC) necessita di due valori analogici di alimentazione, +3V e -2V, (con tolleranza massima al 10%), a cui vanno aggiunti i +5V digitali necessari per il funzionamento dei FEBC e dei SU e i +3V per i circuiti di DAC presenti sulle FEBC. Queste alimentazioni sono fornite attraverso due cavi con masse separate, che forniscono +7V sia per i componenti digitali che per quelli analogici, distribuiti a tutta la camera. Inoltre per compensare le cadute di potenziale che le correnti possono causare lungo i cavi di alimentazione, sono previsti segnali di *sense* ad alta impedenza, che riportino i valori di tensioni effettivamente presenti sul carico; ciò consente di compensare fin a 6 V di caduta sui cavi, mantenendo sui carichi le tensioni di riferimento richieste. I principali requisiti richiesti per i moduli di LV sono:

- Valore di tensione massima supportata di 7 V, raggiungibile tramite step da 100 mV con una precisione di 100mV
- valore di corrente a fondoscala massimo di 3 A

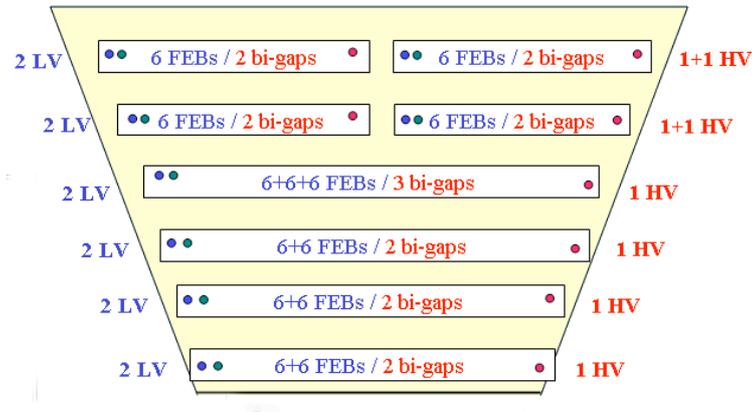


Figura 4.4: Schema di distribuzione delle alimentazioni per un settore della ruota del barrel.

- massimo ripple picco picco a pieno carico di < 10 mV per $f < 20$ MHz
- tensione applicata sconnessa (floating) da riferimenti di massa esterni con isolamento migliore di 1 k Ω a 10 MHz.
- massimo potenza dissipata per canale pari a 6.3 W (0.9 A * 7 V).

L'architettura del sistema

L'architettura scelta per i due sistemi è la stessa, ma la distribuzione geografiche dei componenti è diversa in quanto è stato deciso di dare una valenza maggiore al sistema di HV che presenta chiaramente una criticità molto maggiore (fig. 4.5). L'architettura adottata si basa, come già accennato nei paragrafi precedenti, su un crate master (mainframe), dedicato al controllo ed alla gestione di un certo numero di crate slave che va da un minimo di uno ad un massimo di cento. Ogni crate slave alloggia a sua volta le cosiddette schede di potenza ed a secondo della scheda scelta un crate slave può avere fino ad un centinaio di canali di potenza (alimentatori).

Per il progetto degli RPC si è scelto di usare due distribuzioni geografiche dei componenti diverse per il sistema di HV e di LV. La scelta della suddivisione dei componenti, schematizzata in figura 4.5, è stata sviluppata

come compromesso tra la funzionalità del sistema e il contenimento dei costi di realizzazione. In particolare per le HV si è deciso di porre sia il mainframe che i crate slave nella control room e quindi in una zona facilmente accessibile durante la presa dati in modo da limitare al massimo il rischio di non poter intervenire in caso di danneggiamento di un componente o nel caso in cui si decidesse di escludere una gap di una delle camere che stesse funzionando male (scariche o eccesso di corrente assorbita). Logicamente questa scelta ha portato alla necessità di portare tutti i cavi di alimentazione delle camere in control room che dista circa un centinaio di metri dall'apparato sperimentale. Tale scelta impone l'uso di moduli indipendenti per la distribuzione delle alimentazioni (*Patch Panel*) che sono collocati all'interno delle balconate nei pressi del rivelatore e permettono di collegare ogni singolo RPC ad un modulo generale di distribuzione. Tali moduli consentono di gestire la connessione tra i generatori di potenza posti a 100 m di distanza nella control room e i singoli RPC attraverso un sistema diretto di cablaggio di tipo differente consentendo l'ottimizzazione e la riduzione delle risorse necessarie.

Per il sistema dei LV si è invece deciso di avere il mainframe in control room mentre i crate slave sono posti nei rack disposti sulle balconate che circonda ogni ruota di CMS. In questo secondo scenario essendo i crate di LV difficilmente accessibili si è deciso di cablare gli alimentatori in modo che nel caso di malfunzionamento di una scheda di potenza (12 canali indipendenti) non venisse "spenta" una camera intera ma solo una parte di più camere diverse. Si è quindi giocato sul cablaggio del sistema di LV per diminuire il rischio di avere una camera completamente spenta. La soluzione scelta per entrambi i sistemi si basa sull'uso di moduli EASY della CAEN sviluppati appositamente per tali condizioni operative.

EASY

Partendo dalle richieste che sono state precedentemente discusse e dall'architettura proposta, la CAEN, una ditta italiana specializzata in sistemi di potenza, ha sviluppato un sistema, chiamato EASY Embedded Assembly SYstem per la gestione e la distribuzione delle alimentazioni dei rivelatori e dell'elettronica di front-end. Tale filosofia di sviluppo consente di far fronte

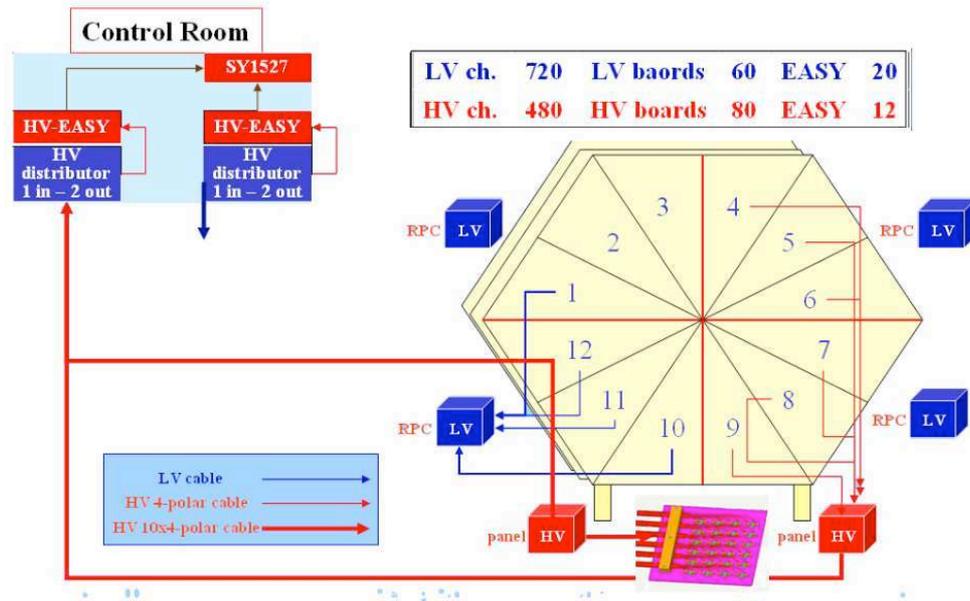


Figura 4.5: Schema di sviluppo della rete di distribuzione delle alimentazioni.

ai problemi operativi inerenti all'ambiente di lavoro di CMS attraverso una distribuzione organica delle risorse ottimizzata per preservare i componenti elettronici non tolleranti all'alto tasso di radiazioni e al forte campo magnetico presente nei pressi dell'esperimento. L'architettura di tale sistema si basa sulla suddivisione della funzionalità fra locale e remoto a seconda della tipologia di componenti usati per svilupparla. Il sistema prevede la collocazione dei generatori direttamente nella zona ostile all'interno di appositi crate, detti EASY, in grado di gestire un'ampia gamma di moduli per alimentare i singoli rivelatori. Il funzionamento di ogni modulo EASY è controllato

	HV	LV
Canali	480	720
Mainframe	1	1
Schede	80 (A3512)	60 (A3009)
EASY	12	20
Distributori	30	-

Tabella 4.2: Schema generale dei componenti del sistema di alimentazione degli RPC del barrel

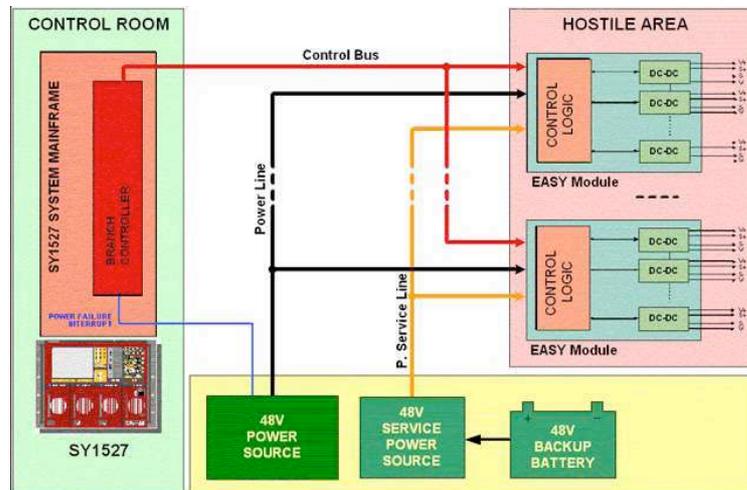


Figura 4.6: Architettura del sistema EASY.

in locale attraverso uno o più mainframe posti nella stanza di controllo; ogni mainframe sviluppa la rete di distribuzione seguendo un'architettura a stella attraverso l'uso di moduli Branch Controller che assicurano la gestione del bus sfruttando il protocollo di comunicazione CANBus, come mostrato nello schema proposto in figura 4.6.

Il mainframe è costituito dal sistema SY1527 della CAEN che rappresenta la soluzione ottimale in relazione alle richieste del sistema di alimentazione. Tale sistema permette di allocare all'interno della propria struttura schede di tipo differente ed è ottimizzato per lavorare cooperativamente con i moduli EASY. Modularità, flessibilità e affidabilità sono le caratteristiche peculiari di tale strumento che consentono di far fronte alle richieste di robustezza e eterogeneità del sistema. Il modulo SY1527 (fig. 4.7) è allocato in un rack di 19" di larghezza e 8U di altezza compatibile con lo standard EUROCARD [46] e presenta le seguenti caratteristiche:

- Un pannello frontale per la gestione del modulo caratterizzato da un monitor LCD 7.7" e da una serie di led e switch per il monitoraggio e il controllo del funzionamento dell'intero sistema.
- Un sezione modulare per l'allocazione dei generatori di potenza posta

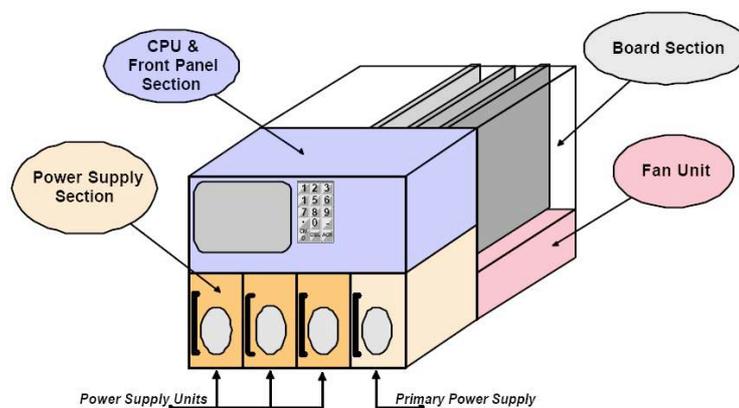


Figura 4.7: Struttura meccanica del mainframe SY1527.

al di sotto del pannello frontale mediante la quale alimentare le schede e il sistema. L'uso combinato di più moduli consente di fornire fino a 2250 W di potenza.

- Un'apposita sezione per le ventole di raffreddamento espandibile nella zona sottostante.
- Un backplane in grado di allocare e gestire fino a 16 slot per schede EUROCARD da 8U con funzionalità differenti.

Tale sistema è in grado di monitorare, settare e configurare, grazie all'uso di un microprocessore per slot, fino a 1024 parametri con una risoluzione a 14 bit; tutte le informazioni raccolte possono essere immagazzinate all'interno di una memoria non volatile presente all'interno del sistema. Il modulo fornisce una serie di indicatori sullo stato e sulle condizioni di allarme sia su ogni singolo canale delle schede sia sull'intero crate attraverso i quali controllare il funzionamento del sistema. Ogni mainframe può contenere fino a 16 branch controller e ogni singolo branch controller può gestire fino a 6 crate EASY; ciò consente di controllare con un unico mainframe fino a 96 crate EASY sufficienti per sviluppare un intero sistema di alimentazioni per il basso o l'alto voltaggio. Ogni singolo crate EASY della famiglia 3000 scelta per il sistema degli RPC, può allocare fino a 10 schede di lunghezza pari a

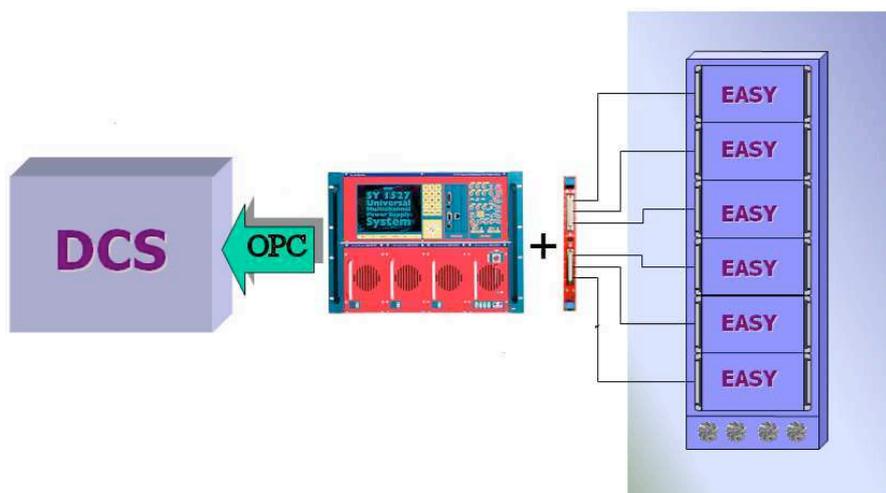


Figura 4.8: Schema d'interfacciamento del DCS col sistema di distribuzione delle alimentazioni .

30 cm della famiglia A3XXX. Le schede scelte per l'alto e il basso voltaggio sono rispettivamente i moduli A3512 e A3009 della CAEN, in grado di rispondere pienamente ai requisiti richiesti per il funzionamento degli RPC. Ogni modulo EASY prevede la possibilità di utilizzare un sistema di raffreddamento esterno sia ad acqua che ad aria perfettamente integrabile con lo standard del crate; è inoltre possibile integrare un apposito modulo di ventole qualora nella zona interessata non sia presente un campo magnetico intenso. Naturalmente operando in ambiente ostile i moduli EASY necessitano di un'alimentazione esterna idonea alle proprie funzionalità. Il sistema è alimentato mediante moduli MACISTE *ad-hoc*, posti in area sicura e sviluppati dalla CAEN, in grado di fornire un'alimentazione in continua di 48 V. Tale modulo di alimentazione provvede a rettificare il sistema trifase di 400 Hz in AC del primario e generare una tensione in continua di 48 V attraverso la quale alimentare sia le schede dei sistemi di distribuzione sia il sistema di controllo remoto (figura 4.6).

L'interfaccia del sistema di alimentazione col DCS è sviluppata tramite il mainframe attraverso il quale è possibile, in remoto, controllare e setta-

re ogni singolo componente appartenente alla rete di distribuzione, come è mostrato in figura 4.8. L'SY1527 offre infatti una serie di possibilità di interfacciamento con bus esterni supportando vari protocolli di comunicazione. Il protocollo utilizzato per interfacciare il sistema con il sistema SCADA scelto sfrutta le potenzialità dell'OPC server gestendo la comunicazione su rete LAN attraverso la porta ETHERNET presente sul mainframe. Le principali funzionalità che possono essere gestite dal DCS sul sistema di alimentazione sono:

Settaggio e monitoraggio valori operativi Per ciascun canale è possibile leggere i valori misurati sul carico relativi a tensione e corrente e settare il valore della tensione da erogare, la corrente massima erogabile e lo stato del canale (V0set, I0set, OnOff). Inoltre è possibile definire le caratteristiche della rampa di variazione della tensione per evitare variazioni troppo brusche che possono procurare ai capi dei cavi spike dannosi all'elettronica alimentata (RAMPUP,RAMPDOWN,Trip).

Controllo allarmi sui singoli canali Per ogni canale di alimentazione sono previsti una serie di controlli booleani sullo stato del canale (OVERCURRENT, OVERVOLTAGE, TRIP, UNDERVOLTAGE) e procedure di recupero per eventuali malfunzionamenti.

Controllo allarmi relativi al mainframe OVER TEMPERATURE, FAN FAILURE, POWER FAILURE. Consentono di conoscere lo stato operativo del sistema e di sviluppare procedure adeguate nel caso di malfunzionamento.

Monitoraggio della comunicazione Gestione della comunicazione all'interno della rete e monitoraggio del corretto funzionamento della trasmissione.

4.3 Il sistema del DCS per la temperatura degli RPC

Per quanto visto nei precedenti capitoli, il comportamento degli RPC e il loro corretto funzionamento dipende dalle caratteristiche ambientali in cui operano. E' necessario quindi sviluppare una rete di controllo localizzata che sia in grado di monitorare costantemente le caratteristiche operative quali temperatura e pressione per assicurare l'affidabilità e la correttezza delle informazioni acquisite. Tale scopo rientra nelle finalità del sistema globale di DCS per gli RPC ed è implementato mediante una fitta rete di sensori posti all'interno delle camere e controllati attraverso i sistemi standard di trasmissione. Il sistema di rivelazione della temperatura all'interno degli RPC è sviluppato attraverso sensori di tipo AD592BN della Analog Device; tali sensori sono costituiti da un circuito integrato monoblocco a due terminali che produce in uscita una corrente proporzionale alla temperatura assoluta (PTAT) su un ampio intervallo di temperatura. Il principio di funzionamento del dispositivo di base sulle proprietà dei transistor al silicio che, polarizzati in un determinato modo, presentano una caratteristica d'uscita dipendente linearmente dalla temperatura [47]. La corrente in uscita prodotta risulterà forzata ad essere uguale a meno di un fattore di scala alla temperatura in gradi Kelvin dell'ambiente. Il sistema di monitoraggio della temperatura per gli RPC del barrel è composto da circa 300 sensori per i quali è stato sviluppato un sistema di distribuzione dell'alimentazione e di raccolta dell'informazione gestito interamente da 10 moduli ADC di tipo A3801 della CAEN integrabili con lo standard EASY. Il modulo CAEN A3801, sviluppato per operare in campo magnetico e altamente radioattivo, è una scheda ADC a 128 canali che accetta in ingresso valori in tensione 0-10 V differenziale e ne misura il valore con una risoluzione di 15 bit. Permette inoltre di campionare 250 valori per canale con una frequenza di campionamento massima di 1 kHz con soglia comune a tutti i canali. L'intero sistema verrà allocato all'interno dei crate per il basso voltaggio posti in ambiente ostile e comunicheranno con il DCS attraverso il mainframe come tutte le soluzioni EASY.

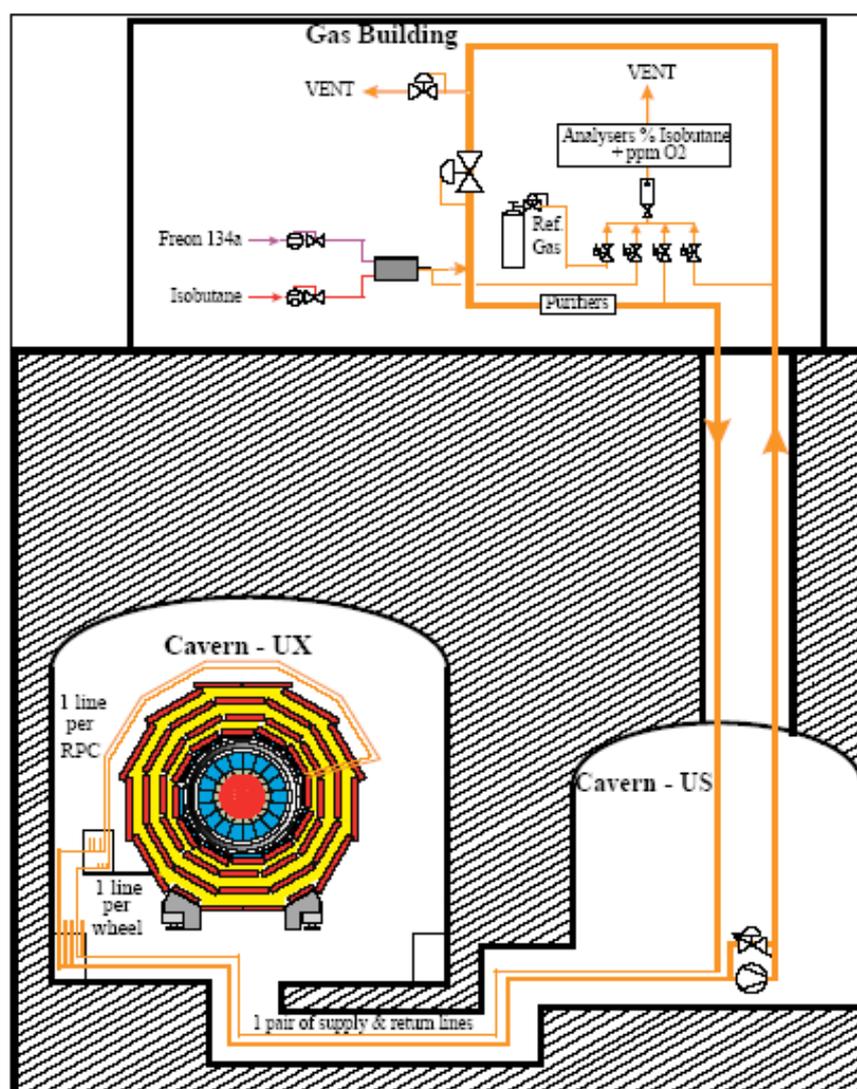


Figura 4.9: Architettura del sistema di distribuzione del gas.

