

LNF-08/ 32 (Thesis)  
15 Dicembre 2008

*Scuola di Ingegneria Aerospaziale*

**USO DEI SENSORI IN FIBRA OTTICA PER APPLICAZIONI  
AEROSPAZIALI E PER I RIVELATORI DELL'ESPERIMENTO CMS**

*Stefano Colafranceschi*

Relatore

*Antonio Paolozzi<sup>1</sup>*

Correlatori interni

*Ferdinando Felli<sup>2</sup>*  
*Giovanna Saviano<sup>2</sup>*

Correlatori esterni

*Stefano Bianco<sup>3</sup>*  
*Archana Sharma<sup>4</sup>*



Scuola di Ingegneria Aerospaziale<sup>1</sup>  
(Università degli studi di Roma la Sapienza)

Ingegneria Chimica dei materiali e delle materie prime<sup>2</sup>  
(Università degli studi di Roma la Sapienza)

INFN – LNF<sup>3</sup>  
(Istituto Nazionale di Fisica Nucleare – Laboratori Nazionali Frascati)

CERN<sup>4</sup>  
(Centro Europeo per la ricerca Nucleare)

## Lista di Acronimi

CERN – European Organization for Nuclear Research

CMS – Compact Muon Solenoid

CLS – Closed Loop System

CS – Chemical Setup

EPS – Expandable PoliStyrene

GC – Gascromatograph

GGM – Gas Gain Monitoring System

HV – High Voltage

ISR – Intersecting Storage Rings

LEIR – Low Energy Ion Ring

LINAC – Linear Accelerator

LHC – Large Hadron Collider

MS – Mass spectrometer

PAW – Physics Analysis Workstation

PS – Proton Synchrotron

PSX – PVSS SOAP eXchange

PVSS – Prozeß- Visualisierungs und Steuerungs System

RPC – Resistive Plate Chambers

SOAP – Simple Object Access Protocol

SPS – Super Proton Synchrotron

VME – Versa Module Europa

## Introduzione

Il lavoro svolto in questa tesi trae origine e motivazione dall'interesse nell'esplorare come le innovazioni tecnologiche possano essere applicate alla ricerca di base avanzata, e come reciprocamente da esperimenti di ricerca di base si traggano avanzamenti, su lunghe scale di tempi, nei campi tecnologici applicativi.

Sono stati infatti sviluppati due "case-studies" di tecnologia avanzata nel campo delle scienze dei materiali e dell'optoelettronica che hanno trovato effettiva applicazione in CMS (Compact Muon Solenoid) all'acceleratore LHC (Large Hadron Collider) del CERN, uno dei maggiori esperimenti di fisica delle particelle elementari in operazione. Lo studio dei materiali ha consentito di sviluppare tecniche alternative per la caratterizzazione dei contaminanti nel rivelatore a gas per muoni a RPC (Resistive Plate Chambers). Lo sviluppo di sensori in fibra ottica è stato proposto come sistema di controllo per il posizionamento (e riposizionamento) con precisioni dell'ordine dei microns del rivelatore di tracciamento a silicio.

Il capitolo 1 descrive motivazioni e obiettivi dell'esperimento CMS, mentre il laboratorio CERN e l'acceleratore LHC sono descritti nel capitolo 2. Nel capitolo 3 viene illustrata la problematica della purezza del gas nei rivelatori per muoni a RPC di CMS, descrivendo l'attività sperimentale in corso per la caratterizzazione e l'ottimizzazione dei filtri, attività svolta al sistema di test all'ISR (Intersecting Storage Rings) del CERN, alla quale il candidato ha partecipato gestendo il test e raccogliendo e analizzato i risultati. Nel capitolo 4 viene discusso l'insieme di metodi, strumenti e risultati sviluppati per i contaminanti del gas degli RPC. I risultati originali sono stati pubblicati su NIM ref[44] e come preprint dei Laboratori Nazionali di Frascati ref[43], sono stati presentati dal candidato al congresso annuale della Società Italiana Fisica ref[40] ed è programmata la presentazione al prossimo IEEE in ottobre ref[39].