4.4 Il sistema del DCS del gas per gli RPC

La funzione principale del sistema di distribuzione del gas consiste nel miscelare nelle giuste proporzioni tra di loro i singoli componenti e distribuire la miscela pulita a tutte le camere alla pressione prestabilita. Naturalmente tutte le fasi di sviluppo della rete e gli elementi che la compongono necessita-

no di un controllo esterno che ne assicuri il corretto funzionamento e preservi l'ambiente circostante da eventuali malfunzionamenti. Il sistema di distribuzione del gas per gli RPC del barrel deve provvedere a rifornire ogni singolo RPC con una miscela non infiammabile di 10 m³ di tetrafluoroetano (Freon C₂H₂F₄ al 96.2%), isobutano((CH₃)₃CH al 3.5%) e di esafluoruro di zolfo (SF₆ al 0.3%). Il comportamento della rete di distribuzione è condizionato dalle dimensioni del rivelatore: l'altezza totale di 15 m e un gradiente di circa 0.3 mbar/m dovuto alla alta percentuale di freon rendono necessaria una differente compensazione della pressione idrostatica e rendono impossibile lo sviluppo di una rete a circuito chiuso per il sistema di circolazione del gas. Inoltre data l'alta granularità delle camere da rifornire dovuta alla struttura della ruota, i regolatori di pressione e i bubbolatori non sono posti alla stessa altezza per ogni camera rendendo necessari correzioni di pressione dovute a tale offset. Il sistema di distribuzione si sviluppa quindi in moduli funzionali differenti collocati in posizioni diverse come si evince in figura 4.9.

Il circuito di circolazione è distribuito su tre aree differenti:

- I purificatori, i miscelatori, gli ingressi del gas e le connessioni di uscita sono situate in superficie dove la miscela è creata, controllata e ripulita;
- i controllori di pressione, differenti per il barrel e per l'endcap, i compressori e la strumentazione di analisi sono posti nella caverna di servizio in ambiente accessibile
- i manicotti del gas per ogni camera e i relativi flussimetri sono posizionati all'interno di un rack di distribuzione posto ai piedi di ogni ruota in ambiente non accessibile durante la presa dati

I singoli componenti del gas sono miscelati da una serie di miscelatori automatizzati che assicurano le corrette percentuali della miscela con precisione assoluta pari allo 0.3% e controllano costantemente che le percentuali di isobutano non rendano il gas infiammabile. La miscela così formata viene inserita all'interno del loop chiuso e distribuita singolarmente ad ognuna delle 12 stazioni che compongono le cinque ruote. Ogni camera è quindi alimentata singolarmente o a gruppi di due comportando un numero di canali

indipendenti per il barrel pari a 240. La geometria e le dimensioni della ruota all'interno della quale sono allocati gli RPC rendono necessario lo sviluppo di un sistema di distribuzione che consideri lo scarto in pressione dovuto alla differente pressione idrostatica sugli RPC. Tale fattore è stato sviluppato suddividendo ogni ruota in tre livelli differenti e somministrando la miscela alla pressione relativa ad uno dei tre livelli controllati dalla caverna di servizio, seguendo lo schema posto in figura 4.10

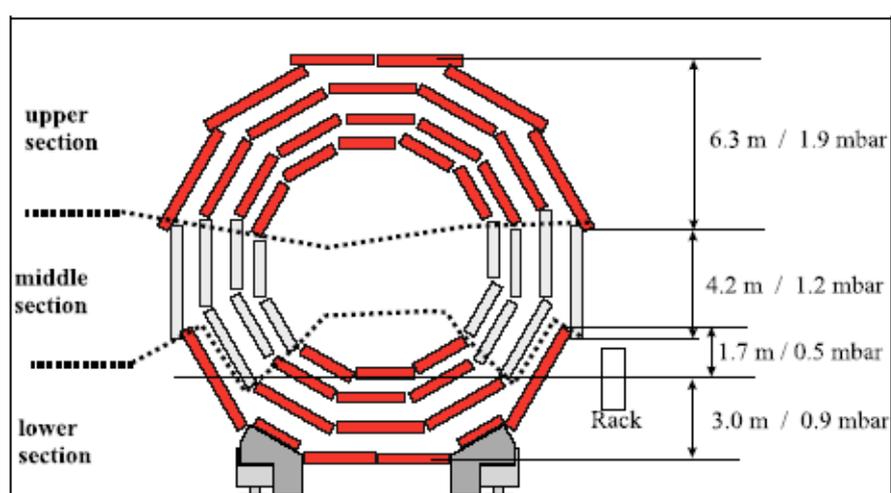


Figura 4.10: Suddivisione in tre zone verticali del sistema di distribuzione del gas per gli RPC.

Dato l'alto numero di rivelatori che utilizzano una miscela gassosa come componente attivo, per ottimizzare e standardizzare la progettazione e lo sviluppo dei sistemi di controllo per tale scopo, è stato creato un progetto comune a tutti gli esperimenti di LHC per il controllo del sistema del gas. Il Gas Working Group (GWG) ha quindi il compito di definire un'architettura comune nello sviluppo dei controlli per i vari sistemi di distribuzione del gas ed assicurare una soluzione standard efficiente, generica e ottimizzata per scopi differenti. Il GWG offre una soluzione comune che consenta di integrare tale struttura all'interno della struttura generale del DCS di ogni singolo sottorivelatore e offrire una serie di condizioni, controlli e allarmi inerenti allo stato del sistema provvedendo al monitoraggio di ogni singola

device che lo compone e alle procedure di recupero da eventuali condizioni di malfunzionamento.

4.5 Protocolli di comunicazione

4.5.1 OPC

L'eterogeneità del sistema di controllo e l'alto numero di componenti sia standard che custom che lo compongono, impongono l'utilizzo di un ambiente software che si faccia carico di assicurare la compatibilità nella comunicazione tra i singoli componenti. Ogni singolo componente del sistema di controllo deve essere in grado di acquisire e comunicare all'interno della rete con altri componenti sviluppati da produttori differenti; la scelta di un ambiente standard consente di superare le problematiche relative ad eventuali adattamenti fra driver di sistemi diversi e conflitti negli accessi di più applicazioni a risorse comuni. Per rispondere a tali esigenze nello sviluppo di sistemi di controllo e automatizzazione in ambito industriale, è stato creato lo standard OPC (OLE for process control), che garantisce uno scambio di dati semplice e standardizzato per le applicazioni di controllo e di automatizzazione dai sistemi di campo fino alle singole applicazioni di interfacciamento (driver)(fig.4.11). Tale standard aperto è sviluppato infatti attraverso un insieme di interfacce e di regole, sia hardware che software, che consentono alle applicazioni di accedere alle informazioni provenienti da sistemi differenti in modo omogeneo e coerente indipendentemente dal loro produttore. L'adozione di tale standard nella progettazione di sistemi di controllo consente quindi di ridurre fortemente i costi nella fase di progettazione, installazione e gestione dei sistemi di automatizzazione assicurando flessibilità, integrabilità e semplicità di sviluppo. Lo standard OPC si basa sulla tecnologia Microsoft per le applicazioni industriali quali COM (Component Object Model) e DCOM (COM distributed); dalle quali eredita i modelli, gli oggetti e le proprietà estendendone le funzionalità per assicurare l'eterogeneità e la connettività plug and play fra diversi dispositivi. Il principio base definito dalle specifiche OPC è un modello client/server in cui il server OPC fornisce l'interfaccia per gli oggetti

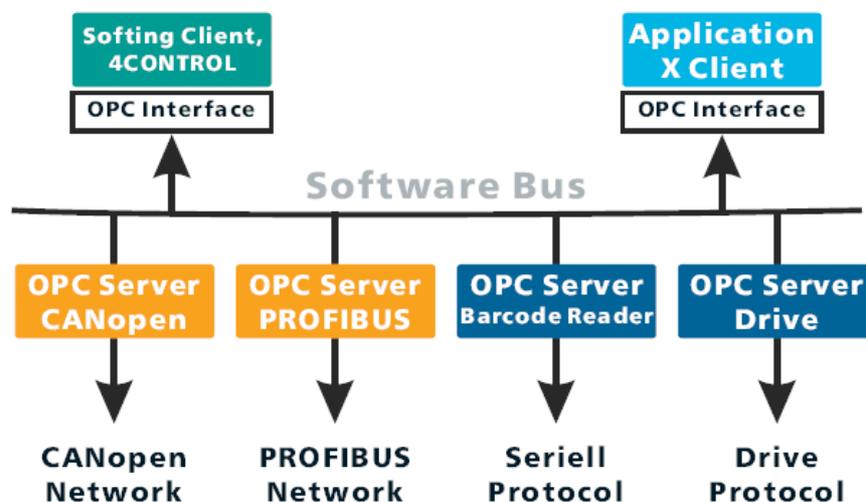


Figura 4.11: Architettura di una rete sviluppata mediante OPC server.

OPC consentendo alle applicazioni client di controllare i dispositivi e gestire i dati relativi come nodi della rete. Lo sviluppo di un qualsiasi componente della rete come un nodo OPC infatti consente a tutte le applicazioni di comunicare (sia in scrittura che in lettura) con qualsiasi altro server OPC, indipendentemente dal produttore del dispositivo, e di gestire le procedure di accesso dati contemporaneamente con più client assicurando l'ottimizzazione delle risorse ed evitando conflitti di accesso.

L'obiettivo primario per un sistema OPC è definire una serie di specifiche standard richieste a tutti i prodotti OPC-compatibili suddivisibili in aree comuni a seconda delle funzionalità sviluppate:

Online Data Access Tale specifica definisce gli oggetti, i modelli e le procedure per l'acquisizione e la trasmissione real-time delle informazioni con le singole device. Le informazioni inerenti ai singoli dati sono definiti attraverso un indirizzo composto con oggetti che definiscono il server, il gruppo e l'item in maniera gerarchica. Ogni item rappresenta quindi un link alla risorsa della device definita attraverso i modelli propri del OPC, come visualizzato in figura 4.12.

Alarm and Event Handling Tale specifica consente di maneggiare tutta

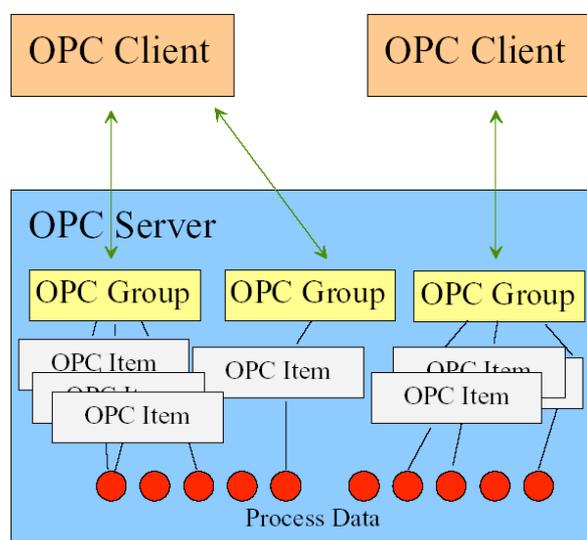


Figura 4.12: Organizzazione dati per client secondo le specifiche OPC.

una serie di informazioni, definite come Allarmi ed Eventi, per le quali è necessaria un'attenzione immediata e aperiodica, in contrasto con il flusso dati continuo del Data Access.

Historical Data Access Tali specifiche gestiscono il monitoraggio delle singole risorse di ogni sistema e l'archiviazione delle variazioni nel tempo.

Tali specifiche sfruttano i vantaggi offerti sia da interfacce custom di tipo COM per la definizione degli ambienti client e server attraverso applicazioni sviluppabili in linguaggio base C++, sia da interfacce OLE per sviluppare ambienti automatici sfruttando le potenzialità di applicazioni di alto livello quali Visual Basic ed Excel. Su tale struttura è stato sviluppato il client OPC per il mainframe SY1527 utilizzato dal DCS per il sistema di alimentazione per interfacciare il sistema con il software SCADA (fig.4.13).

4.5.2 I²C BUS

Il bus *I²C* è [45] un bus seriale interno creato dalla Philips nel 1980, diffusosi a tal punto da essere considerato oggi uno standard per i bus interni delle

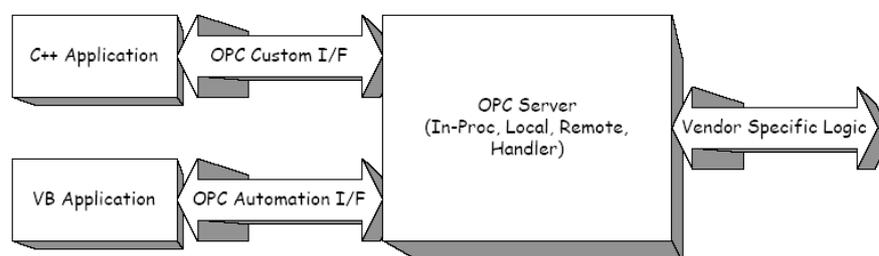


Figura 4.13: Diagramma a blocchi di una interfaccia OPC.

apparecchiature elettroniche. Il suo successo è dovuto alla sua semplicità: composto da due sole linee bidirezionali (serial clock SCL e serial data SDA), non richiede la gestione di alcun chip select; può lavorare in multi-master provvedendo automaticamente alla soluzione dei conflitti di commutazione. Tutti i dispositivi compatibili col bus I^2C incorporano un'interfaccia on-chip che permette loro di comunicare direttamente l'uno con l'altro tramite il bus. Ciò consente di risolvere i principali problemi di interfacciamento che si incontrano nella progettazione di circuiti digitali di controllo. Presenta inoltre una buona immunità ai disturbi grazie ai filtri integrati on-chip. Ogni dispositivo collegato al bus può essere selezionato tramite un unico indirizzo. Ulteriori caratteristiche:

- Basso costo;
- Elevato numero di dispositivi collegabili al bus, i quali possono essere aggiunti o rimossi senza influenzare il comportamento del sistema;
- Protocollo di indirizzamento e trasferimento dati integrato;
- Fino a 100 kbit/s trasferibili nella modalità standard, fino a 400 kbit/s nella modalità veloce.

Le linee SDA e SCL sono bidirezionali e saranno perciò connesse a un livello "alto" di tensione tramite due resistori di pull-up. Gli stadi di uscita dei dispositivi connessi al bus dovranno quindi essere del tipo open-drain o open-collector.

Il Protocollo di Trasferimento Dati

Il protocollo di trasferimento dati si basa sulla modalità di distinzione tra “dato” e “controllo” (fig. 4.14): sulla linea SCL il master genererà il segnale di clock; un livello di tensione stabile sulla linea SDA durante tutto il semiperiodo “alto” del clock sarà ritenuto un “dato valido”; eventuali mutazioni del dato dovranno perciò avvenire durante il semiperiodo “basso” del clock. Una transizione di livello sulla linea SDA durante il semiperiodo “alto” del clock sarà invece ritenuta un segnale di controllo, e, precisamente, una condizione di “start”, se la transizione è stata da “alto” a “basso”, di “stop”, per una transizione opposta.

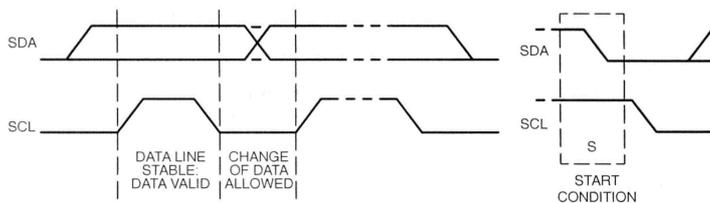


Figura 4.14: Dati e Controlli

Lo start e lo stop saranno sempre generati dal master. Il bus sarà considerato occupato dopo una condizione di start e libero pochi istanti dopo una condizione di stop ($4.7 \mu\text{s}$ in modalità standard, $1.3 \mu\text{s}$ in modalità veloce). La trasmissione avviene per pacchetti costituiti da un byte, partendo dal più significativo (MSB), a cui dovrà seguire un segnale di acknowledge sulla linea da parte del ricevente. Il protocollo non prevede limitazioni sul numero di byte trasmessi, purchè ogni byte sia seguito da un bit di acknowledge, necessario per verificare ad ogni trasferimento di byte che tutto stia procedendo correttamente. Un trasferimento dati rispetterà il formato rappresentato di figura 4.15

Dopo la condizione di start, ci sarà l’indirizzo dello slave. Esso è costituito da 7 bit e sarà seguito da un ottavo bit con cui il master richiederà allo slave una lettura (bit “alto”) o una scrittura (bit “basso”). La trasmissione termina con uno stop generato dal master. Però se il master desidera ancora

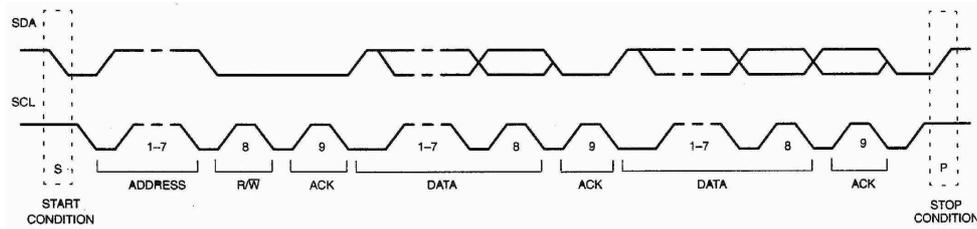


Figura 4.15: Trasferimento Completo

mantenere il possesso del bus, può generare uno start ripetuto (fig. 4.16) e indirizzare uno nuovo slave senza aver prima generato una condizione di stop, come già accennato. Se durante una trasmissione il master intende cambiare la direzione di trasferimento passando da lettura in scrittura o viceversa, sarà necessario ripetere lo start e il byte di indirizzo, mutando il valore dell'ottavo bit di questo. Ovviamente se il master intende passare da ricevitore a trasmettitore, prima di generare il segnale di restart dovrà dare il no acknowledge per interrompere la trasmissione dati da parte dello slave.

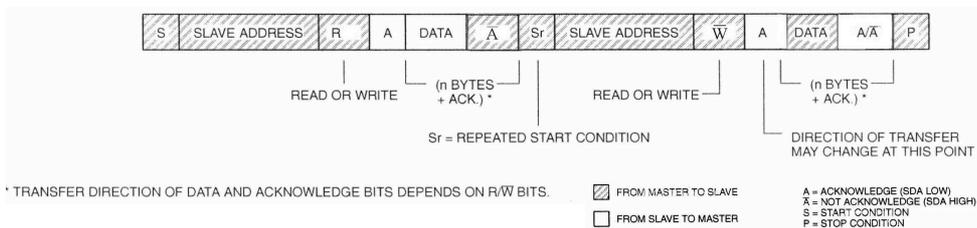


Figura 4.16: Formato Combinato

Capitolo 5

Progettazione e realizzazione del software per i DCS degli RPC

Il passo successivo nella progettazione del sistema del DCS per gli RPC del barrel, consiste nella realizzazione del sistema di controllo a livello di supervisore per la struttura hardware del DCS descritta nel precedente capitolo. Il sistema sviluppato utilizza le funzionalità offerte dalla soluzione SCADA scelta per tutti gli esperimenti di LHC e integra i propri compiti all'interno del sistema generale di controllo di CMS. I principali requisiti richiesti nella progettazione del sistema nascono in relazione alla complessità ed eterogeneità della rete di controllo. Infatti la struttura generale del sistema di controllo di un esperimento di fisica delle alte energie è sviluppata secondo una struttura multilivello, come visualizzato in figura 5.1, in cui il funzionamento di ogni singolo elemento è controllato e monitorato distribuendo le risorse e i compiti tra componenti remoti e locali. La gestione, l'interfacciamento e la redistribuzione delle risorse, sono fra i principali compiti richiesti ad un sistema SCADA per lo sviluppo di un sistema completo ed automatico di gestione dell'intera rete.

I principali requisiti su cui è stato sviluppato il sistema di DCS per gli RPC del barrel di CMS sono:

- Struttura gerarchica e modulare dell'architettura del sistema

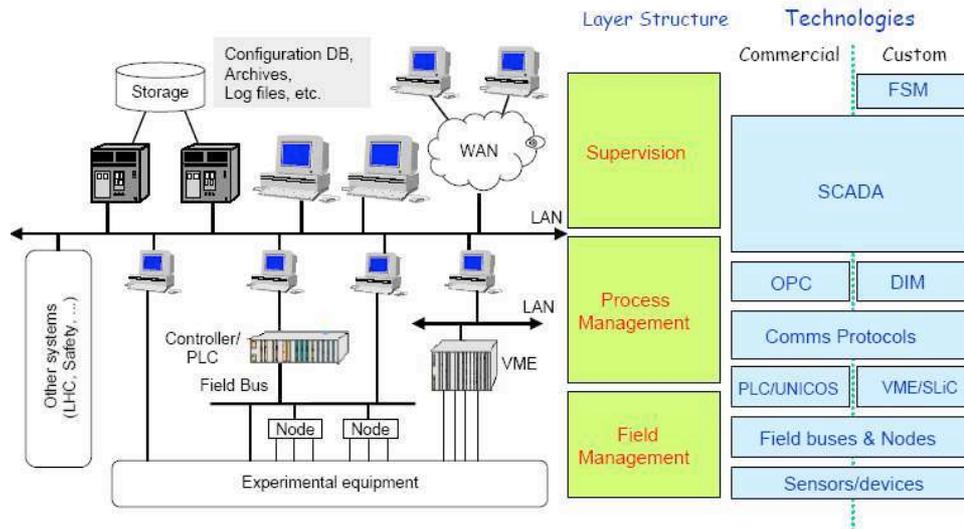


Figura 5.1: Architettura hardware del DCS.

- Interfacciamento e controllo delle infrastrutture relative al sistema di alimentazione e al sistema di controllo dei parametri ambientali
- Semplicità d'integrazione all'interno del DCS generale
- Sistema automatizzato per il controllo dei componenti del sistema e per lo sviluppo delle procedure di recupero.
- Interfaccia User-friendly per la gestione e il controllo dei singoli sottosistemi

5.1 Il software utilizzato

5.1.1 PVSS II

Il sistema SCADA utilizzato nello sviluppo del sistema di controllo scelto al LHC è il software PVSS II (Process Visualization and Control System) della ETM [50]. I principali compiti di un sistema SCADA sono comunicare con tutte le device, sia hardware che software, acquisire i dati prodotti e supervisionare le fasi di inizializzazione, configurazione e operazione. PVSS II è

Progettazione e realizzazione del software per i DCS degli RP09

in grado di sviluppare tali requisiti attraverso un software flessibile ed *open-source* per l'interfacciamento uomo macchina e per il controllo dei processi automatici, offrendo le seguenti caratteristiche:

Database run-time Fornisce una rappresentazione in tempo reale della device attraverso un set di variabili (*datapoint*), facilitandone le procedure di accesso, di analisi e visualizzazione.

Database interno Permette l'archiviazione a lungo termine delle informazioni raccolte dalle singole device

Generazione e gestione di allarmi Offre un semplice e potente strumento di gestione delle condizioni di allarme sui singoli elementi e sulla loro evoluzione nel tempo mediante un'apposita interfaccia grafica

Interfaccia grafica (GEDI) Consente lo sviluppo e l'implementazione di interfacce per controllare il comportamento del sistema

Scripting Consente agli utenti di interagire con i dati immagazzinati sia attraverso le interfacce grafiche che tramite processi in "background", attraverso una serie di script custom in linguaggio C e includendo una serie di librerie ausiliari.

PARA Offre un tool grafico che permette una semplice e completa gestione delle informazioni sui parametri acquisiti da ogni device. Consente di definire la struttura del database interno, i valori da archiviare e le condizioni di allarme da settare sui singoli valori o gruppi.

Driver interni Gestisce la comunicazione tra PVSS e le device, sia hardware che software, da supervisionare. Fornisce i drivers ai più comuni elementi che costituiscono un sistema di controllo quali OPC, Profibus, CanBus e TCP/IP

5.1.2 Architettura del software di PVSS II

L'architettura del software è sviluppata in maniera distribuita attraverso il lavoro cooperativo di svariati processi, definiti nel linguaggio di PVSS *Manager*. I singoli Manager comunicano tra loro attraverso un protocollo interno

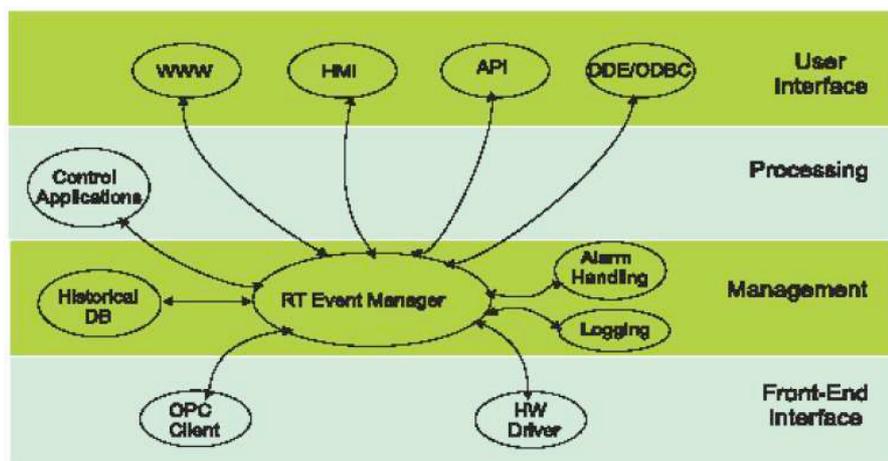


Figura 5.2: Architettura del software.

basato su TCP/IP all'interno di un'architettura a stella il cui cuore è formato dall'Event Manager che coordina la comunicazione con gli altri manager eseguibili contemporaneamente, come mostrato in figura 5.2.

Oltre ai classici manager che implementano le funzioni standard di un sistema SCADA quali l'archiviazione, la gestione degli allarmi e degli accessi, PVSS offre una serie di manager con funzionalità fondamentali per un sistema di controllo distribuito. L'interfaccia con i componenti di front-end per l'acquisizione e il controllo è gestita tramite dedicati manager controllati dall'event manager. Il livello di interfaccia utente prevede tutte le possibili interazioni del sistema con l'esterno. PVSS II offre infatti un'utile e pluri-funzionale interfaccia uomo macchina (HMI) sviluppabile mediante oggetti grafici a cui è possibile associare differenti variabili e applicazioni. Include inoltre la possibilità di accesso remoto attraverso un server che sfrutta le caratteristiche del World Wide Web. La comunicazione con applicazioni esterne o con elementi custom non riconosciuti dal PVSS possono essere sviluppate creando opportune API manager in linguaggio C++ attraverso le quali interfacciare l'event manager. Il livello di elaborazione si sviluppa attraverso le control manager che consentono di elaborare script in linguaggio proprietario indipendentemente da sistemi esterni; mediante tale funziona-

Progettazione e realizzazione del software per i DCS degli RP011

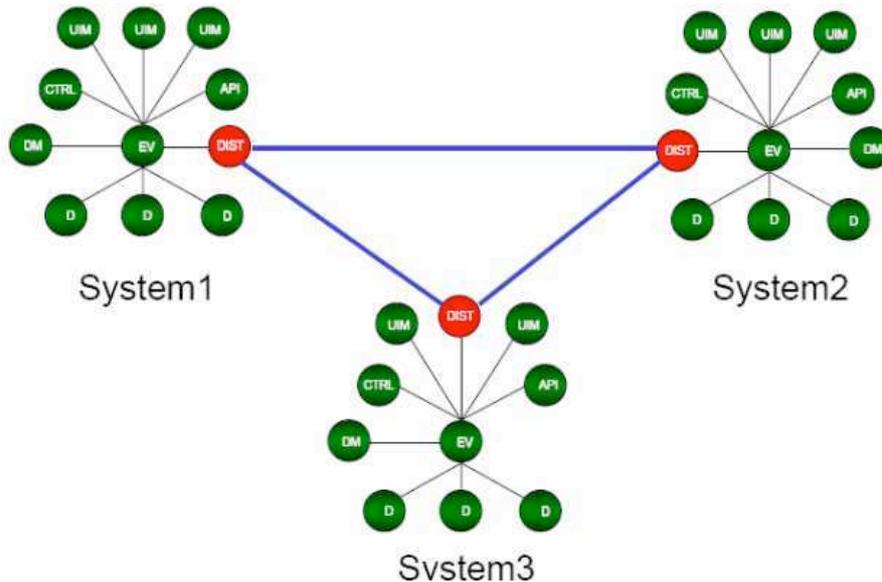


Figura 5.3: Sviluppo del sistema distribuito mediante le funzionalità offerte da PVSS II.

lità è possibile implementare il sistema come una macchina a stati. Tale tipo di architettura è ottimizzata per la formazione di una rete distribuita all'interno della quale sistemi indipendenti di PVSS possono comunicare tra di loro attraverso la rete ed avere accesso alle informazioni attraverso i singoli *datapoint*, come illustrato in figura. La comunicazione è gestita attraverso appositi manager (Distribution Manager) che collegano tra di loro i singoli sottosistemi indipendenti rendendoli trasparenti agli altri manager. Grazie a tale logica è possibile collegare tra loro i DCS dei singoli sottosistemi (Muon DCS, ECAL DCS, TK DCS, ...) rendendo il sistema scalare, partizionabile e modulare. Un punto forte di PVSS II è la gestione della struttura delle variabili acquisite dal sistema. A differenza della maggior parte dei tool SCADA che offrono un approccio tag-oriented, il sistema di gestione dei dati da parte di PVSS è di tipo device-oriented, grazie al quale si conserva l'informazione gerarchica della struttura e si sfruttano le potenzialità offerte dall'approccio object-oriented facilitando la partizionabilità e la scalabilità delle applicazioni. Ogni oggetto è infatti strutturato seguendo un modello di *datapoint*, in

cui attraverso una serie di *data elements* si definisce la serie di variabili che costituiscono la device. Analogamente ad una classe per gli OO, è possibile strutturare la singola device come una collezione di attributi che consente di definire totalmente le proprie caratteristiche all'interno del software.

5.1.3 Il Framework del JCOP

Uno delle caratteristiche principali che hanno influito sulla scelta di PVSS II come sistema SCADA per il controllo è la sua facilità di integrazione a nuovi componenti e la sua struttura aperta che consente miglorie e semplicità di sviluppo. Tale caratteristica è stata utilizzata per far fronte ad alcune limitazione presenti all'interno del software e per sviluppare una soluzione completa adatta per i fini specifici degli esperimenti di LHC. Per tale motivo è stato sviluppato dal JCOP [53] un framework da integrare all'interno di PVSS in grado di ricoprire le funzionalità richieste nello sviluppo dei vari sottosistemi e per fornire delle linee guida comuni. Gli aspetti principali su cui si concentrano le miglorie introdotte dal framework si basano sull'integrazione

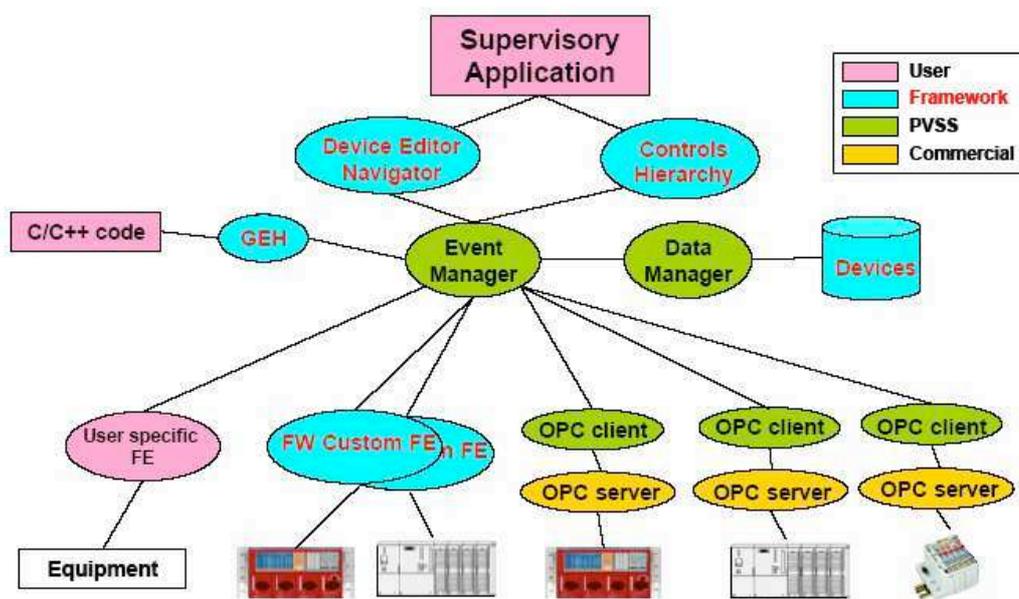


Figura 5.4: Componenti aggiuntivi integrati col framework.

Progettazione e realizzazione del software per i DCS degli RPQ13

di device comuni configurabili per particolari applicazioni e sull'apporto di ulteriori tools. Una device è un' entità che rappresenta una porzione dell'hardware o un gruppo logico di tali entità. All'interno del framework sono implementate una serie di librerie che consentono di riconoscere e interfacciare le più comuni device utilizzate all'interno degli esperimenti (moduli di alta e bassa tensione, CANbus, ELMB [44],...) facilitandone l'integrazione e la gestione all'interno dei singoli DCS. Altra caratteristica importante offerta dal framework è costituita da una serie di utility implementati dal JCOP [52], che integrano le funzionalità offerte da PVSS II, facilitando la progettazione e realizzazione dei singoli DCS:

Device Editor and Navigator Fornisce un'intuitiva e semplice visualizzazione della struttura interna del sistema utile per costruire la struttura gerarchica del sistema.

Component Installation Fornisce una serie di facilitazioni per l'installazione all'interno del sistema dei componenti integrati nel framework.

Control Hierarchy Facilita lo sviluppo e la definizione della gerarchia delle singole device e ne definisce il comportamento sfruttando la logica delle macchine a stati finiti.

Mass Configuration Tool che potenzia la gestione delle device consentendo la loro configurazione globale

Trending Tool Estende le potenzialità di PVSS permettendo un'analisi delle caratteristiche dei singoli componenti attraverso l'integrazione di strumenti grafici quali plot, grafici e template.

Configuration database Permette la gestione e l'archiviazione dei dati gestendo l'interfacciamento con sistemi esterni più completi del database interno di PVSS II.

Generic External Handling Consente l'integrazione, all'interno dei pannelli dell'interfaccia utente, di codici scritti in linguaggi C/C++.

L'integrazione dei componenti del framework all'interno del DCS consente di sviluppare un'architettura per il sistema del tipo descritta in figura 5.4. Sfruttando le potenzialità offerte da tale ambiente, in relazione alle linee guida imposte dal framework per la realizzazione e l'integrazione dei singoli sistemi, è stato sviluppato il sistema di supervisione del DCS per gli RPC del barrel, le cui caratteristiche e funzionalità verranno descritte nei prossimi paragrafi.

5.2 Realizzazione del sistema

L'aspetto centrale di tutto il lavoro di tesi è stato quello di sviluppare il sistema di supervisione del DCS degli RPC del barrel. Il suo compito principale è controllare e monitorare il corretto funzionamento del rivelatore ad RPC e di tutte le sue infrastrutture connesse. In particolare il sistema sviluppato si fa carico di controllare il sistema di potenza (alta e bassa tensione) e quello di misura delle condizioni ambientali, sviluppato mediante una serie di sonde poste all'interno di ogni camera. La struttura è stata sviluppata utilizzando i componenti hardware descritti nei precedenti capitoli e rispondendo ai requisiti richiesti per la progettazione di un sistema di DCS per un esperimento di LHC [56].

5.2.1 Architettura del sistema del DCS degli RPC

La rappresentazione del sistema dal punto di vista del supervisore si sviluppa in relazione al modo in cui sono interpretate e descritte le singole device. Ogni device è interpretata dal sistema SCADA come un oggetto, definito attraverso una serie di variabili che ne descrivono le caratteristiche ed il comportamento, accessibili sia dall'operatore umano che dai singoli processi. L'architettura del sistema nasce da tale rappresentazione e sviluppa le interconnessioni tra gli oggetti attraverso una struttura ad albero. Tale punto di vista consente di avere una visione completa e gerarchica del sistema, ottimizzando la propagazione delle informazioni e dei comandi. L'albero è costituito da due tipi di nodi: le "device unit", attraverso le quali si monitora e controlla la strumentazione che rappresentano, e le "control unit", descritte

Progettazione e realizzazione del software per i DCS degli RPC15

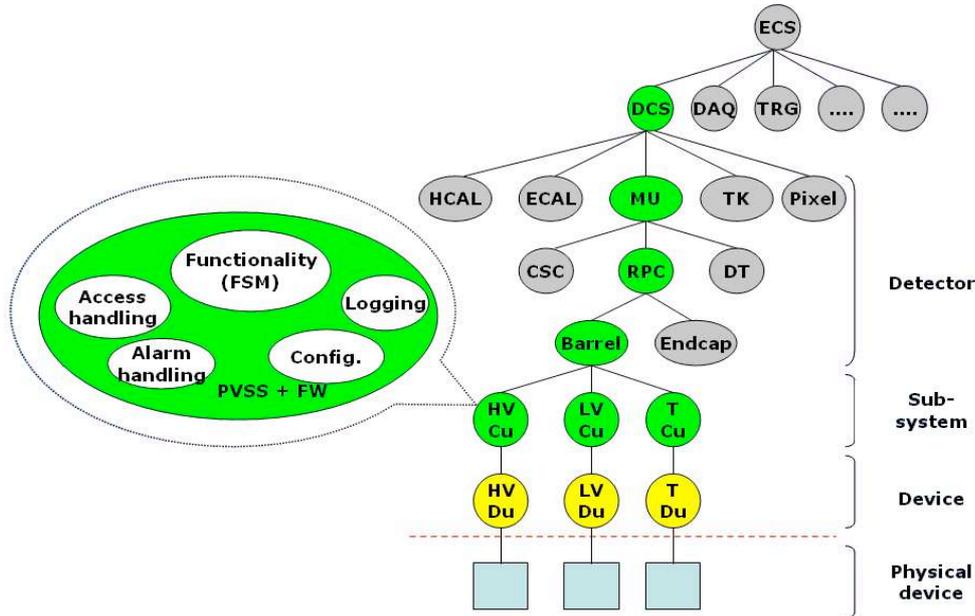


Figura 5.5: Integrazione del DCS per gli RPC all'interno del sistema generale di DCS. Sono evidenziate le funzionalità disponibili per ogni CU

da una serie di script o attraverso un modello di macchina a stati finiti, col compito di gestire e controllare il funzionamento del sottoalbero. Ogni nodo dell'albero, sia esso una "device unit" o una "control unit", restituisce informazioni e può ricevere comandi, sia da un nodo superiore sia attraverso un operatore umano. In tale gerarchia la trasmissione dei comandi si sviluppa dal livello superiore verso i nodi foglia, mentre le informazioni sullo stato del sistema e sugli allarmi si propagano dalle device verso la radice dell'albero. Tale struttura è ottimizzata per consentire una semplice integrazione del sistema del DCS degli RPC all'interno del DCS generale di CMS; ciò avviene semplicemente collegando il nodo radice del DCS degli RPC al nodo relativo della struttura globale del sistema, purchè siano adattati i comandi e le condizioni di status fra i due sistemi, come descritto in figura 5.5. In tal modo l'intera struttura può essere sia controllata dal sistema centrale che riceve le informazioni sullo stato e sugli allarmi dei singoli sottosistemi e ne comanda il funzionamento, che localmente dal nodo RPC.