Nel capitolo 5, infine, si propongono le fibre ottiche per il monitoring posizionale del tracker di CMS, e si presentano i risultati di un programma di studio su un prototipo di sensore a fibra ottica.

## Introduzione

- 1) Modello Standard e struttura della materia
- 2) Laboratorio
  - a. CERN
  - b. Large Hadron Collider
  - c. Esperimento CMS
- 3) Il rivelatore RPC e il problema della contaminazione
  - a. Introduzione
  - b. Principio di funzionamento
  - c. Il sistema di ricircolo
  - d. Studi di filtri all'ISR
  - e. Calibrazione flussimetri
  - f. Correnti camere grandi
  - g. Conclusioni
- 4) Gas Gain Monitoring System
  - a. Introduzione
  - b. Il sistema del gas gain monitoring
  - c. Elettronica e Sistema di acquisizione
  - d. Funzionamento
  - e. Sviluppo di xDAQ, DCS/PVSS
  - f. Risultati dal monitoring
    - i. Case-study: Contaminazione
    - ii. Effetti
    - iii. Conclusione
    - iv. Modellizzazione
      1. Rete Neurale
      2. Validazione modello
      3. Previsioni
  - g. Conclusioni

## 5) Sviluppo sensori laser in fibra ottica

- a. Introduzione
- b. Monitoring posizione rivelatore silicio di CMS
- c. Sensori reticolo di Bragg
- d. Uso di fibre ottiche per applicazioni spaziali
  - i. Sensore Fabry-Perot per alte temperature
  - ii. Tecnica del Lost Foam
  - iii. Fusione a colata
  - iv. Caratterizzazione metallografica
  - v. Microscopia ottica
  - vi. Microscopia elettronica a scansione
  - vii. Sistema di interrogazione
  - viii. Macchina di trazione
  - ix. Realizzazione sensore
    - a. Prime prove
    - b. Realizzazione sensore fibra di zaffiro
    - c. Prova di trazione
    - d. Prova termica
- e. Conclusioni

Conclusioni

Ringraziamenti

# 1 MODELLO STANDARD E STRUTTURA DELLA MATERIA

*I CONCETTI DELLA FISICA SONO LIBERE CREAZIONI DELLO SPIRITO UMANO, E NON SONO, NONOSTANTE LE  
APPARENZE, DETERMINATI UNICAMENTE DAL MONDO ESTERNO.  
ALBERT EINSTEIN*

# 1 Modello Standard dell'universo

“Un modello è un’astrazione selettiva della realtà”. Con queste parole Albert Einstein illustra molto concisamente ma in modo acuto il significato di “modello”.

La costruzione di un modello passa obbligatoriamente per la nostra rappresentazione mentale della realtà, e cerca di spiegare il funzionamento dei fenomeni che ci appaiono.

Da sempre l’uomo ha cercato di modellizzare la realtà al fine di semplificarla e classificarla per raggiungere e spiegare le “cause prime”; attualmente disponiamo di un modello, chiamato “Modello Standard” che sembra spiegare abbastanza bene molti aspetti del nostro universo. Questo modello è tuttora però incompleto e insufficiente a spiegare fenomeni che via via vengono scoperti: infatti si sono sviluppati già modelli più sofisticati e complessi che possano abbracciare i nuovi fenomeni scoperti.

Tuttavia il Modello Standard rappresenta una grande conquista per tutto il genere umano perché, pur non essendo una teoria del tutto, riesce a spiegare gran parte della fisica a noi nota.

Il Modello Standard prevede l’esistenza di moltissimi tipi di particelle che per semplificare possiamo raggruppare in due grandi categorie: leptoni e quark.

I leptoni (come anche i quark) sono 6: elettrone, muone, tauone, e i loro rispettivi neutrini, i primi 3 hanno carica  $-1$  rispetto al protone e massa non nulla mentre i neutrini hanno carica nulla e massa trascurabile. I leptoni non sentono la forza forte ma solo quella debole e la forza coulombiana, se carichi.

I quark sono anch’essi sempre di 6 tipi: up, down, charm, strange, top, beauty. Hanno carica frazionaria rispetto l’elettrone e infatti per la costruzione di un protone occorrono 3 quark che sono uniti dalla forza forte. Solo i quark up e down costituiscono la materia che ci circonda, gli altri quark subiscono processi di decadimento a causa della loro massa.

Per ogni quark e per ogni leptone esiste la corrispettiva anti-particella di egual massa e vita media ma carica opposta, oltre questi mattoni base, in figura 1, esistono particolari particelle che mediano le 4 forze previste dal modello standard.

Queste forze sono in ordine di intensità: forza forte, forza elettromagnetica, forza debole, forza di gravità.

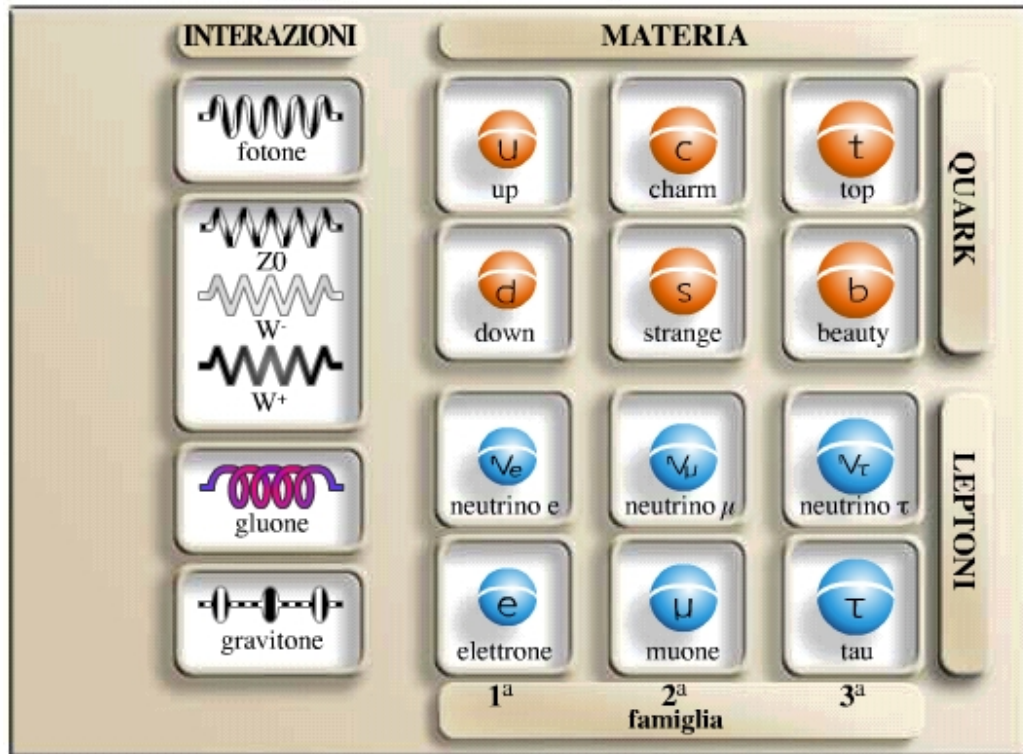


Figura 1.1 – Modello Standard, ref[97]

La prima è la forza più potente che tiene uniti quark all'interno del protone, la particella che media questa forza viene chiamata gluone. La forza elettromagnetica agisce sulla scala umana ed è responsabile dei processi chimici, biologici, elettrici; tale forza viene mediata dai fotoni.

La forza debole invece è responsabile dei decadimenti radioattivi e i bosoni W<sup>+</sup> W<sup>-</sup> e Z<sup>0</sup> sono i mediatori.

Negli anni sessanta e settanta la forza elettromagnetica e nucleare debole furono unificate nella Teoria elettrodebole da Stephen Weinberg, Sheldon Glasgow ed Abdus Salam.