Naturalmente è possibile sviluppare la gerarchia nel sistema in più modi,

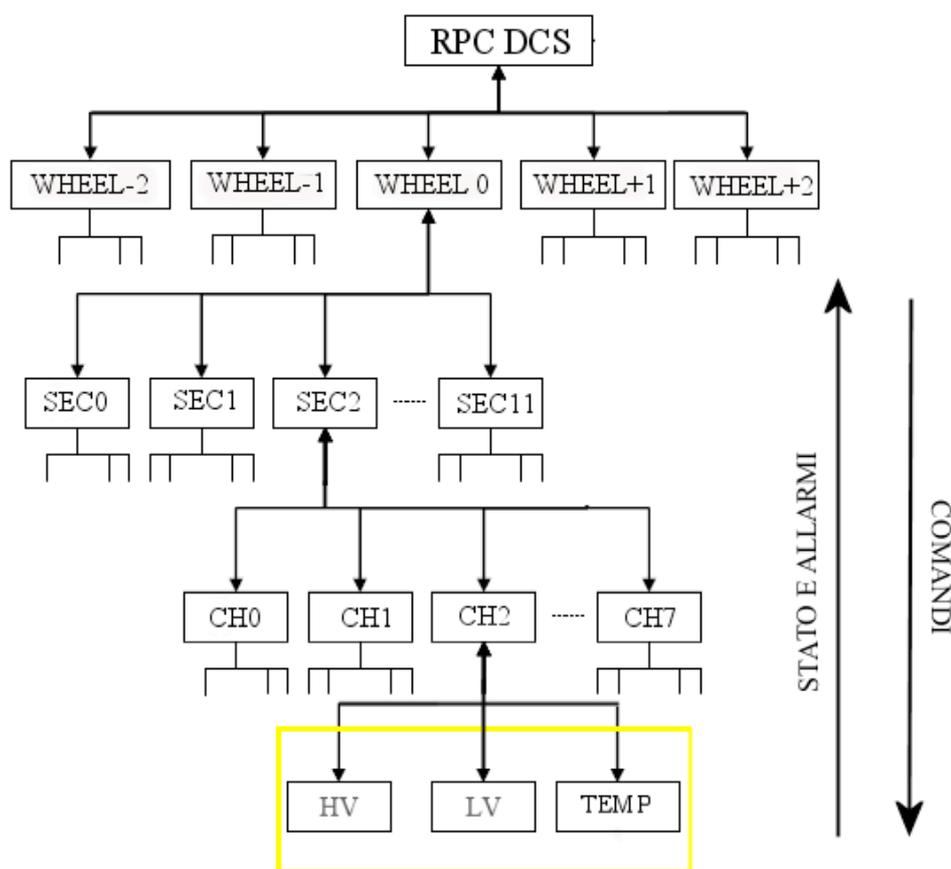


Figura 5.6: Struttura gerarchica del sistema del DCS in relazione alla distribuzione geografica dei componenti.

mettendo in evidenza differenti punti di vista. Nella progettazione del DCS degli RPC sono state sviluppate due gerarchie differenti e complementari che descrivono il sistema in relazione sia alla distribuzione logica dell'hardware che a quella geografica. La struttura logica descrive il sistema in relazione alla distribuzione fisica dei componenti dell'hardware: i vari nodi sono descritti dai componenti che compongono i singoli sottosistemi. Nel caso del sistema di distribuzione delle tensioni, ad esempio, il nodo radice è rappresentato dal sistema di alimentazione generale e ramifica la propria gerarchia in funzione dei singoli rack, dei crate EASY fino alle singole schede di alimentazione che rappresentano i nodi foglia della struttura. La struttura geografica mette in

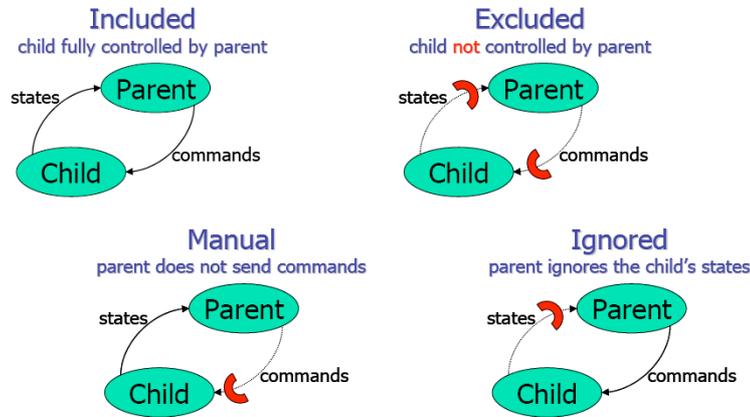


Figura 5.7: Possibili modalità di comunicazione tra CU.

evidenza al contrario la distribuzione delle risorse hardware in relazione agli elementi che gestiscono; di conseguenza i singoli sottosistemi sono suddivisi in relazione alla loro distribuzione in termini di ruota, settore e camera, come mostrato in figura 5.6. L'elemento camera rappresenta l'unità di controllo base per la quale verranno definite le singole device fisiche ad esso connesse consentendo, in tal modo, un controllo completo del funzionamento di tale entità. Una delle principali peculiarità della struttura gerarchica è la partizionabilità del sistema che consente di controllare e monitorare parti della struttura indipendentemente dal sistema globale e simultaneamente ad altri sottosistemi, per le fasi di test e di calibrazione dei singoli sottosistemi. Per ogni unità di controllo è infatti selezionabile nell'ambiente software la modalità di inclusione ed esclusione che definisce il livello di interconnessione con i relativi nodi figli. Il sistema sviluppato offre la possibilità di selezionare fino a quattro modalità differenti [55] [51]: Included, Excluded, Manual e Ignored. Le prime due (fig. 5.7) consentono di abilitare o disabilitare totalmente la comunicazione fra i nodi in entrambe le direzione, mentre le ulteriori modalità consentono di avere una comunicazione parziale tra i singoli oggetti escludendo la trasmissione verso l'alto delle informazioni sugli stati dei singoli nodi o verso il basso dei comandi da sviluppare.

5.2.2 Macchina a stati finiti

Il cuore dei DCS degli RPC è la sua macchina a stati [61], sviluppata nell'ambito di questa tesi, e provata ed analizzata presso i laboratori del CERN nel Febbraio 05 in collaborazione con i membri del JCOP. Un vantaggio introdotto nell'adozione di un'architettura gerarchica del sistema consiste nel sviluppare un sistema di controllo verticale, in cui le operazioni sono distribuite alle singole sottounità che devono farsi carico di tradurle in azioni semplici. Naturalmente una struttura così complessa ed articolata impone un alto tasso di automatizzazione nei processi di controllo per prevenire eventuali errori umani e per ottimizzare le procedure di recupero.

Il problema di creare un sistema di controllo automatico è correlato alla capacità di fornire un'accurata descrizione, dell'esperimento e delle possibili evoluzioni, in termini di oggetti da essere controllati e di procedure da compiere su di essi. Tale rappresentazione può essere sviluppata simulando il comportamento di tali oggetti, definiti da entità fisiche e astratte del sistema e correlati all'interno della struttura gerarchica, mediante automi a stati finiti, che ne definiscono il modello comportamentale. Tale compito è sviluppato all'interno della struttura gerarchica dalle unità di controllo, oggetti astratti modellabili come FSM.

Ogni unità di controllo deve prendere decisioni autonomamente in relazione alle condizioni dei suoi nodi figli e deve elaborare una serie di procedure per assicurare il corretto funzionamento del sistema. Tutto ciò è sviluppato mediante una serie finita di stati per ogni CU che definiscono tutte le possibili configurazioni in cui può evolvere il sistema; ad ogni stato è inoltre associata una serie di azioni possibili attraverso le quali il sistema gestisce e controlla l'evoluzione degli stati dei relativi sottosistemi. La stessa logica è applicabile alle DU che implementano l'interfaccia del sistema con oggetti fisici reali. Ognuna è descritta da una serie di stati possibili e per ogni stato presenta un numero finito di azioni; compito della DU è tradurre tali azioni in una serie di comandi da sviluppare direttamente sulle singole device (sui relativi *datapoint*) e definire il proprio stato in relazione allo stato della device. La rete di comunicazione sviluppata collegando i singoli oggetti definisce il flusso

Progettazione e realizzazione del software per i DCS degli RPC19

globale di controllo del sistema consentendo, in tal modo, l'esecuzione simultanea di singole operazioni e di processi di controllo che rendono il sistema stabile ed efficiente.

Le potenzialità delle FSM [62] sono inserite all'interno della soluzione SCADA scelta, attraverso un componente apposito del framework: SMI++ [48]. SMI++ (State Management Interface), integrato all'interno di PVSS II mediante un'apposita API Manager, è un tool in grado di controllare l'evoluzione del sistema permettendo la rappresentazione di un qualsiasi sottosistema come una collezione di oggetti, aventi ognuno il comportamento di una FSM. Attraverso una veste grafica semplice e completa, consente di strutturare ogni CU come una FSM definendo:

- i possibili stati,
- le transizioni ammesse tra i vari stati in relazione ai comandi acquisiti,
- le possibili azioni da sviluppare sui relativi sottosistemi

Tali funzionalità sono state sviluppate all'interno del sistema del DCS degli RPC per ognuna delle CU definite nella gerarchia del sistema (fig.5.6). Sono stati definiti gli stati relativi agli oggetti astratti RPC, ruota, settore e camera attraverso i quali definire il comportamento di ogni elemento della gerarchia. Ogni stato rappresenta una determinata configurazione che assume il sistema in relazione alle proprie caratteristiche e alle sue possibili evoluzioni. Per ognuno degli stati è stato inoltre sviluppato un insieme di azioni possibili attraverso le quali implementare il controllo sui singoli componenti, definire le transizione tra stati differenti e sviluppare le possibili operazioni di recupero sull'intero apparato. Naturalmente il sistema è stato sviluppato in modo da ottimizzare la comunicazione verticale tra i singoli oggetti e col sistema generale del DCS col quale deve interfacciarsi. Affinché il sistema sia in grado di essere controllato dal DCS generale è infatti necessario che i comandi provenienti da questo siano interpretati in condizioni di stato logiche per il sistema RPC e che, a sua volta, le particolari condizioni del sistema, trasmesse verso l'alto, siano interpretabili dal sistema centrale. L'adattamento dei comandi provenienti dall'alto e la traduzione in azioni e

stati compatibili con il sistema generale è compito del nodo radice del sistema RPC che è stato implementato, seguendo le direttive imposte dal sistema generale [31], nei seguenti stati descritti in figura 5.8:

ON Il sistema è pronto per la presa dati il che corrisponde ad avere tutti i sottorivelatori pronti ad acquisire i dati. Quando l'operatore vede dal Run Control che il sistema centrale dei DCS è in questo stato può decidere in ogni momento di iniziare la presa dati.

OFF Il sistema e quindi tutti i sottorivelatori sono spenti e sono quindi in uno stato di estrema sicurezza (safe) il che consente agli operatore della macchina acceleratrice di compiere eventuali test o eventuali fasi d'iniezione dei fasci, che richiedono che tutti i rivelatori siano spenti ed in uno stato estremamente sicuro.

STANDBY Il sistema si trova in uno stato ibrido in cui non è ne ON ne OFF ma in uno stato intermedio abbastanza tranquillo da consentire agli operatori della macchina di compiere le operazione necessarie per preparare i fasci alla fase di collisioni. Ogni sottorivelatore può definire a suo piacimento le condizioni per essere in standby.

ERROR il sistema è in errore avendo identificato una condizione possibile di malfunzionamento. In tale condizione il sistema risponde iniziando una serie di procedure per il recupero del sistema e sviluppa una stima dell'eventuale inefficienza del sistema globale dovuta al malfunzionamento da trasmettere come parametro al run control.

Gli oggetti astratti camera, settore e ruota sono sviluppati attraverso una logica comune assicurando compatibilità nella comunicazione tra oggetti. Il loro stato sarà definito dallo stato dei relativi figli o dalla condizione di Majority, qualora presente. La condizione di Majority è un utile strumento che consente di scorrelare il comportamento del nodo padre dallo stato dei singoli figli indipendentemente, stimandolo in relazione alla caratteristica predominante dell'intera figliata. Ciò consente di definire lo stato del sistema in maniera meno rigida rendendo il sistema più stabile.

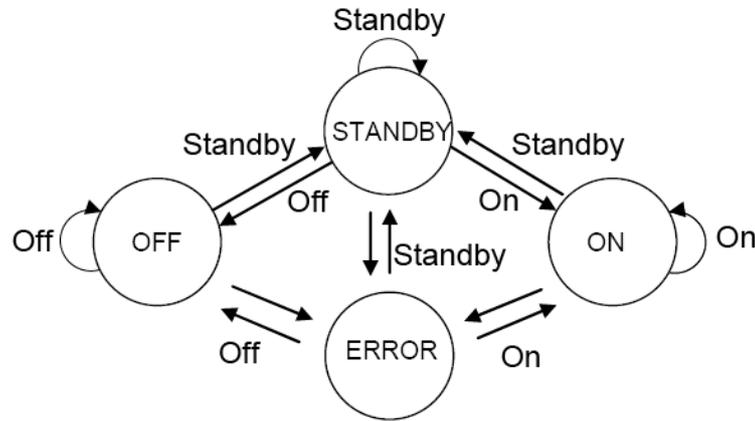


Figura 5.8: Diagramma a bolle per la FSM del DCS generale.

Per ogni oggetto il set di stati è definito in relazione alle possibili macro-configurazioni del sistema legate alle caratteristiche operative degli RPC. La scelta degli stati e la struttura della macchina a stati è uno dei cardini del sistema di DCS di un sottorivelatore ed è per gli RPC uno dei punti centrali del lavoro di testi. La fase di progettazione è partita da uno studio approfondito del rivelatore e dei suoi componenti hardware, che sono stati ampiamente descritti nei capitoli precedenti, e dallo studio delle varie fasi che comportano la preparazione dei fasci e la presa dati e quindi degli stati del DCS centrale. Per quanto riguarda gli RPC le operazioni più delicate da compiere sono relative ai sistemi di potenza, a quello del gas ed a quello del cooling. Questi ultimi due devono sempre essere in funzione e quindi sempre nello stato ON e devono funzionare sia nel caso in cui si stanno prendendo dati (physics), che nel caso in cui la macchina sta preparando i fasci (injection, tuning...) o nel caso in cui ogni sottorivelatore stia compiendo le sue calibrazioni (calibration). Sia il sistema dal gas che del cooling sono quindi disaccoppiati dalle operazioni effettuate della macchina e del rivelatore cosa assolutamente non vera per il sistema di potenza che è invece fortemente correlato alle varie operazioni possibili. Il rivelatore ad RPC, nonostante sia abbastanza lontano dal punto d'interazione dei fasci e cioè dalla zona dove il background e quindi la radiazione sono estremamente alti, risente fortemente

delle condizioni di background ed è quindi necessario che per motivi di sicurezza sia la gap di gas che l'elettronica di front-end siano spente del tutto nel caso in cui i fasci non siano ancora stabili e puliti e quindi il background non sia ancora sufficientemente basso. Tradurre queste affermazioni in numeri è per il momento impossibile visto che non si hanno ancora prove sperimentali del noise della macchina e di quanto questo possa arrivare all'interno delle gap del ferro, ma in ogni caso partendo dall'esperienza dei precedenti esperimenti, si è deciso di aver bisogno di uno stato OFF in cui sia tutto spento e quindi al sicuro. Viceversa per la presa dati o per le calibrazioni è necessario uno stato ON, mentre tutta una serie di stati intermedi sono stati decisi sulla base dell'esperienza e dopo molte discussioni avute sia con i membri della collaborazione degli RPC che con i membri del DCS Working Group e del JCOP. La macchina a stati per gli RPC, mostrata in figura 5.9 è quindi composta dai seguenti stati:

- ON
- OFF
- STANDBY
- RAMP1STEP
- RAMP2STEP
- ERROR

dove nello STANDBY i rivelatori sono ad una tensione intermedia di circa 6 KV, tensione alla quale la gap è praticamente spenta ed in cui non si ha quindi nessun fenomeno di amplificazione e quindi di possibile danneggiamento, e la bassa tensione è OFF in modo da non rischiare di danneggiare l'elettronica di front-end a causa di un bust di particelle che può raggiungere per errore il rivelatore durante le fasi di fasci "sporchi". Gli stati RAMP1STEP e RAMP2STEP sono invece stati transienti che consentono di monitorare il comportamento del sistema quando è in evoluzione. Il sistema infine si porta nello stato di ERROR qualora si sia verificata una condizione di malfunzionamento in una delle hardware device o dei nodi del sistema. Il verificarsi di

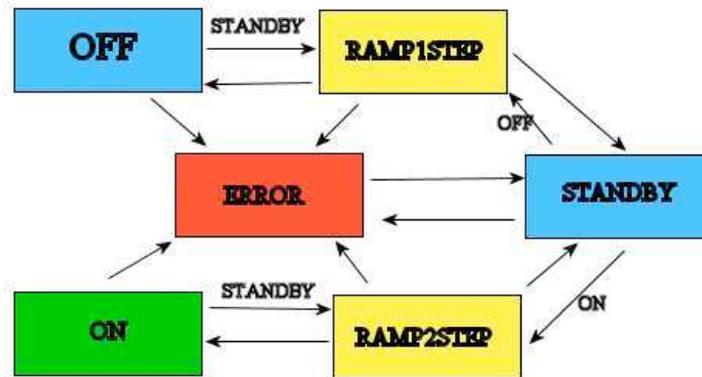


Figura 5.9: Diagramma a bolle per le FSM degli oggetti camera, settore e ruota

una condizione di errore in uno dei sottosistemi, sia DU che CU, comporta una serie di azioni da parte del sistema che mirano a proteggerlo da ulteriori danneggiamenti ed a sviluppare una serie di procedure per il recupero delle condizioni di funzionamento.

A differenza delle Control Unit, le Device Unit non implementano un comportamento logico come FSM, ma sviluppano la traduzione dei comandi delle CU in azioni sulle singole device definendo dalla configurazione di queste il relativo stato. Le DU integrate nel sistema di DCS per gli RPC sviluppato, consentono di interagire con i componenti hardware del sistema descritti precedentemente. Particolare attenzione nella progettazione del sistema è stata data nella definizione degli stati possibili per le DU del sistema di alimentazione. Il comportamento dei singoli regolatori di tensione è infatti implementato mediante una serie di 7 stati (ON, OFF, RAMPING_UP, RAMPING_DOWN, WARNING, TRIPPED, ERROR) che consentono di sviluppare un quadro completo del funzionamento del sistema e di controllare completamente le operazioni del modulo.

5.2.3 Il sistema degli allarmi

Una funzionalità importante in un sistema di controllo è rappresentata dallo sviluppo e dalla gestione delle condizioni di allarme. Il concetto di allarme in-

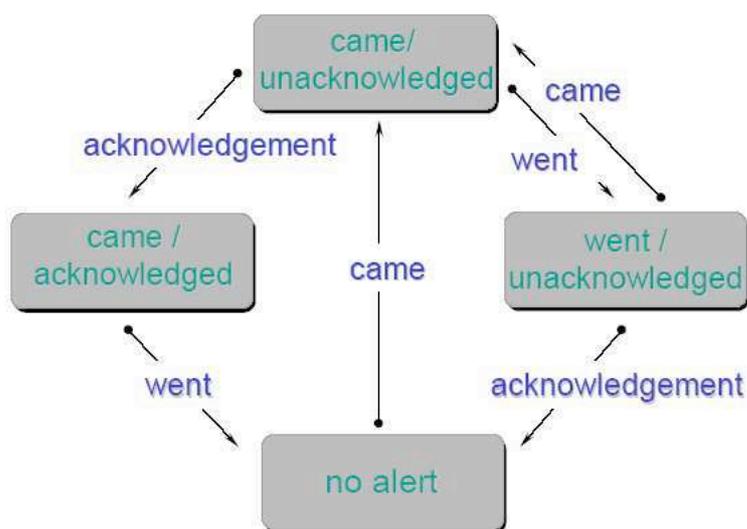


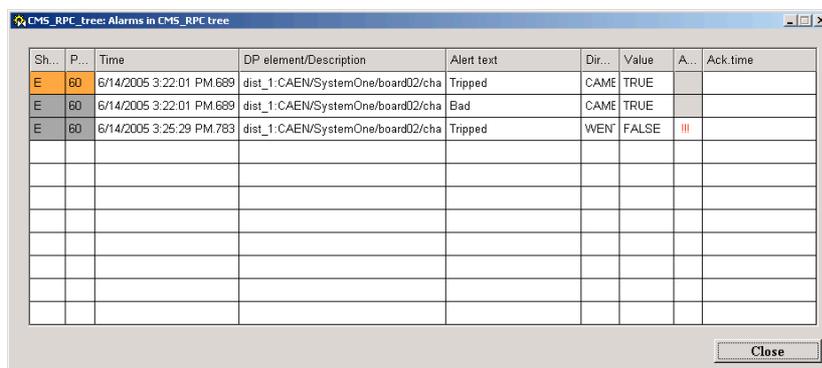
Figura 5.10: Concetto di Acknowledge per gli allarmi.

dica una condizione di errore o uno stato indesiderato del sistema di controllo, che si presenti qualora uno o più parametri deviano dal valore aspettato o escano al di fuori di un range prestabilito.