La gravità è la più debole delle forze e non è compresa nel Modello Standard, è stata teorizzata la presenza di una particella mediatrice, il gravitone, ma tale particella sembra sfuggente in quanto una sua rivelazione è difficoltosa. La



rivelazione di una propagazione di onde gravitazionali necessita di apparati di precisione sofisticati e probabilmente saranno necessari esperimenti orbitanti spaziali che risentano meno del rumore di fondo del pianeta Terra.

Come abbiamo detto la gravità è per ora esclusa dal modello standard, il problema risiede nel fatto che la relatività generale descrive molto bene il macrouniverso e la fisica quantistica descrive molto bene le interazioni tra particelle, ma in campi come ad esempio buchi neri o stelle giganti dove si devono usare entrambi i modelli si arriva a degli assurdi, i modelli sono incompatibili.

## 2 L'ESPERIMENTO CMS

NON È PIÙ SOLO UNA TEORIA FILOSOFICA, LA NASCITA DELL'UNIVERSO SI PUÒ SIMULARE

CARLO RUBBIA

## 2.a CERN

Il CERN, (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) è il più grande laboratorio di fisica delle particelle al mondo. Fondato nel 1954 da 12 Stati: Belgio, Danimarca, Francia, Germania, Grecia, Italia, Jugoslavia, Norvegia, Inghilterra, Olanda, Svezia e Svizzera, attualmente conta 20 Stati membri e moltissimi altri Stati nel corso del tempo hanno collaborato fornendo tecnologia, sapere, e ricerca di base. Esplorare un campo di frontiera come la fisica subnucleare ha richiesto e richiede tuttora di operare sempre al limite tecnologico e proprio per questo spesso nascono, nell'ambito di esperimenti, nuove sfide che spingono avanti la tecnica. Alcuni esempi possono essere sistemi criogenici, sempre più avanzati, sistemi informatici, che a breve saranno in grado di acquisire (e analizzare) 100GB di dati al secondo (per molti anni), misure e sistemi di sicurezza sempre più sofisticati.

Il cuore del CERN è la quantità di tecnologia e sapere accumulati nel tempo; sono presenti o lo sono stati praticamente tutti i tipi di acceleratori con le più svariate tecnologie connesse con la gestione di macchine così sofisticate; queste ricerche hanno fruttato premi Nobel e importanti scoperte nella fisica nucleare e nella comprensione dell'universo stesso.

Oltre all'Higgs si potrebbero produrre nuove particelle per ora solo teorizzate, come le particelle supersimmetriche, e indagare nuovi campi tuttora aperti come la natura della dark matter che costituisce il 95% di tutto l'universo, la violazione di CP, sperimentalmente dimostrata, ma ancora non capita, e teorie delle stringhe e altri modelli unificatori.

Le sfide tecnologiche sono moltissime, molte di queste hanno ricadute importanti sulla nostra stessa vita, come l'invenzione del primo web-server che di fatto ha fatto nascere Internet negli anni 90, mentre attualmente il progetto GRID promette di rivoluzionare radicalmente l'informatica dei prossimi anni.

## 2.b Il Large Hadron Collider

Il Large Hadron Collider (LHC) è l'acceleratore di particelle in opera al CERN che è stato avviato il 10 settembre 2008, produrrà collisioni protone-protone e ioni pesanti.

Questa macchina è la più grande e potente mai progettata e costruita; si trova sottoterra a 100 metri di profondità nella valle tra il massiccio del Jura e quello del Monte Bianco. Il tunnel sotterraneo misura 27 Km e deriva dal precedente acceleratore il LEP (Large Electron-Positron Collider). Il LEP accelerava particelle fino ad un'energia di 90GeV, con ulteriori sviluppi nella fase finale della vita operativa della macchina si è arrivati a energie dell'ordine dei 200GeV mentre ora LHC opererà a ben 14TeV ( $2 \times 10^{-6}$  J), l'energia del volo di una zanzara ma concentrata ad una scala mille miliardi di volte più piccola.