Lo scopo principale del sistema di gestione degli allarmi è informare l'operatore umano dello svilupparsi di una condizione anomala sul funzionamento del sistema, integrando una serie di informazioni che descrivono dettagliatamente l'evento. Differentemente dalla logica utilizzata nelle FSM, la presenza di un allarme non implica alcuna azione automatica da parte del sistema, vincolando tale prerogativa all'operatore umano a cui tale informazione è indirizzata. Il framework del JCOP, integrando le caratteristiche di PVSS a riguardo, ha sviluppato una struttura per la gestione degli allarmi completa e coerente che consente di implementare diverse tipologie di errore. Ad ogni singola device possono essere infatti associate delle specifiche condizioni di controllo di eventuali malfunzionamenti sfruttando la rappresentazione del comportamento della device mediante *datapoint*. Su ogni variabile è possibile associare una condizione di controllo di errore di tipo binario se il comportamento dell'elemento segue una logica booleana, oppure di tipo analogico se la variabile varia con continuità; ogni condizione d'errore è inoltre corredata

Progettazione e realizzazione del software per i DCS degli RPC25

da una serie di informazioni ausiliari che migliorano la comprensione della natura dell'allarme, quali l'origine, il livello di severità e la dipendenza da altri allarmi. Un'ulteriore funzionalità offerta del sistema di gestione degli allarmi è implementata attraverso il Summary Alarm, ovvero una struttura di allarme composta che rappresenta lo stato degli elementi che lo compongono. L'allarme descritto dal Summary Alarm è sviluppato in relazione alle condizioni di allarme, ad uguale priorità, delle singole device che lo compongono: la condizione trasmessa dal Summary Alarm è infatti definita dalla condizione di livello di severità maggiore dei singoli sottoelementi. Un quadro completo dell'evoluzione delle condizioni dei singoli allarmi è descritto in figura 5.11 dove è evidente la possibilità, offerta dal framework, di sviluppare un comando di avvenuta ricezione dell'informazione da parte dell'operatore. Qualora la condizione di allarme richieda un'attenzione particolare da parte dell'operatore, è possibile imporre la conferma di Acknowledge da parte dell'operatore affinché il sistema degli allarmi ritorni in condizioni operative. I livelli di severità definiti all'interno del framework per la descrizione del sistema sono rappresentati dalle seguenti classi a severità crescente: Warning, Error e Fatal, a cui è possibile aggiungere un'eventuale richiesta di Acknowledge. L'intero sistema degli allarmi è monitorato attraverso un'apposita interfaccia grafica che consente, in ogni momento, di visualizzare la presenza di condizioni di errore e le relative informazioni su stato, natura e livello, e di operare alla loro risoluzione. Oltre alle normali condizioni di controllo sul funzionamento delle singole device, il sistema di gestione degli allarmi per gli RPC richiede un ulteriore controllo sul valore di corrente richiesta da ogni gap in relazione alle caratteristiche descritte nei precedenti capitoli. A tal fine è stato sviluppato una condizione di allarme di tipo analogico, con differenti livelli di severità a seconda dei limiti di tolleranza delle gap, per monitorare il valore di corrente richiesta sull'alimentazione da ogni camera. Sono stati inoltre implementati una serie di Summary Alarm col compito di descrivere lo stato globale delle condizioni di allarme di oggetti complessi, quali camere e settori, consentendo una visualizzazione geografica dell'evento di errore.



Sh...	P...	Time	DP element/Description	Alert text	Dir...	Value	A...	Ack time
E	60	6/14/2005 3:22:01 PM.689	dist_1:CAEN/SystemOne/board02/cha	Tripped	CAME	TRUE		
E	60	6/14/2005 3:22:01 PM.689	dist_1:CAEN/SystemOne/board02/cha	Bad	CAME	TRUE		
E	60	6/14/2005 3:25:29 PM.783	dist_1:CAEN/SystemOne/board02/cha	Tripped	WEN	FALSE	!!!	

Figura 5.11: Pannello per la rappresentazione globale degli allarmi. Per ogni evento registrato sono presenti ulteriori informazioni sulla natura dell'allarme, sulla device in cui si è presentato e il livello di severità d'allarme. E' inoltre possibile gestire gli *acknowledge* per ogni evento rappresentato.

5.2.4 L'interfaccia grafica

Un aspetto particolarmente curato nella progettazione del DCS per gli RPC è stato la realizzazione di un' interfaccia uomo macchina semplice e intuitiva in grado di semplificare le normali operazioni di controllo da parte dell'operatore. Tale interfaccia è stata sviluppata sfruttando l'ambiente GEDI messo a disposizione del pacchetto PVSS II, attraverso una serie di oggetti che facilitano l'interazione col sistema. La propagazione e la realizzazione delle azioni definite nell'interfaccia grafica è realizzata mediante una serie di script custom il cui comportamento è descritto in appendice A. Il sistema sviluppa la propria interoperatività con l'operatore umano mediante una veste grafica user-friendly sviluppata attraverso una serie di pannelli che implementano le seguenti funzionalità:

- Attraverso una combinazione di diagrammi sinottici, testo e oggetti grafici facilita la navigazione lungo l'intera struttura
- Consente di visualizzare e settare le principali caratteristiche del sistema attraverso oggetti grafici ed elementi di interfaccia collegati a variabili di processo.

Progettazione e realizzazione del software per i DCS degli RPC27

- Permette una semplice e immediata configurazione sia di massa che sui singoli parametri dell'intero sistema.
- Offre una serie di grafici e diagrammi per la visualizzazione dell'evoluzione nel tempo dei parametri più importanti sia sui dati online che su quelli immagazzinati nei database di sistema.
- Sviluppa una completa rappresentazione delle condizioni di allarme sugli elementi più critici, visualizzandone le caratteristiche.

Nella progettazione e realizzazione del sistema ogni singolo componente del sistema è stato sviluppato seguendo una serie di convenzioni e di linee guida [54]imposte dal JCOP per assicurare omogeneità e integrabilità fra i singoli sottosistemi. Di seguito sono presentati i principali pannelli sviluppati per la gestione del sistema di controllo e sono descritte le principali funzionalità implementate. La visualizzazione dell'intero sistema e della sua gerarchia è gestita mediante le funzionalità offerte dalla **Device Editor and Navigator**, integrata all'interno del framework. Mediante tale interfaccia è possibile navigare all'interno della struttura, definire i singoli nodi dell'albero e le relative proprietà. Le caratteristiche di tale pannello sono visualizzate in figura 5.12. I blocchi funzionali descritti dal pannello sono rappresentati in due settori distinti: da una parte è offerta la possibilità di visualizzare la struttura dell'albero in relazione alla distribuzione geografica dei costituenti, mentre dall'altra sono rappresentati i collegamenti logici in relazione all'hardware. La rappresentazione geografica descrive, seguendo le convenzioni per i nomi definite dal JCOP, il modo in cui gli oggetti ruota, camera e settore sono connessi tra loro e connessi con la radice dell'albero: il nodo RPC. La struttura logica invece descrive il sistema in relazione ai componenti hardware suddividendo le risorse in relazione ai relativi sottosistemi e alla loro distribuzione all'interno dei crate.

Il livello Top: RPC Node

Il pannello realizzato per la radice della struttura gerarchica del sistema è descritto in figura 5.13. Le informazioni in esso contenute, consentono all'o-

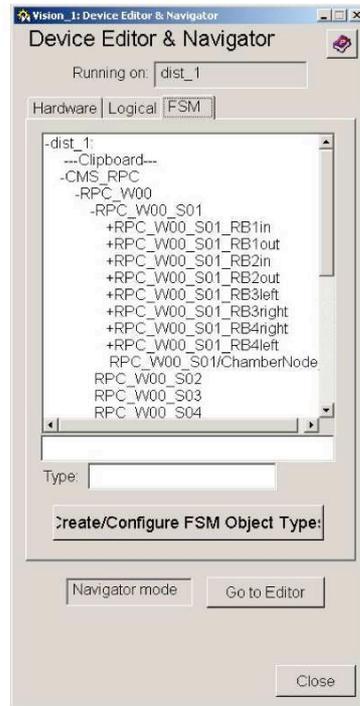


Figura 5.12: Device and Editor Navigator

peratore di avere una visione globale e completa del sistema e di monitorarne gli aspetti più rivelanti. Seguendo il template fornito dal JCOP per la realizzazione della gerarchia, ogni pannello presenta una sezione sulla sinistra contenente informazioni sullo stato dei relativi figli del nodo rappresentato, purchè questi siano delle unità di controllo. Per ogni nodo sono visualizzate le informazioni sullo stato e sulla modalità di partizione del sistema; è infatti possibile includere o escludere i singoli nodi da cui dipende il comportamento della macchina a stati. Una visione completa dell'apparato del barrel è offerta mediante una rappresentazione della struttura di ogni singola ruota, realizzata con oggetti semplici e interattivi. Per ogni ruota è possibile conoscere, grazie ai relativi colori, lo stato dei singoli settori che le compongono e le condizioni dei relativi Summary Alarm. Un'altra caratteristica di tale pannello è la possibilità di configurare l'intero sistema con pochi click

Progettazione e realizzazione del software per i DCS degli RPC29

mediante un'apposita finestra raggiungibile da tale pannello. E' infatti possibile settare le condizione per tutti gli allarmi, sia analogici che booleani, dell'intero barrel, scegliere le relative soglie e mascherare/smarcherare gruppi di allarmi. Mediante la stessa finestra di configurazione è possibile accedere ad una sezione per il settaggio delle principali funzionalità del sistema di archiviazione interno di PVSS, offrendo una completa configurabilità .

Il pannelli per le CU ruota, settore e camera

Scorrendo lungo un ramo dell'albero il primo nodo al di sotto della radice è costituito dall'elemento **Wheel** descritto dal pannello in figura 5.14. Il pan-

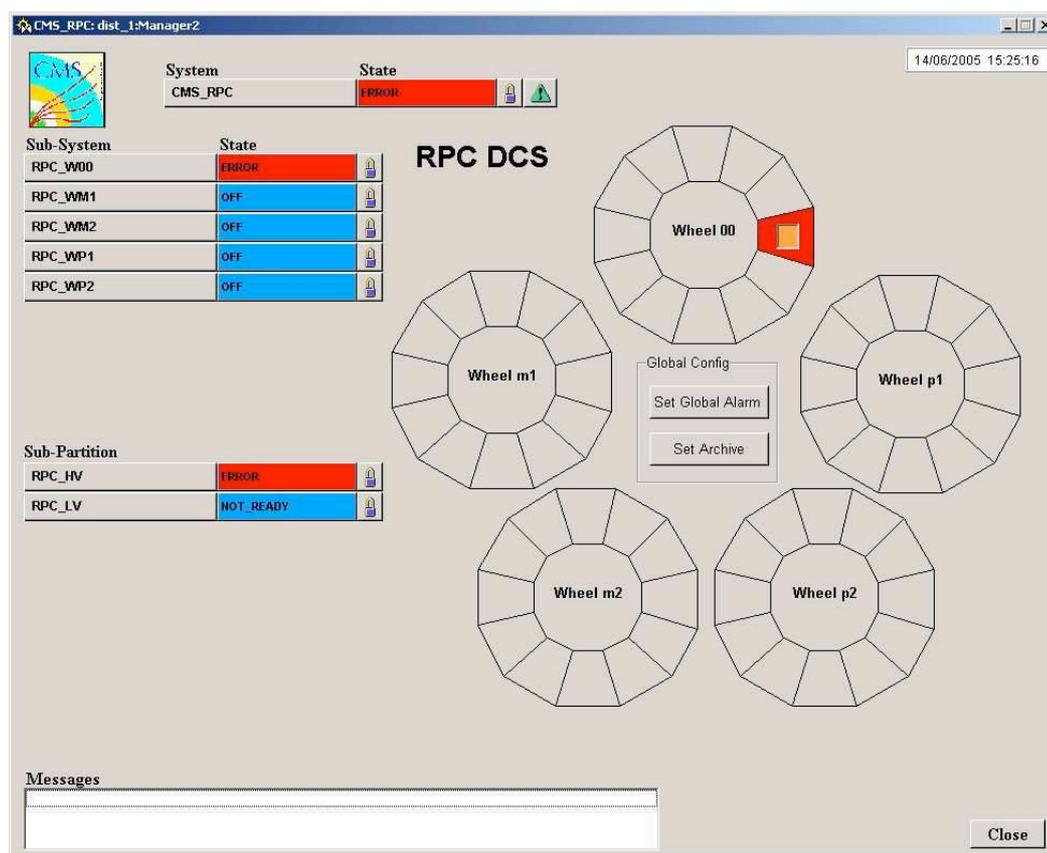


Figura 5.13: Pannello del nodo radice. Rappresenta l'intero sistema delle ruote del barrel visualizzando gli stati e gli allarmi per ogni settore

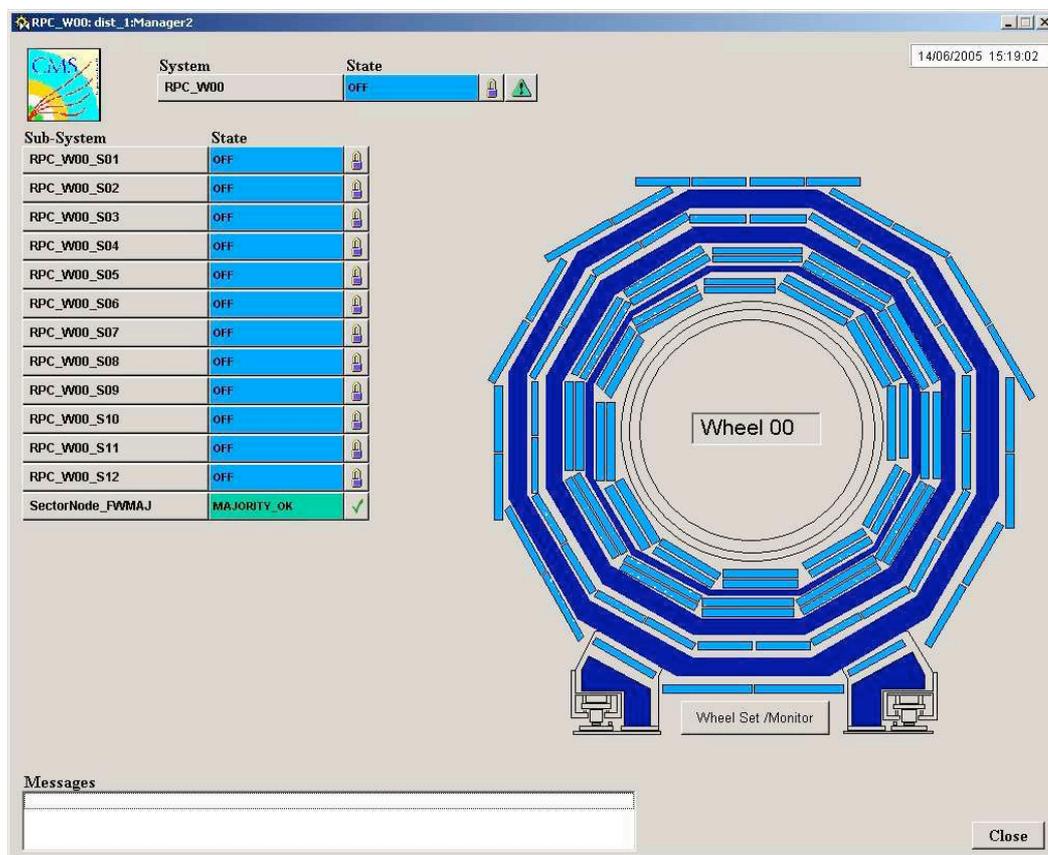


Figura 5.14: Pannello relativo alla ruota.

nello ricalca la distribuzione geografica degli risorse all'interno della ruota, facilitandone la loro identificazione nella struttura e le eventuali procedure di controllo diretto su di esse. Per ogni elemento è possibile visualizzare il relativo stato, descritto attraverso il relativo colore stabilito dal JCOP. In tale pannello è inoltre offerta la possibilità di settare e monitorare il funzionamento dell'intero hardware a disposizione differenziato rispetto ai singoli sottosistemi che lo compongono. Per questi oggetti è stata inoltre settata la condizione di Majority che consente di definire il comportamento globale della figliata ed eventualmente far dipendere da essa lo stato dell'oggetto.

Il livello inferiore alla ruota è rappresentato dall'oggetto **Sector** il cui pannello è descritto in figura 5.15. Il pannello conserva la struttura standard

Progettazione e realizzazione del software per i DCS degli RPC31

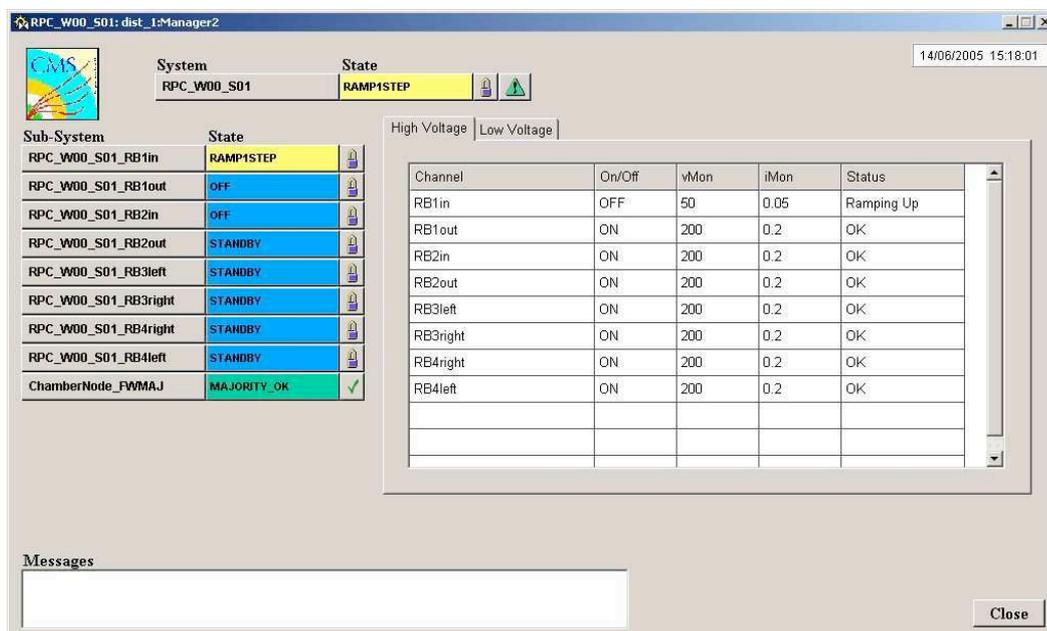


Figura 5.15: Pannello relativo al settore.

dei precedenti pannelli e descrive, mediante una tabella completa e dettagliata, i principali parametri caratteristici di funzionamento delle singole camere che costituiscono il settore. Oltre alle informazioni dettagliate sulle variabili in uscita che contraddistinguono i sistemi di alimentazione e di temperatura per le singole camere, è presente una preziosa indicazione sullo stato logico del sistema, continuamente aggiornata, sottolineata dal relativo colore.