*Figura 2.1 – Vista aerea dell'anello LHC e di SPS, ref[98]*

Ora LHC, per portare a termine questa grande sfida, si avvarrà anche di 1600 magneti superconduttori che realizzano campi magnetici di 8 Tesla raffreddati a 1.9K (-271,25°C) da elio liquido e questa è una sfida tecnologica vinta che di fatto pone LHC come posto più freddo dell'universo la cui temperatura media (radiazione cosmica di fondo) è di circa 3K.



*Figura 2.2 – Tunnel di LHC*

Su LHC sono installati vari esperimenti di diverse grandezze, CMS ed ATLAS i più grandi mentre LHCb, ALICE, TOTEM, LHCf di proporzioni più ridotte, ogni esperimento è ottimizzato per la ricerca e lo studio di determinati fenomeni di fisica sub nucleare, in realtà forse si vedranno anche fenomeni tuttora non conosciuti.

La figura 2.3 mostra il cerchio rosso, linea ideale dell'acceleratore con i vari esperimenti localizzati nella vallata vicino Ginevra.

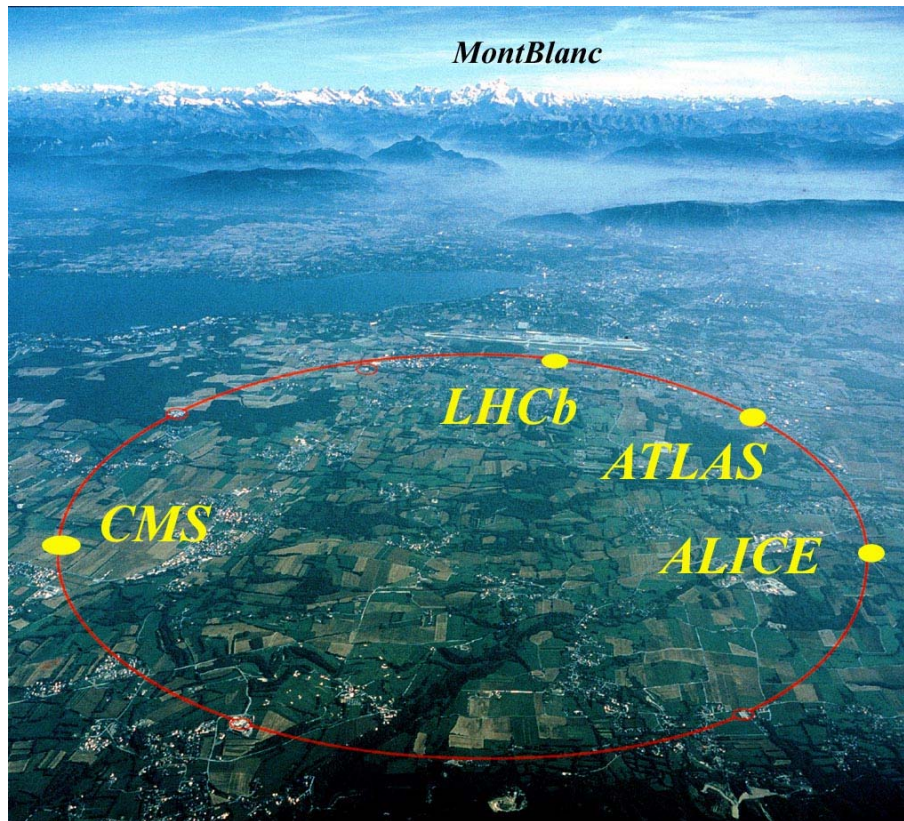


Figura 2.3 – Esperimenti su LHC, ref[98]

Ogni esperimento dispone di una caverna sotterranea scavata per l'installazione del rivelatore lungo il fascio di LHC e di alcune infrastrutture in superficie, per controlli e montaggi.

Sin dall'inizio della costruzione del primo acceleratore lineare al CERN, fu deciso che ogni macchina più potente avrebbe utilizzato le precedenti macchine come pre-iniettori. In effetti le uniche macchine capaci di accelerare particelle da "ferme" sono gli acceleratori lineari, al CERN ci sono 3 acceleratori lineari LINAC ognuno ottimizzato per diversi scopi. Le particelle accelerate saranno ioni pesanti e protoni, fondamentalmente atomi di idrogeno ionizzati.

Come si vede in figura 2.4 vi sono molti acceleratori che ricevono, accelerano e iniettano particelle aumentandone sempre di più l'energia, fino ad arrivare ad LHC, l'ultimo stadio.

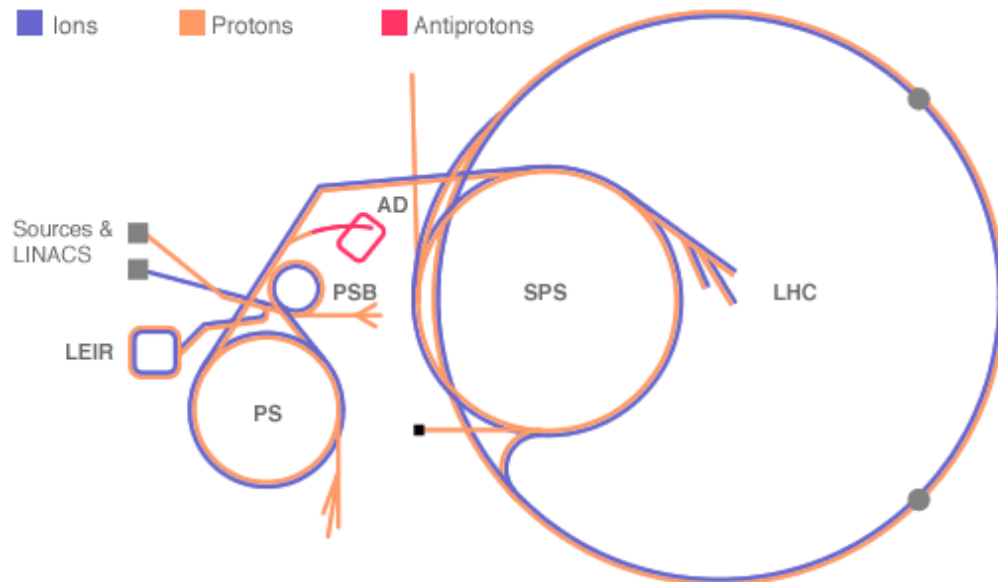


Figura 2.4 – Schema del complesso di acceleratori al CERN, ref[98]

Seguendo il cammino di una particella, dopo l'acceleratore lineare si ha una ulteriore accelerazione prima dal PS booster fino a 50MeV e poi dal PS fino a 1.5GeV. In particolare questa macchina è stata costruita nel 1959 ed è tuttora funzionante ed essenziale a LHC perché è il primo stadio di tutta la catena di accelerazione. Dopo lo stadio di PS, il Super PS (SPS) con dimensioni maggiori delle precedenti macchine (2km di diametro) riesce ad accelerare particelle fino a 450GeV che infine vengono iniettate in LHC.

## 2.c L'esperienza CMS

CMS è un enorme rivelatore di particelle che, posto sul tracciato dell'acceleratore LHC presso Cessy, si trova in una caverna nella quale avverranno collisioni tra i due fasci di particelle accelerati.