Il livello inferiore consente di operare a livello di camera che rappresenta l'unità base del nostro sistema. Il pannello relativo (fig. 5.16) offre una gestione semplice e completa della camera attraverso un'interfaccia dettagliata e intuitiva sia sugli allarmi che sui parametri operativi. Attraverso tale pannello, l'operatore ha un quadro completo delle maggiori funzioni con cui gestire la camera. Il pannello è suddiviso in 5 sezioni che descrivono il comportamento delle singole device connesse alla camera. Il sistema delle alimentazioni è descritto mediante quattro box, ognuna relativa ad un possibile canale integrabile nella camera. L'operatore può accendere o spegnere il singolo canale, definire il valore di tensione da settare e inviarlo in un se-

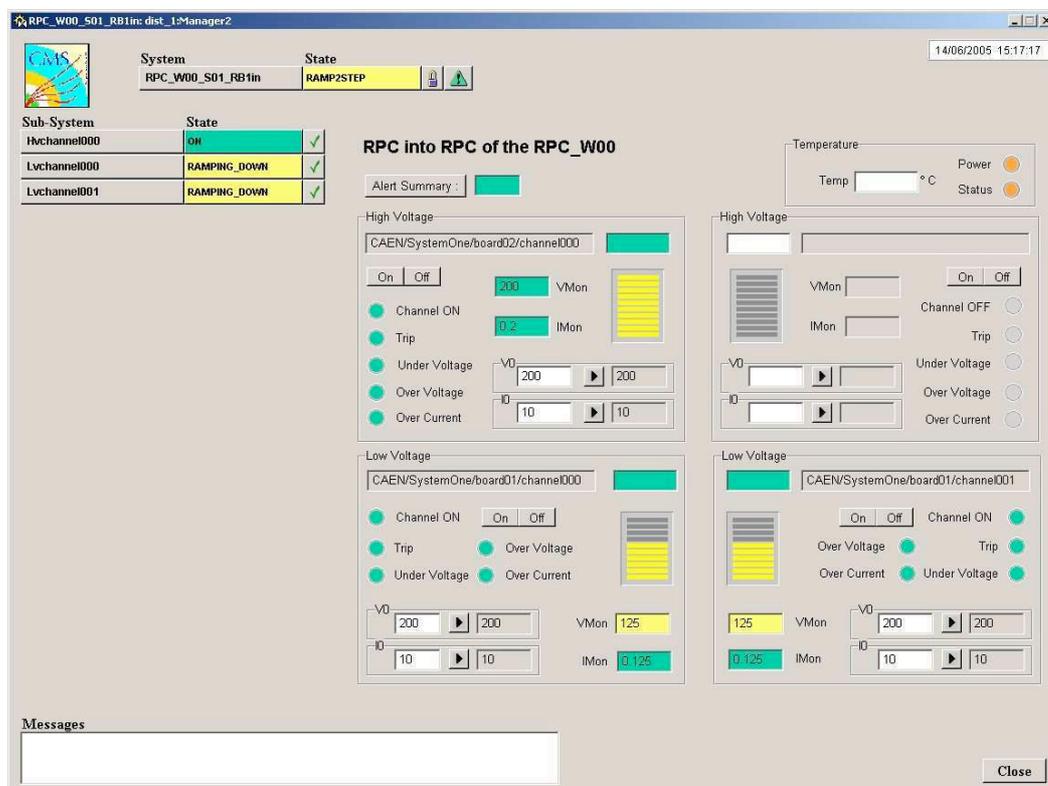


Figura 5.16: Pannello relativo alla camera. Permette di comandare e monitorare i principali parametri della camera

condo momento, mediante un apposito tasto, all'hardware. Per ogni canale è visualizzato l'indirizzo hardware connesso, descritto dal tag OPC relativo, consentendone una facile identificazione all'interno del crate e facilitando le procedure di recupero da eventuali malfunzionamenti. Le variazioni dei valori della tensione dei canali sono monitorate attraverso l'ausilio di indicatori variabili consentendo di conoscere lo stato del sistema e visualizzando eventuali condizioni di errore attraverso i relativi colori. Il pannello consente inoltre di integrare ulteriori device ed di duplicare il numero di canali per HV connessi nel caso fosse richiesto. Particolare attenzione è stata data nella realizzazione alle indicazioni di errore, descritte sia singolarmente attraverso i principali indicatori di errore per un canale di alimentazione (Trip, Overcurrent, Overvoltage,...) che con Summary Alarm ; è inoltre possibile

Progettazione e realizzazione del software per i DCS degli RPC33

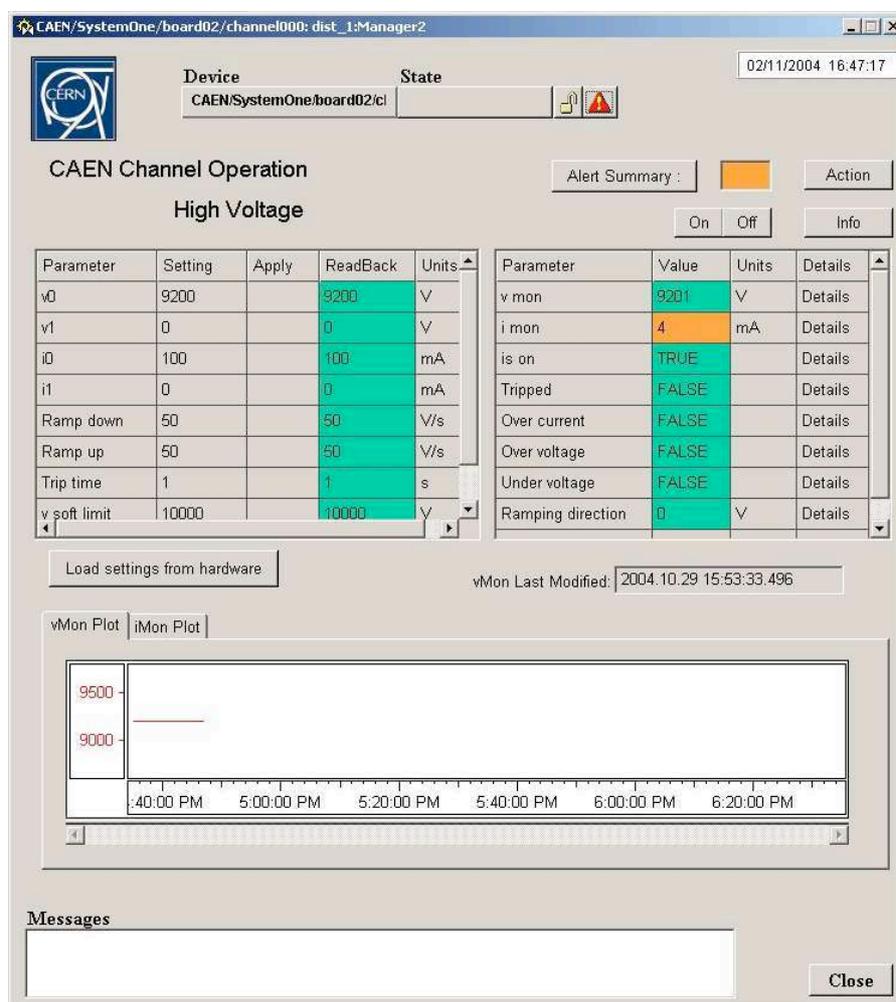


Figura 5.17: Pannello relativo alla device (canale di alimentazione)

mascherare o smascherare ogni singolo allarme e, se richiesto, fornire il segnale di acknowledge. Inoltre un'apposita sezione del pannello consente di conoscere lo stato di funzionamento della sonda di temperatura e il relativo valore misurato.

Le device per i canali d'alimentazione

Le device rappresentano i nodi foglia della gerarchia del sistema e in quanto tali non godono delle funzionalità espresse per le unità di controllo. Il

pannello relativo al controllo di una device unit è quindi generalmente una rappresentazione delle funzionalità offerte dalla strumentazione hardware. I pannelli relativi al controllo di device più complesse, quali quelle del basso e dell'alto voltaggio per i moduli della CAEN, sono rappresentati in figura 5.17. Essendo le caratteristiche del sistema del basso e alto voltaggio identiche, è stato realizzato un unico template e riproposto per entrambe le soluzioni. Il pannello presenta tutti i possibili parametri che caratterizzano il comportamento di un canale di alimentazione. La rappresentazione si articola in relazione alla tipologia dei parametri visualizzati, raggruppandoli a seconda della differente tipologia di ingresso o di uscita per il canale. A tale livello sono gestibili tutte le funzionalità possibili sulle condizioni di allarme per una gestione completa della device. Un aspetto importante di tale pannello è offerto dalla possibilità di seguire l'andamento nel tempo di parametri caratteristici, quali IMon e Vmon, mediante grafici le cui funzionalità sono integrate all'interno del framework del JCOP.

5.3 Database

La complessità e l'enorme mole d'informazioni che ruotano attorno all'esperimento sui più svariati campi rendono necessario l'uso di strumenti d'archiviazioni potenti ed efficienti sia per controllare costantemente il rivelatore e il suo corretto funzionamento, sia per offrire una descrizione dettagliata del sistema e dei suoi possibili cambiamenti. Per far fronte a questi requisiti sono utilizzati una serie di database [59] di differenti finalità che consentono di avere una radiografia del sistema e della sua evoluzione lungo tutto l'arco di attività. Le principali informazioni richieste per avere un quadro completo del sistema, fondamentali anche per la comprensione dei dati acquisiti, sono raggruppabili in 5 categorie:

- Informazioni strutturali sui componenti e sulle loro relazioni
- Informazioni sull'installazione relative ai componenti hardware e software e alla loro configurazione
- Informazioni per il monitoring e il debugging del rivelatore

Progettazione e realizzazione del software per i DCS degli RPC35

- Informazioni sull'operatività del rivelatore, quali misure di calibrazione necessarie per l'analisi off-line
- Informazioni sul decommissioning, relative a cambiamenti in corso dell'hardware dell'esperimento

Tutte queste informazioni sono fondamentali per le normali attività dell'esperimento, quali il tracciamento e la ricostruzione dell'evento, per conoscere la storia dei componenti ed eventuali malfunzionamenti. Queste informazioni, combinate con i segnali prodotti dai vari sottorivelatori, permettono la corretta interpretazione delle misure acquisite e delle possibili migliorie da apportare all'esperimento. La realizzazione di una struttura in grado di immagazzinare, accedere e correlare tra loro le varie informazioni contenute nei dati, rappresenta una richiesta stringente nella progettazione dell'esperimento. A tal fine sono stati realizzati gruppi di database, ognuno con finalità diverse, per coprire tutte queste funzioni:

- Detector Geometry Database
- Construction Database
- Equipment management Database
- Configuration Database
- Condition Database

La tecnologia utilizzata per la realizzazione di tipi differenti di database è la stessa e si basa su standard ADO (ActiveX Data Object) per la connessione con database tipo ODBC e Oracle [57] sfruttando le caratteristiche relazionali di MySql [58]. La configurazione dell'hardware e la memorizzazione delle condizioni di lavoro sono funzionalità che sono sviluppate dal DCS attraverso l'uso di database, interfacciati mediante una serie di tool integrati nelle soluzioni SCADA e XDAQ per la comunicazione e la trasmissione dati, come descritto in figura 5.18.

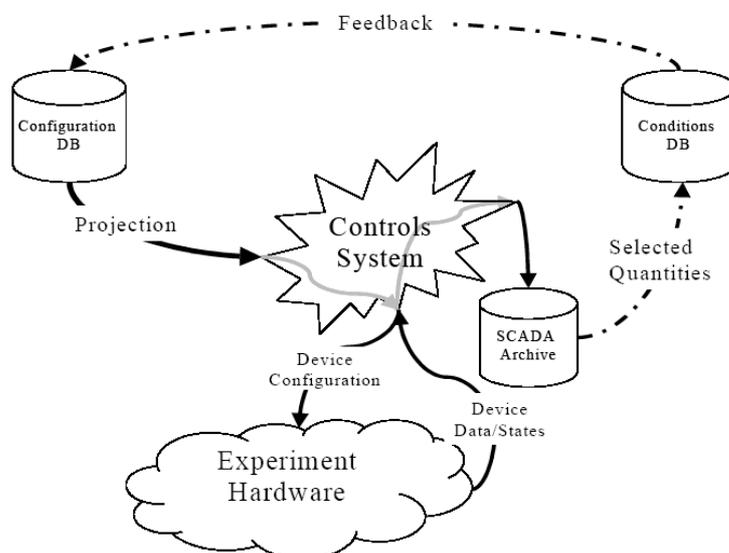


Figura 5.18: Diagramma schematico del flusso di dati fra i differenti database.

5.3.1 Configuration Database

Dato l'alto numero e l'eterogeneità dei componenti, le operazioni di configurazione e di inizializzazione del sistema risultano particolarmente laboriose e rendono il sistema difficilmente gestibile da parte di personale non tecnico. Per portare il sistema in modalità di presa dati e per permettere l'accesso e l'aggiornamento del sistema in modo facile e immediato, è stato sviluppato un sistema di configurazione che sfrutta tali database per la gestione completa delle risorse dell'esperimento. Tale sistema di database [64] descrive l'intero esperimento sia staticamente, in relazione ai componenti che lo compongono, sia topologicamente, in termini di connessioni tra moduli e componenti attraverso i relativi parametri. I dati sono prima immagazzinati all'interno del database interno di PVSS, e in seguito archiviati all'interno di database esterni attraverso determinati tool inseriti nel framework; tale sistema gestisce l'archiviazione mediante un set di funzioni basate. Il sistema di configurazione gestito tramite database è raggruppabile in tre macro categorie in relazione ai dati che gestisce:

System Static Configuration Data Contiene i dati relativi alle caratte-

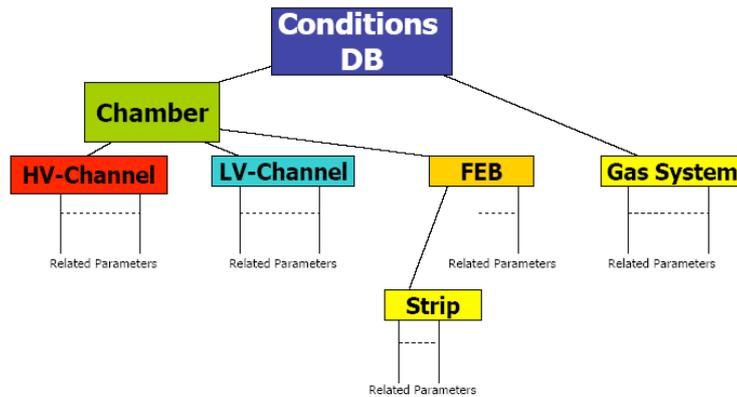


Figura 5.19: Diagramma schematico del flusso di dati per il Condition database.

ristiche globali del sistema quali i settaggi del progetto e i vari file di configurazione

Device Static Configuration Data Raccoglie i dati relativi alle singole device presenti che non variano temporalmente quali la struttura della device, la collocazione e la configurazione degli allarmi

Device Dynamic Configuration Data Contiene i dati che variano con maggiore frequenza relativi al comportamento delle singole device, ai settaggi dell'hardware ai parametri monitorati e all'evoluzione degli allarmi nel tempo.

Per il sistema muonico le informazioni contenute all'interno del Configuration database sono principalmente inerenti allo stato dei singoli moduli (On/Off), ai valori delle tensioni delle alimentazioni e delle soglie delle FEC e alle informazioni da caricare all'interno dei registri e delle memorie per il funzionamento del sistema di trigger e di readout.

5.3.2 Condition Database

La differenza tra il Configuration ed il Condition database si basa sulla dipendenza dal tempo delle variabili memorizzate. I dati registrati nel database

di configurazione descrivono il sistema nella sua condizione iniziale, mentre le eventuali variazioni che specificano le nuove condizioni operative del rivelatore sono immagazzinate all'interno del Condition database. Ciò è reso necessario data l'importanza che eventuali cambiamenti del sistema possono avere sulla qualità dei dati acquisiti. Il Condition database contiene inoltre tutti i parametri relativi alle condizioni di run del rivelatore e le informazioni inerenti alle procedure di allineamento e calibrazione del sistema, dalle quali le condizioni del rivelatore ad un dato istante possono essere dedotte.

Le informazioni immagazzinate in tale database, nell'ambito del DCS del sistema muonico, descrivono le caratteristiche dei singoli sottosistemi hardware e dell'elettronica di readout, come mostrato in figura 5.19. Queste, suddivise in on-line e off-line a seconda dei relativi parametri, contengono informazioni sia su parametri operativi quali rumore delle camere, allineamento, canali danneggiati, che sui parametri ambientali quali temperatura, pressione e umidità.

5.4 Integrazione con Run Control

Una delle caratteristiche principali del sistema sviluppato consiste nella facilità d'integrazione col sistema globale di DCS. Per quanto visto nei capitoli precedenti, il DCS non opera in standalone, ma coopera col Run Control per il controllo sia della strumentazione dell'esperimento sia del corretto funzionamento del DAQ. Scopo del Run Control è realizzare, tramite una serie di componenti software ed hardware, la rete di monitoraggio e di controllo per l'intero sistema, gestendo le fasi di presa dati e assicurando la qualità dei dati acquisiti. Il Run Control sviluppa le proprie funzionalità mediante sessioni di lavoro attraverso le quali coordina gli accessi, abilita le singole strutture e gestisce il funzionamento del sistema mediante comandi e controlli. Le singole operazioni sul sistema sono sviluppate dal Run Control attraverso le Function Manager, che consentono di descrivere il comportamento del sistema mediante la logica degli automi a stati finiti. La struttura dell'architettura del sistema è visualizzata in figura 5.20 in cui si evince il modo in cui il Run Control opera con i singoli sottoelementi. La comunica-

Progettazione e realizzazione del software per i DCS degli RPC39

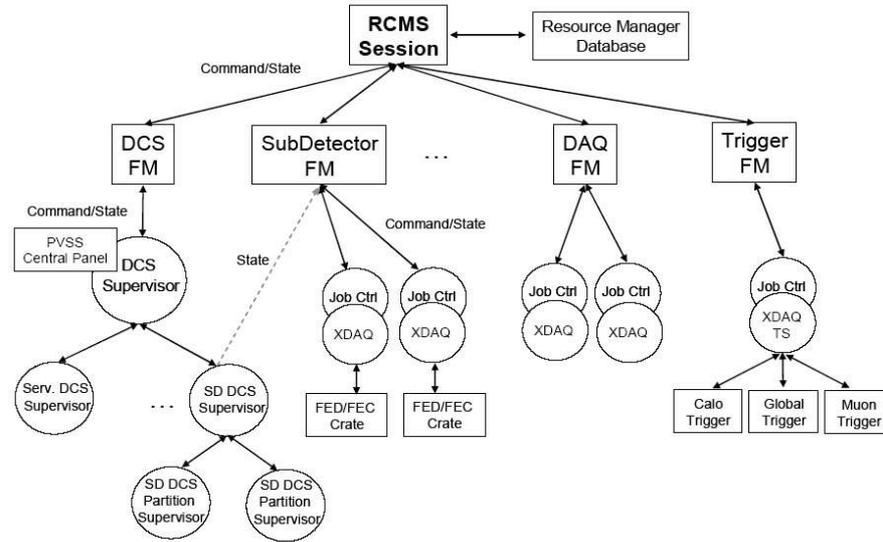


Figura 5.20: Architettura del Run Control.

zione di stati e comandi attraverso le varie FM che compongono la gerarchia del sistema avviene mediante messaggi SOAP definiti attraverso uno schema di tipo XML. Di conseguenza, la comunicazione col DCS avviene mediante un'apposita FM che coordina il funzionamento del livello top del DCS attraverso comandi e stati interpretabili dal DCS nella logica delle FSM relative al proprio linguaggio. Il sistema degli RPC del barrel sarà interfacciato con il Run Control sia attraverso il DCS, per il controllo dei sistemi ausiliari di gestione (alimentazioni, gas, cooling,...) sia attraverso partizioni relative ai sottorivelatori per il controllo del sistema di trigger e di readout (FED, FEC, TTC,...). Ogni FM deve farsi carico di tradurre le informazioni e i comandi trasmessi tra il Run Control e le singole partizioni adattandoli a seconda delle differenti applicazioni (PVSS e XDAQ) che gestiscono. Il comportamento del Run Control può essere quindi modellato mediante una serie di stati finiti che descrivono le principali modalità di funzionamento. Lo schema scelto per descrivere le principali azioni che devono essere sviluppate dal Run Control [31] è rappresentato dal diagramma a bolle descritto in figura 5.21. Ad ogni stato sono associate una serie di azioni sviluppate attraverso le Function Manager propagate mediante messaggi SOAP ai vari sottosistemi. Gli stati

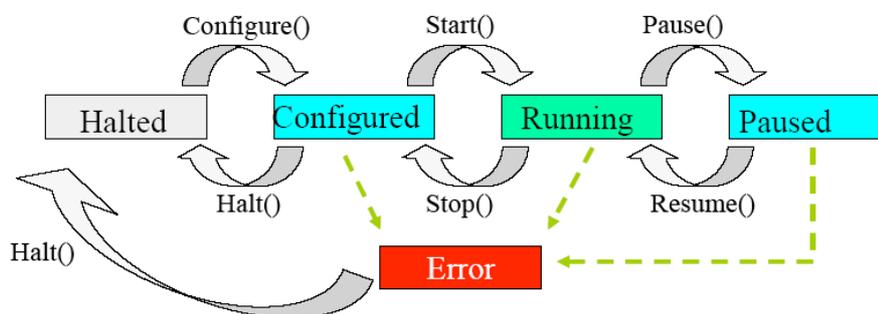


Figura 5.21: Diagramma a bolle relativo agli stati del Run Control.

scelti per implementare il comportamento del Run Control sono:

- Halted
- Configured
- Running
- Paused
- Error

Il sistema all'inizializzazione di una sessione di lavoro viene rappresentato dallo stato **Halted**; da questo, mediante l'azione di *Configure*, si sviluppano le procedure per rendere il sistema pronto all'eventuale presa dati. Propagando il messaggio SOAP di *Configure* a tutti i sottosistemi, ogni FM procede a tradurre il comandi in una serie di azioni da sviluppare sui singoli sottosistemi per prepararli alla presa dati. La fase di configurazione prevede per ogni sottosistema una connessione col relativo database (Resource Manager, Equipment o Configuration database) a seconda delle applicazioni coinvolta (RCMS, nodo XDAQ o DCS) per acquisire i parametri necessari per portare il sistema nel relativo stato. La ricezione di tale comando da parte del sistema degli RPC svilupperà azioni differenti sui nodi del DCS e su quelli di tipo XDAQ. Il comando *Configure* da parte del RCMS è tradotto nel comando ON dal FM del DCS. Di conseguenza tutti i nodi del DCS (DSS, Rack, Cooling, Gas, Magnet, RPC,...) eseguiranno quella serie di azioni necessarie per

Progettazione e realizzazione del software per i DCS degli RPC41

portare l'intero sistema nello stato di ON. Naturalmente ciò richiede anche la ricezione dal Configuration database delle informazioni relative all'hardware e ai parametri da settare (valori di tensione per le alimentazioni, condizioni di allarme,...) provvedendo ad inserirli all'interno del relativo *datapoint*. Qualora durante la procedura di accensione sia verificata una condizione di errore, la FM relativa al DCS la presenterà al RCMS portando l'intero sistema nel relativo stato di **Error**. La ricezione dal parte dei nodi XDAQ del comando *Configure* comporta una serie di procedure per inizializzare il sistema alla presa dati. Propagando tale comando ai nodi XDAQ relativi alle FEC e alle FED, questi provvederanno a scaricare dai relativi database le informazioni con cui settare i principali parametri. In relazione a tale comando le operazioni da compiere sulle schede sono:

- settare le soglie del basso voltaggio per le schede di frontend
- caricare le informazioni acquisite all'interno delle memorie e dei registri delle FPGA,
- configurare i crate VME per le TTC e le relative schede
- configurare i crate VME per le FED e FEC e le relative schede

Qualora sia stata attivata la fase di configurazione, il Run Control trasmette i comandi ai vari sottosistemi e prende proprietà del sistema diventando l'unico che può comandarne il funzionamento fin quando la sessione non verrà terminata. Tale caratteristica è importante per la gestione di un sistema distribuito e partizionabile ed è stata implementata nel sistema di DCS degli RPC sfruttando le caratteristiche di PVSS II.

Qualora le normali operazioni di inizializzazione siano state sviluppate, il sistema si porta nello stato **Configured** e mediante un comando di *Start* inizia la presa dati. Nel caso si vogliano cambiare i settaggi o ripetere la procedura di configurazione, è possibile, mediante il comando *Halt*, ritornare nello stato precedente e ripetere la procedura.

Lo stato di **Running** è relativo al periodo di presa dati in cui il rivelatore e le condizioni di trigger sono ben definite. Durante tale fase qualsiasi cambiamento delle condizioni di presa dati, relativo ai valori operativi del rivelatore

(tensione, corrente, temperatura) o eventuali malfunzionamenti, è registrato all'interno del Conditions Database. Il comportamento di tali parametri può a sua volta generare una transizione di stato portando il sistema o verso una condizione di attesa (**Paused**) o verso lo spegnimento della macchina (**Configured**) o verso uno stato di errore (**Error**)

5.5 Test e Prestazioni

Una fase importante del lavoro di tesi è stata finalizzata alla realizzazione di una serie di test sulle prestazioni e sulla robustezza e stabilità del sistema. I principali aspetti che sono stati considerati durante la fase di test sono:

- velocità di comunicazione e trasmissione tra sistema e l'hardware mediante OPC server,
- stabilità e robustezza del sistema,
- gestione delle risorse di PVSS II e compatibilità con i sistemi di elaborazione utilizzati in dipendenza delle dimensioni dell'architettura realizzata

La prima fase di test sul sistema si è concentrata sul controllo dell'attendibilità e della coerenza dell'informazione acquisita. Tutto ciò è stato sviluppato inizialmente facendo uso di un emulatore dell'hardware in grado di simulare, in ambiente software, le principali evoluzioni del sistema e il comportamento del server OPC. La fase di debug è stata realizzata su ogni singolo script utilizzato per implementare le singole funzionalità del sistema, dimostrandone la coerenza sintattica e logica.

Tale esame ha messo in luce il comportamento globale del sistema, la risposta a determinati stimoli, la velocità di propagazione degli allarmi e dei comandi lungo tutta la struttura gerarchica. Il sistema si è dimostrato in grado di rispondere velocemente agli stimoli esterni anche in presenza di una struttura gerarchica complessa. Test sulla gestione degli allarmi hanno calcolato i tempi di risposta del sistema in condizioni critiche (tab. 5.1).

Progettazione e realizzazione del software per i DCS degli RPC43

Durante l'evoluzione dei test, PVSS II si è dimostrato essere un software pesante che fa un uso intensivo delle risorse di sistema, sia di CPU che di memorie volatili. Per risolvere tale inconveniente e per migliorare la gestione delle risorse del sistema è utile suddividere alcune risorse fra più sistemi. Alcuni lavori hanno dimostrato [60] che la gestione separata delle risorse di archiviazione comporta una diminuzione del carico del programma sul sistema pari al 15 %. Altra caratteristica che richiede alte prestazioni da parte del sistema è l'implementazione delle FSM per l'intera gerarchia. La struttura globale del sistema DCS degli RPC è composta da 5 ruote da 12 settori ognuna, è per ogni settore sono presenti 8 camere, richiedendo la gestione di 545 FSM. Ogni FSM è implementata mediante un processo di sistema (Manager), continuamente attivo, che richiede una certa quantità di memoria volatile del sistema ($\sim 2\text{MByte}$). Di conseguenza è necessario per lo sviluppo completo di un'unica FSM l'utilizzo di un PC di ultima generazione prestante, affidabile e potente in grado di far fronte a tali richieste.

Più complessa è invece la struttura e i requisiti richiesti per la gestione di una rete di sistemi PVSS II attraverso i quali verrà implementato l'intero struttura.

La successiva fase di test è stata improntata allo studio delle caratteristiche di comunicazione tra l'ambiente software e l'hardware a disposizione presso il laboratorio. Come evidenziato in figura 5.22, le caratteristiche della comunicazione tra SW e HW dipendono dai singoli nodi attraverso i quali si sviluppa la comunicazione, dove ognuno di essi può influire significativamente sulle prestazioni del sistema. Un aspetto che influisce in modo considerevole sulle caratteristiche prestazionali di trasmissione è il funzionamento del middleware utilizzato : OPC. L'applicazione server/client OPC utilizzata è stata implementata dalla CAEN per gestire la comunicazione col mainframe

Tempo di visualizzazione di 5000 condizioni di alert	26 s
Tempo di cancellazione di 5000 condizioni di alert	45 s
Acknowledgment di 10000 condizioni di alert	2 min 20 s

Tabella 5.1: Prestazioni temporali per la gestione degli allarmi per un sistema completo

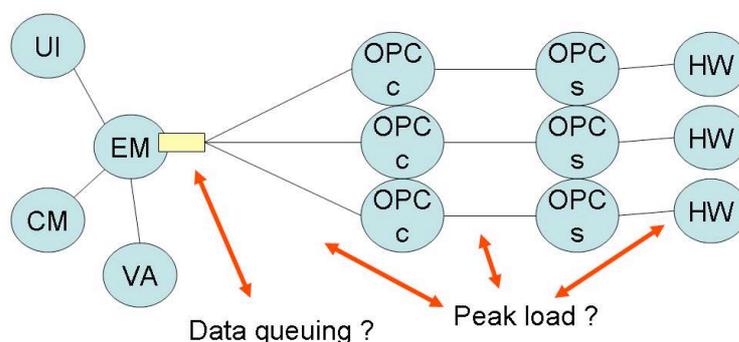


Figura 5.22: Schema di comunicazione software/hardware.

SY1527 ed è stata sviluppata seguendo le specifiche del protocollo OPC. Le prestazioni dell'OPC dipendono prevalentemente dai componenti della rete: le applicazioni server-client, la velocità di trasmissione della rete e i sistemi di elaborazione utilizzati. Il protocollo OPC prevede differenti modalità di trasmissione: sincrona e asincrona, sia in lettura che in scrittura, e prevede una gestione automatica del refresh dei parametri monitorati.

Una prima stima sulle prestazioni del sistema è stata sviluppata in relazione alla velocità di lettura da parte del server, analizzando il tempo impiegato per leggere un numero variabile di DPEs crescente, monitorando le risorse di sistema richieste. La lettura di un item non corrisponde solo ad un valore relativo ad un determinato tipo, ma è correlato da una serie di bit ausiliari relativi al timestamp e alla qualità dell'informazione in modo da assicurare l'attendibilità della lettura. L'andamento del tempo di acquisizione in relazione al numero di DPE che compongono è stato analizzato per un massimo di 10,000 item ed il relativo fit dei dati ne ha evidenziato un andamento del tipo descritto in figura 5.23 che segue la seguente legge:

$$t = (515 + 85 \cdot n) \mu s$$

Da ciò si evince che una lettura che coinvolge 10,000 item è completata in soli 850 ms.

Altra caratteristica importante del sistema è la misura della massima velocità di aggiornamento misurabile per gruppi di items che variano conti-

Progettazione e realizzazione del software per i DCS degli RPC45

nuamente. Il server interroga i dati, attraverso la modalità di subscription, in maniera continua e asincrona, sviluppando una lettura ogni 10 ms. In tale modalità, il client può specificare la massima velocità di update possibile alla quale può ricevere i dati. Il test ha stabilito per il nostro sistema qual'è la massima frequenza di refresh supportata dal client, determinando quando viene raggiunta il valore di saturazione, cioè quando non è in grado di completare la lettura. Tutto ciò è stato plottato in relazione al numero di OPC items leggibile, ottenendo l'andamento espresso in figure 5.25 e 5.22. Nell'intervallo da 500 a 10,000 items la minima frequenza di update può essere fittata come funzione lineare ed è espressa dalla seguente legge:

$$t = (0.061 \cdot n)\mu s$$

che corrisponde ad un tempo pari a 61 μs per item. Tramite tale valore si può definire la massima quantità di dati trasmissibile nell'unità di tempo. Per quanto detto precedentemente essendo un item composto da una serie di bit oltre all'informazione acquisita, ogni item è definita attraverso 36 bytes. Di conseguenza avendo definito il tempo di trasmissione per ogni item pari a 61 μs , il frequenza di trasmissione totale sarà pari a 576 kByte/s (4,610 kbit/s). Sebbene tali limitazioni, soprattutto ereditate dal DCOM, tali caratteristiche sono accettabili per il sistema di controllo di ogni esperimento di LHC dove la maggior parte dei processi non si sviluppa simultaneamente portando a situazioni operative così critiche. Il sistema degli RPC infatti, oltre alle possibili condizioni di errore, non prevede variabili che cambiano continuamente. L'unica condizione di lavoro che prevede una variazione periodica si presenta durante la fase di transizione tra condizioni operative di lavoro del sistema. Queste sono sviluppate attraverso le fasi di RAMP_UP e RAMP_DOWN, implementate per tutti gli oggetti delle FSM che sviluppano le proprie funzioni sui canali di HV e LV connessi alle singole camere. Le richieste operative del sistema durante tali fasi sono perfettamente compatibili con le prestazioni dell'OPC, essendo strettamente legate alle caratteristiche del rivelatore. Infatti il passo col quale è variata la tensione ai capi di ogni singola gap è pari a 60 V/s, richiedendo una serie di procedure di accesso

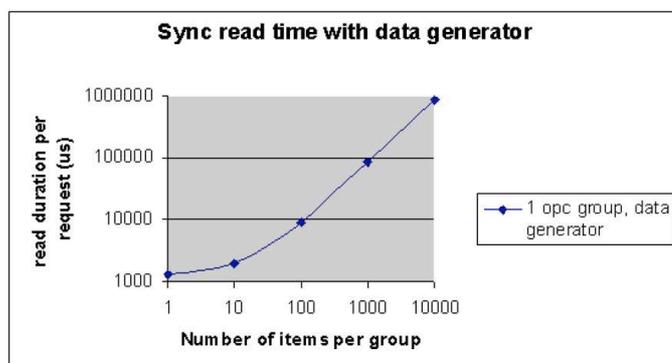


Figura 5.23: Grafico relativo al tempo di lettura di n item mediante apposita funzione OPC in variare di n. Entrambe le scale sono logaritmiche.

e di scrittura tra hardware e sistema ben lontano dai limiti di trasmissione determinati precedentemente per l'OPC.

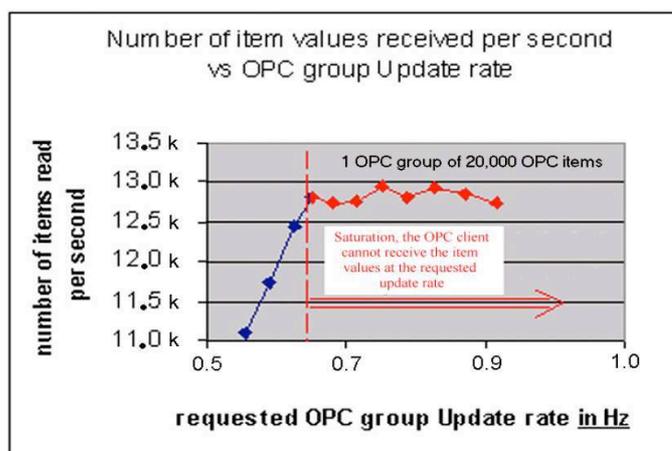


Figura 5.24: Numero di item ricevuti da un OPC client relativi ad un gruppo di 20,000 item. La frequenza massima di ricezione da parte del client non può andare oltre 0.65 Hz.

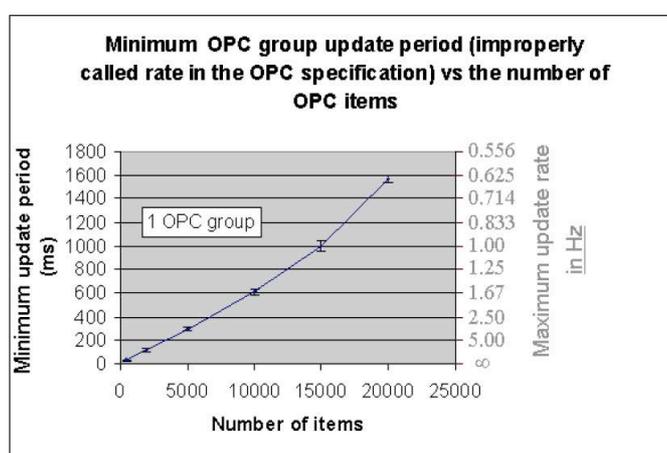


Figura 5.25: Massima velocità di update di ogni OPC group in relazione al numero di item che lo compongono. Come di evince per un gruppo di 10,000 item l'intero set di valori è acquisibile in 600 ms.

Conclusioni

Il presente lavoro di tesi è stato sviluppato nell'ambito del progetto di realizzazione del Detector Control System (DCS) per il sistema muonico ad RPC del barrel di CMS, integralmente progettato e realizzato dall'Università di Napoli "Federico II" e dalla sezione dell'I.N.F.N. di Napoli. Dopo un'attenta analisi delle caratteristiche dei componenti dell'esperimento e delle principali finalità di CMS, lo studio è stato incentrato sulla caratterizzazione dei rivelatori a piatti piani resistivi (RPC) e sul ruolo che essi ricoprono all'interno del sistema di trigger muonico. In relazione alla complessità del sistema e all'importanza della funzione che esso ricopre, è stata evidenziata l'esigenza di sviluppare un sistema di controllo in grado di assicurare il corretto funzionamento e l'alta qualità delle informazioni raccolte durante la presa dati.

I principali requisiti e le funzionalità richieste ad un sistema di controllo per un esperimento di fisica delle alte energie sono stati descritti nel capitolo 3, con particolare attenzione all'integrazione del DCS all'interno del sistema di DAQ di CMS e all'interfacciamento con il Run Control per il controllo e il monitoraggio dell'intero sistema di acquisizione. Sono inoltre stati analizzati i principali campi di applicazione del sistema e le tecniche e soluzioni, sia industriali che sviluppate ad hoc, scelte da CMS per l'implementazione.

Tutto ciò è stato in seguito inquadrato nell'ambito del sistema di controllo per il sistema ad RPC del barrel di CMS, nel quale il presente lavoro si inserisce. La progettazione, la realizzazione, la scelta dei componenti, sia software che hardware, è stata trattata in dettaglio mettendo in luce le principali caratteristiche e funzionalità sviluppate.

La descrizione dell'hardware del sistema muonico ad RPC, le risorse che lo

compongono e la loro organizzazione sono state analizzate dettagliatamente nel capitolo IV, ottimizzando le scelte progettuali in relazione alle caratteristiche ambientali in cui opera il sistema. Le principali tecnologie utilizzate sono state descritte e ottimizzate per le caratteristiche del sistema.

Un aspetto importante su cui è stato concentrato il lavoro consiste nella progettazione e realizzazione del sistema di supervisione per il DCS degli RPC del barrel per CMS nel quinto capitolo. Il sistema è stato realizzato attraverso il pacchetto commerciale SCADA PVSS II, utilizzato per l'implementazione del Back-end per i quattro esperimenti di LHC, e integrato nelle funzionalità mediante un apposito framework sviluppato dal Joint COntrols Project (JCOP) del CERN. Sviluppato attraverso un'architettura gerarchica e distribuita delle risorse, il DCS per gli RPC realizzato risponde ai requisiti di modularità, partizionabilità ed scalarità che assicurano un controllo completo e coerente dell'intero sistema ed una semplice integrazione all'interno del DCS generale di CMS. Il sistema presenta inoltre un comportamento automatizzato, sviluppato seguendo una logica di macchina a stati finiti, che rende il sistema robusto, efficiente e omogeneo. L'interoperatività con l'operatore umano è assicurata da un'interfaccia grafica intuitiva e completa, che consente di monitorare il comportamento globale del sistema anche da utenti non esperti. Sono inoltre state implementate funzionalità per la gestione degli allarmi e l'archiviazione delle variabili di sistema. Mediante opportuni test, è stato controllato il corretto funzionamento del sistema e ottimizzate le relative prestazioni.

Il sistema sviluppato è stato presentato dal sottoscritto ai membri del DCS working group di CMS ed approvato dal coordinatore generale del DCS di CMS ed è pronto per l'integrazione nel sistema globale del DCS.

Appendice A

Gli Script

Come descritto precedentemente la comunicazione con l'utente avviene mediante una serie di pannelli che facilitano il controllo e il monitoraggio del sistema da parte dell'operatore. Il compito dell'interfaccia grafica consiste nel tradurre il significato degli oggetti quali bottoni, menu, tabelle e grafici, e i possibili modi d'interazione con l'operatore in azioni da compiere sul sistema.

La richiesta di sviluppare un'interfaccia user-friendly che sia usufruibile anche da un operatore non esperto, impone la semplificazione delle possibili azioni da parte dell'operatore, trasferendo al progettista il compito di tradurre le semplici azioni sugli oggetti in una serie di procedure sulle variabili di sistema per la loro implementazione.

L'interazione fra i singoli oggetti grafici e le variabili di sistema su cui esplicano le proprie funzionalità, è gestita da PVSS II script custom eseguiti simultaneamente eseguibili mediante i dispositivi di input del sistema. E' infatti possibile, per ogni oggetto grafico, associare operazioni e procedure sul sistema ad azioni del mouse sugli oggetti (click, doppio click, tasto destro,...). Le singole operazioni sono state tradotte in una serie di script, sviluppati seguendo la sintassi del linguaggio ANSI-C, che realizzano le funzioni e le procedure da implementare sulle variabili di sistema definite nei *datapoints*; tutto ciò è facilitato grazie alla presenza di una ricca e completa libreria di funzioni messe a disposizione sia da PVSS II che dal framework. I controlli mediante script, sono implementati in linguaggio interpretato, cossichè non

necessitano di compilazione o linkaggio, facilitando le operazioni di test. Ogni script è stato realizzato seguendo le direttive e le linee guida imposte dal JCOP in materia per la nomenclatura e le convenzioni utilizzate al fine di sviluppare un sistema completo, attendibile e facilmente integrabile.

Di seguito è riportato esempi di script per il calcolo e la visualizzazione di una condizione di Summary Alarm e per la gestione del settore. Come si può notare oltre ad essere sviluppato mediante le classiche strutture sintattiche proprie del C, sono presenti una serie di funzioni proprietarie di PVSS , quali **dpGet()** e **dpSet()**, e altre sviluppate dal JCOP all'interno del framework quali **getLeafChannels()** e **fwAlertConfig_setSummary()**

La gestione di un Summary Alarm per una camera

Creation date 25/06/04

Modification History: None

@author Gianni Polese (INFN Naples)*/

```
//Function TextField28_EventInitialize()
main() {
dyn_string alertChannels,exceptionInfo,parent,ChannelslogicName;
string alertPanel,alertHelp;
dyn_string alertStatus,alertPanelParameters;
dyn_char sa;
bool modifyOnly;
string Alert = $2 + "Alert";
if (!dpExists(Alert))
    dpCreate(Alert,"AlertChambers");

dyn_string alertTexts =makeDynString("OK", "Bad");
//Serve per ritardare la partenza del initialize
```

```
        delay(0,100); //dopo le procedure del general

getLeafChannels($2,ChannelslogicName);
getChannelsName(ChannelslogicName,alertChannels);
for (int i=1;i<=dynlen(alertChannels);i++)
{
    alertChannels[i]=alertChannels[i]+".";
}
getParent($2,parent);
addressSummary =Alert+".";
fwAlertConfig_setSummary(addressSummary,
                          alertTexts,
                          alertChannels,
                          alertPanel,
                          alertPanelParameters,
                          alertHelp,
                          exceptionInfo,
                          modifyOnly = FALSE);

fwColour_connectItemBackColToStatus(addressSummary ,
exceptionInfo);

}

getParent(string nodeName,dyn_string & parent)
{
    dyn_string exInfo;
    string parentName;

    fwTree_getParent(nodeName, parentName, exInfo);
    dynAppend(parent,nodeName); if (parentName != "") {
```

```
    getParent(parentName,parent);
  }
}
```

La gestione della tabella per il settore

```
//Function Table1_EventInitialize()
/*This script is used to visualize main infos about all sector
chambers;this reads all children
and gives an overview of the main parameters and of the status
of the System.
```

Date Creation:14/07/2004

@author Giovanni Polese (INFN Naples) */

```
main() {
    dyn_string channelsName,children,rbChildren,
    exceptionInfo,value,exInfo,ChannelsLogicName;
    string statusChannel,status,alias;
    string name,newname;
    char model;
    int nchi,ncha,v;
    bool isOn;

    v=1;
    //delay panel's start respect to the general ??
    delay(0,200);

    dyn_string statusArray = makeDynString(".actual.vMon",
    ".actual.iMon",".actual.isOn",".actual.Trip",
    ".actual.OvC",".actual.OvV",".actual.UnV",".actual.rampingDirection");
```

```
//@param:infopanel; variable that transmitt tab choice
dyn_string InfoPanel = strsplit($2,"|");
getLeafChannels(InfoPanel[2],ChannelsLogicName );

getChannelsName(ChannelsLogicName,channelsName);
//DebugN(channelsName);
//get all channels names and select channel model
for (int j=1;j<=dynlen(channelsName);j++)
{

    alias = dpSubStr(channelsName[j],DPSUB_DP);
    alias = dpGetAlias(alias+".");
    model = alias[8];

    if ((model == "H")&&(InfoPanel[1]=="Hv") )//HV
    {
        channels[v]=channelsName[j];
        v=v +1;

    }
    else if ((model == "L")&&(InfoPanel[1]=="Lv"))
    {
        channels[v]=channelsName[j];
        v=v +1;
    }
}
//DebugN("questa e $1 ",$1);
this.deleteAllLines;

for(int i=1; i <=dynlen(channels); i++)
{
```

```
bool flag;
newname = dpSubStr(channels[i],DPSUB_SYS_DP);
name = dpGetAlias(newname+".");

fwTree_getParent(name,children[i],exInfo);
rbChildren=strsplit(children[i],"_");
//DebugN(children[i],rbChildren);

for(int j=1; j<=dynlen(statusArray); j++)
{
dpGet(channels[i] + statusArray[j], value[j]);
dpConnect("refresh", TRUE, channels[i] + statusArray[j]);

}
if(value[3] == TRUE)
    statusChannel = "ON";
else
    statusChannel = "OFF";

if(value[4] == "TRUE")
{
    status = "Tripped";
    flag = true;
}
else if(value[5] == "TRUE")
{
    status = "OverCurrent";
    flag = true;
}
else if (value[6] == "TRUE")
{
    status = "OverVoltage";
```

```
        flag = true;
    }
    else if (value[7] == "TRUE")
    {
        status = "UnderVoltage";
        flag = true;
    }
    else if (value[8] == "2")
        status = "Ramping Up";
    else if (value[8] == "1")
        status = "Ramping Down";
    else if (value[8] == "0" && flag != true)
        status = "OK";
    //DebugN("SS",status,flag);

this.appendLine("channelDp", channels[i], "onOff", statusChannel,
"Channel", rbChildren[4], "vMon", value[1],
"iMon", value[2], "status", status);

}
this.tableMode(TABLE_SELECT_NOTHING);
this.selectByClick(TABLE_SELECT_NOTHING);
}

refresh(string dpe, float value) {
    string cellValue;
    string channelName = dpSubStr(dpe, DPSUB_SYS_DP);
    string confName = dpSubStr(dpe, DPSUB_SYS_DP_EL_CONF_DET_ATT);
    //DebugN("QQ", confName, channelName);
    int x = dynContains(channels, channelName);
    //DebugN("WW", channels, x);
```

```

dyn_string statusArray = makeDynString(".actual.vMon",
".actual.iMon", ".actual.isOn", ".actual.Trip",
".actual.OvC", ".actual.OvV", ".actual.UnV", ".actual.rampingDirection");

for(int j=1; j<=dynlen(statusArray); j++)
    {
        bool flag;

if(confName == (channelName + statusArray[j] + ":_online.._value" )
{

dpGet(channelName + statusArray[j] + ":_online.._value",cellValue);
//DebugN(j,x,"___",cellValue);
if(j==1)

this.cellValueRC(x-1,"vMon") = cellValue;
else if(j==2)
this.cellValueRC(x-1,"iMon") = cellValue;
else if(j==3)
{
if(cellValue == "FALSE")
this.cellValueRC(x-1,"onOff") = "OFF";
else
this.cellValueRC(x-1,"onOff") = "ON";
}
else if(j==4 && cellValue=="TRUE")
{
flag = true;
this.cellValueRC(x-1,"status") = "Tripped";
}
else if(j==5 && cellValue=="TRUE")
{

```

```
flag = true;
this.cellValueRC(x-1,"status") = "OverCurrent";
}
else if(j==6 && cellValue=="TRUE")
{
flag = true;
this.cellValueRC(x-1,"status") = "OverVoltage";
}
else if (j==7 && cellValue=="TRUE")
{
flag = true;
this.cellValueRC(x-1,"status") = "UnderVoltage";
}
else if (j==8)
{
if(cellValue == "2")
{
this.cellValueRC(x-1,"status") = "Ramping Up";
//this.cellBackColRC(x-1,"status") = "FwStateAttention1";
}
else if(cellValue == "1")
{
this.cellValueRC(x-1,"status") = "Ramping Down";
//this.cellBackColRC(x-1,"status") = "FwStateAttention1";
}
else if(flag != true)
{
shape table = getShape("Table1");
string val;
getValue(table,"cellValueRC",x-1,"status",val);
if(val == "Ramping Up" || val == "Ramping Down")
this.cellValueRC(x-1,"status") = "OK";
}
}
```

```
    }  
  }  
}
```

```
//Function TextField28_EventInitialize()
```

Bibliografia

- [1] The LHC Study Group : *The Large Hadron Collider Conceptual Design*, CERN/AC 95-05, 1995.
- [2] The CMS Collaboration : *The Compact Muon Solenoid- Technical Proposal*, CERN/LHCC 94-38, 1995.
- [3] The ATLAS Collaboration : *ATLAS Detector and Physics Performance Technical Design Report, Vol. I*, CERN/LHCC 99-14, 1999.
- [4] ALICE collaboration: *ALICE technical proposal*, (CERN / LHCC 95-71 LHCC / P3, 1995)
- [5] LHCb collaboration: *LHCb technical proposal*, (ERN / LHCC 98 004 LHCC / P4, 1998.
- [6] S.L.Glashow : *Partial-Symmetries of Weak Interactions* , Nucl. Phys. 22 (1961) 579.
- [7] S.Weinberg : *A Model of Leptons* , Phys. Rev. Lett. 19 (1967) 1264.
- [8] A. Salam : *Elementary Particle Theory*, (editor N. Svartholm), Almqvist and Forlag, Stockholm 1968,367.
- [9] P.W.Higgs: *Spontaneous Symmetry Breakdown without Massless Bosons*, Phys. Rev. 145 (1966) 1156.
- [10] LEPH, DELPHI, L3 and OPAL Collaborations: *Search for the Standard Model Higgs Boson at LEP*, The LEP Working Group for Higgs Boson Searches, ALEPH 2002-024 CONF 2002-013, DELPHI 2002-088 CONF 621, L3 Note 2766, OPAL Technical Note TN721, LHWG Note/2002-01.

-
- [11] CMS Collaboration : *Muon Technical Design Report*, CERN-LHCC-97-32 (CERN, Geneva, 1997).
- [12] CMS Collaboration : *The Tracker project-Technical design report*, CERN / LHCC 98-06 (CERN, Geneva, 1998).
- [13] CMS Collaboration : *Addendum to the CMS Tracker project-Technical design report*, CERN / LHCC 2000-16 (CERN, Geneva, 2000).
- [14] CMS Collaboration : *CMS: The Electromagnetic Calorimeter Project Technical Design Report*, CERN/LHCC 97-33, CMS TDR 4, 15 December 1997.
- [15] CMS Collaboration : *The Hadron Calorimeter project-Technical design report*, CERN-LHCC-97-33 (CERN, Geneva, 1997).
- [16] CMS Collaboration : *TriDAS Project, Technical Design Report, Volume I: The Trigger System*, CERN/LHCC 2000-38 (CERN, Geneva, 2000).
- [17] CMS Collaboration : *TriDAS Project, Technical Design Report, Volume II: The Data Acquisition and High-Level Trigger*, CERN/LHCC 2002-26 (CERN, Geneva, 2002).
- [18] H. Raether: *Electron Avalanches and Breakdown in Gases*, London:Butterworths, 1964.
- [19] R. Santonico e R. Cardarelli: *Development of Resistive plate counters*, University of Chicago, E. Fermi Institute('04), Nuclear Instruments and Methods in physics research 187 (1981).
- [20] R. Santonico e R. Cardarelli: *Progress in Resistive plate counters*, Nuclear Instruments and Methods in physics research A 263 (1988).
- [21] M.E.Rose and S.A.Korff: *An Investigation of the Properties of Proportional Counters*, Physical Review 59 (1941).
- [22] S.H. Ahn et Al: *Study on the operational conditions of a double-gap resistive plate chamber for the CMS*, Nuclear Instruments and Methods in physics research A 456 (2000).

-
- [23] M. Abbrescia et Al: *Test beam result on Resistive Plate Chambers for CMS experiment*, CMS NOTE 1997/062.
- [24] M. Abbrescia et Al: *Performance of Resistive Plate Chambers for the muon detection at CMS*, Nuclear physics B 78 (Proc. Supp.)(1999).
- [25] M. Abbrescia et Al.: *The Resistive Plate Chambers for CMS and their simulation*, Nuclear Instruments and Methods in physics research A 471 (2001).
- [26] M. Abbrescia et Al: *A prototype front end chip for the CMS resistive plate chambers*, submitted to Nuclear Instruments and Methods in physics research A .
- [27] P. Camarri et Al.: *Streamer suppression with SF₆ in RPCs operated in avalanche mode*, Nuclear Instruments and Methods in physics research A 414 (1998).
- [28] M. Abbrescia et Al.: *Production and test of one-third of barrel Resistive Plate Chambers of the CMS experiment at LHC*, Nuclear Instruments and Methods in physics research A 535 (2004).
- [29] M. Abbrescia et Al.: *Production and quality cntrl of the barrel RPC chambers of the CMS experiment*, submitted to Nuclear Instruments and Methods in physics research A .
- [30] M. Abbrescia et Al.: *The RPC system for the CMS experiment at the LHC*, Nuclear Instruments and Methods in physics research 187 (1981).
- [31] J. Varela: *Integration of Run Contrl and Detector Control Systems*, CMS internal note 2005/015.
- [32] V. Brigljevic et al.: *Using XDAQ in Application Scenarios of the CMS experiment*, CMS conference report 2003/007.
- [33] D. Box et al.: *Simple Object Access Protocol (SOAP) 1.1*, W3C Note 08 May 2000, <http://www.w3.org/TR/SOAP>.

- [34] I2O Special Interest Group: *Intelligent I/O (I2O) Architecture Specification v2.0* 1999, at <http://www.intelligent-io.com>
- [35] XML:DB database: <http://www.xmldb.org/>
- [36] V. Briglijevic et al.: *Run Control and Monitor System for the CMS Experiment*, CERN,Geneve,Svizzera.
- [37] S.Luders, R.B.Flockhart, G. Morpurgo, S.M. Scheling: *The CERN Detector Safety System for the LHC experiments*, CERN,Geneve,Svizzera.
- [38] M. Gonzalez-Berger: *The Joint COntrols Project framework*, Int. Conf. on Computing in High Energy Physics, March 2003, La Jolla, California
- [39] Joint Control Project: *The LHC experiments' Joint COntrols Project* , International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems, Trieste, Italy (1999).
- [40] PVSS-II: <http://www.pvss.com>
- [41] H.J. Burckhart: *Detector Control System* , 4th Workshop on Electronics for LHC Experiments, Rome (Italy), September 1998.
- [42] TTC, manual v 1.6: <http://www.phys.ufl.edu/holger/CMS/manuals/TTCvi.pdf>,
- [43] Analog Device: *Low Cost, Precision IC Temperature Transducer:AD592, data sheet*
- [44] The Embedded Local Monitor Board: <http://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUP/DAQTRIG/DCS/ELMB/DIST/ELMBdoc.html>
- [45] Philips Semiconductor, *The I²C-bus and how to use it (including specification)*(1995)
- [46] The VMEbus Handbook, fourth Edition, <http://www.vita.com/>
- [47] Analog Device: *Low Cost, Precision IC Temperature Transducer:AD592, data sheet*

- [48] C.Gaspar e B. Franek: *SMI++ Object Oriented framework for designing Distributed Control Systems*, Presented at: Xth IEEE Real Time Conference 97 (Beaune, France, Sep 22-26 1997)
- [49] C.Gaspar e B. Franek: *An Integrated Experiment Control System, Architecture and Benefits: the LHCb Approach*, (Geneve, 30-Sep - 2003)
- [50] The PVSS II sistem from ETM provided through the CERN IT division: <http://wwwinfo.web.cern.ch/itcobe/Service/Pvss/>,
- [51] C.Gaspar : *Partitioning, Autmation and Error Recovery in the Control and Monitoring System of an LHC Experiment*, (Geneve, 30-Sep - 2003)
- [52] W.Salter: *The LHC Experiments' Joint Control Project (JCOP)*, CHEP'01,Beijing,Sep-01.
- [53] M. Beharrell, R. Barillère, M. Gonzalez-Berger, H. Milcent: *Technology Integration in the LHC experiments*, CHEP'01,Beijing,Sep-01.
- [54] JCOP Framework Team: *JOINT CONTROLS PROJECT (JCOP) FRAMEWORK SUB-PROJECT GUIDELINES AND CONVENTIONS*, CERN-JCOP-2000-008
- [55] JCOP Framework Team: *PVSS and JCOP Framework Course*, Sascha Marc Schmeling,CERN IT/CO 22 March 2004
- [56] Giovanni Polese: <http://agenda.cern.ch/askArchive.php?base=agenda&categ=a04> CMS Week dec 2004.
- [57] Oracle database product documentation: <http://oradoc.cern.ch>, provided by the CERN Oracle support<http://wwwinfo.cern.ch/db/oracle/>
- [58] The MySQL open source database:<http://www.mysql.com/>
- [59] F. Glege et Al: *Status and Perspectives of the Detector Databases in the CMS Experiment at the LHC*,CMS NOTE 2004/026.

-
- [60] P. Chochula, DCS Test Campaign:<http://alicedcs.web.cern.ch/Alice-DCS/Workshop12.Feb05/labtests.pdf>
- [61] J. Hopcroft, R. Motwani, J. Ullman : *Automi, linguaggi e calcolabilità*, Addison Wesley (2003).
- [62] JCOP Framework Team: *Hierarchical Controls: Configuration & Operation*, C. Gaspar 28-Jun-2001 (Updated 10-February-2004).
- [63] JCOP Framework Team: *Joint Controls Project (JCOP) Framework Sub-Project Definition* , W. Salter 22-05-00
- [64] JCOP Framework Team: *Extending the capabilities of SCADA - Device Modelling for the LHC experiments* , L.Del Cano 22-05-00

Elenco delle figure

1.1	Schema di LHC e degli iniettori	6
1.2	Sezione trasversa del magnete dipolare di LHC	7
1.3	Sezione d'urto inelastiche per collisioni p-p in funzione dell'energia dei protoni nel centro di massa	10
1.4	Diagrammi di Feynman dei principali processi di produzione del bosone di Higgs	11
1.5	Sezione d'urto totale di produzione dell'Higgs in funzione di m_H (a). Rapporti di decadimento (BR) per i decadimenti dell'Higgs nel range tra 50 e 200 MeV (b).	12
1.6	Canali di decadimento migliori per la scoperta del bosone di Higgs ad LHC al variare di m_H	13
1.7	Significatività, o potenziale di scoperta, del bosone di Higgs nei vari canali in funzione di m_H	14
1.8	Vista prospettica di CMS.	18
1.9	Significatività, o potenziale di scoperta, del bosone di Higgs nei vari canali in funzione di m_H	19
1.10	Vista longitudinale di un quarto di CMS.	19
1.11	Vista tridimensionale del sistema di tracciamento a Pixel.	20
1.12	Vista longitudinale di un quarto del sistema di tracciamento a strip di silicio.	22
1.13	Vista interna del calorimetro elettromagnetico.	23
1.14	Il sistema muonico di CMS.	25
1.15	Sezione d'urto a rate degli eventi alla max luminosità in relazione alla massa degli oggetti prodotti	26
1.16	Flusso dati del sistema di trigger di CMS.	27

2.1	Vista longitudinale di un quarto del sistema muonico di CMS.	30
2.2	Il sistema delle DT di CMS. Schema di funzionamento di una DT (a) e disposizione all'interno di un SL (b)	31
2.3	Descrizione della disposizione delle CSC all'interno dell'end-cap (a). Rappresentazione dettagliata delle geometria delle Cathode Strip Chambers (b)	32
2.4	Sezione schematica di un RPC "monogap"	34
2.5	Struttura generale degli RPC nel barrel	35
2.6	Andamento della perdita di energia per unità di lunghezza (Formula di Bethe Block)	37
2.7	Forma della valanga in un RPC dovuta alla maggiore mobilità degli e	38
2.8	Schema elettrico equivalente di una cella di scarica	41
2.9	Schema elettrico equivalente di un elettrodo di pick-up	42
2.10	Schema strutturale di un RPC di CMS	44
2.11	Confronto dell'efficienza di due camere con diversa resistività	46
2.12	Spettro a gap singola per gap di differente spessore	47
2.13	Schema a blocchi delle schede di frontend.	48
2.14	Schema di una Front End Board.	49
2.15	Distribuzione di carica per un RPC a singola e doppia gap.	52
2.16	Risoluzione temporale per RPC a gap singola e doppia	53
2.17	Dipendenza della distribuzione di carica da λ	54
2.18	Frequenze attese di eventi ad uno (sx) e a due (dx) muoni nello stato finale alla massima luminosità	56
2.19	Struttura schematica del sistema di trigger per muoni	57
3.1	Architettura del sistema di controllo e interfacciamento con il DAQ	60
3.2	Schema del software online in un nodo e dell'interfaccia con i sistemi esterni	61
3.3	Architettura del sistema di DAQ di CMS.	62
3.4	Architettura del software online di CMS.	63
3.5	Session Manager e Sottosistemi definiti nel RCMS.	65

3.6	Configurazioni possibili DCS-RCMS: a) versione con i sottoelementi del DCS integrati nella gerarchia totale del DCS;b) versione con i sottoelementi inclusi nella struttura dei sottori-velatori.	66
3.7	Integrazione del DCS nel sistema online.	70
3.8	Architettura generale del DCS.	71
3.9	Architettura delle risorse del DCS.	74
4.1	Architettura del sistema di frontend degli RPC del barrel. . .	83
4.2	Struttura <i>token-ring</i> per la rete di controllo delle FEC.	84
4.3	Descrizione della distribuzione delle risorse sull'intera area operativa di CMS.	86
4.4	Schema di distribuzione delle alimentazioni per un settore della ruota del barrel.	89
4.5	Schema di sviluppo della rete di distribuzione delle alimentazioni.	91
4.6	Architettura del sistema EASY.	92
4.7	Struttura meccanica del mainframe SY1527.	93
4.8	Schema d'interfacciamento del DCS col sistema di distribuzione delle alimentazioni	94
4.9	Architettura del sistema di distribuzione del gas.	97
4.10	Suddivisione in tre zone verticali del sistema di distribuzione del gas per gli RPC.	99
4.11	Architettura di una rete sviluppata mediante OPC server. . .	101
4.12	Organizzazione dati per client secondo le specifiche OPC. . . .	102
4.13	Diagramma a blocchi di una interfaccia OPC.	103
4.14	Dati e Controlli	104
4.15	Trasferimento Completo	105
4.16	Formato Combinato	105
5.1	Architettura hardware del DCS.	108
5.2	Architettura del software.	110
5.3	Sviluppo del sistema distribuito mediante le funzionalità offerte da PVSS II.	111

5.4	Componenti aggiuntivi integrati col framework.	112
5.5	Integrazione del DCS per gli RPC all'interno del sistema generale di DCS. Sono evidenziate le funzionalità disponibili per ogni CU	115
5.6	Struttura gerarchica del sistema del DCS in relazione alla distribuzione geografica dei componenti.	116
5.7	Possibili modalità di comunicazione tra CU.	117
5.8	Diagramma a bolle per la FSM del DCS generale.	121
5.9	Diagramma a bolle per le FSM degli oggetti camera, settore e ruota	123
5.10	Concetto di Acknowledge per gli allarmi.	124
5.11	Pannello per la rappresentazione globale degli allarmi. Per ogni evento registrato sono presenti ulteriori informazioni sulla natura dell'allarme, sulla device in cui si è presentato e il livello di severità d'allarme. E' inoltre possibile gestire gli <i>acknowledge</i> per ogni evento rappresentato.	126
5.12	Device and Editor Navigator	128
5.13	Pannello del nodo radice. Rappresenta l'intero sistema delle ruote del barrel visualizzando gli stati e gli allarmi per ogni settore	129
5.14	Pannello relativo alla ruota.	130
5.15	Pannello relativo al settore.	131
5.16	Pannello relativo alla camera. Permette di comandare e monitorare i principali parametri della camera	132
5.17	Pannello relativo alla device (canale di alimentazione)	133
5.18	Diagramma schematico del flusso di dati fra i differenti database.	136
5.19	Diagramma schematico del flusso di dati per il Condition database.	137
5.20	Architettura del Run Control.	139
5.21	Diagramma a bolle relativo agli stati del Run Control.	140
5.22	Schema di comunicazione software/hardware.	144

-
- 5.23 Grafico relativo al tempo di lettura di n item mediante apposita funzione OPC in variare di n. Entrambe le scale sono logaritmiche. 146
- 5.24 Numero di item ricevuti da un OPC client relativi ad un gruppo di 20,000 item. La frequenza massima di ricezione da parte del client non può andare oltre 0.65 Hz. 146
- 5.25 Massima velocità di update di ogni OPC group in relazione al numero di item che lo compongono. Come di evince per un gruppo di 10,000 item l'intero set di valori è acquisibile in 600 ms. 147