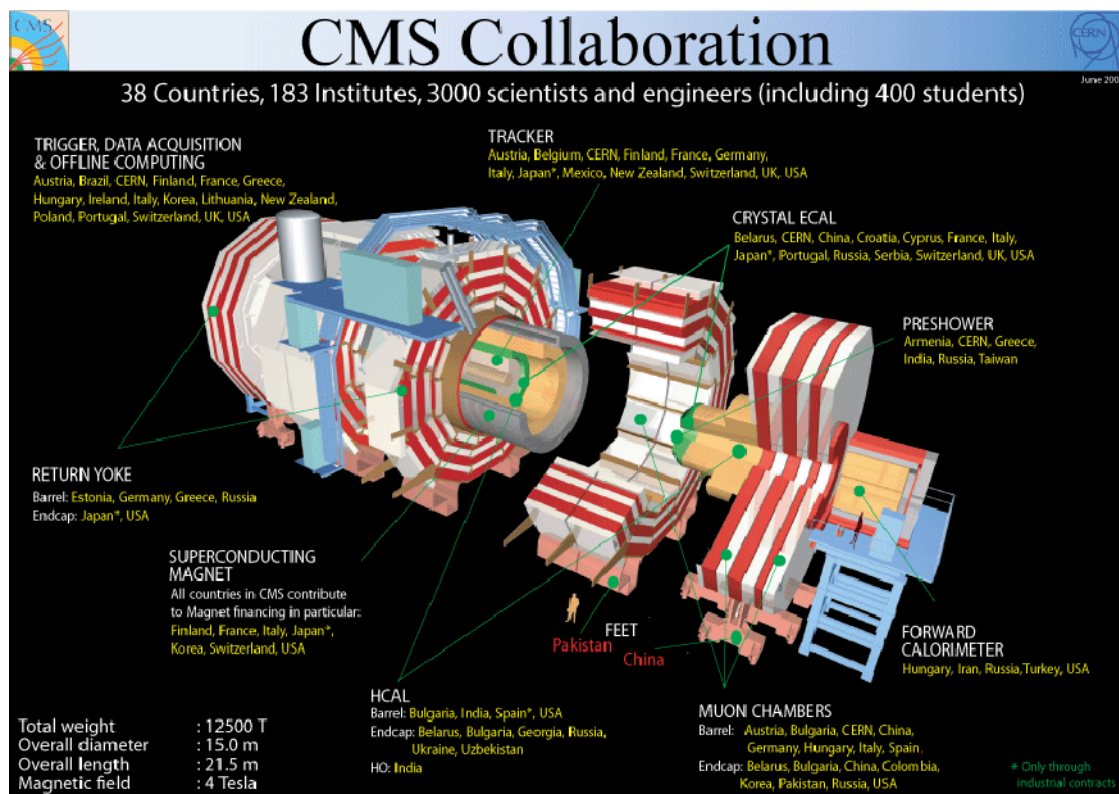


Figura 2.5 – Spaccato di C.M.S., ref[99]

Le dimensioni di CMS hanno richiesto un notevole sforzo e un impegno anche nel campo dell'ingegneria civile, ambientale e studio della geologia del terreno in quanto le caverne poste a 100 metri sottoterra che ospitano sia CMS sia gli altri apparati hanno dimensioni enormi come in figura 2.5.

Il rivelatore CMS è lungo 21,6 metri ed ha un diametro di 14,6 metri, pesa 12500 tonnellate, fattore che ha richiesto tra l'altro la costruzione del carro ponte più grande mai costruito al mondo per permettere la discesa dei componenti nella caverna in profondità. La scelta progettuale è infatti stata quella di costruire il rivelatore in superficie e calare i vari componenti man mano che erano pronti.



Questa scelta è in netto contrasto con la politica dell'altro grande esperimento competitore di CMS, ATLAS, dove tutto l'apparato è stato costruito nella caverna sottoterra. Nella realizzazione dei “pozzi” sono sorte molte difficoltà; a titolo di esempio riporto problemi dovuti a infiltrazioni di falde acquifere, risolte grazie ad un “congelamento” completo della falda con azoto liquido, oppure si è dovuti prevedere fenomeni aggiuntivi come il “galleggiamento” delle caverne in quanto nonostante il massiccio peso dei detector il volume delle caverne è così grande che il peso specifico finale è minore di quello medio della crosta terrestre e infine l'influenza lunare, già notata e corretta dagli esperimenti del LEP: la luna con la sua attrazione solleva la crosta terrestre disassando i fasci delle beam pipe.

I sottorivelatori di CMS sono: Tracker, Calorimetro Elettromagnetico, Calorimetro Adronico, Camere a Muoni.

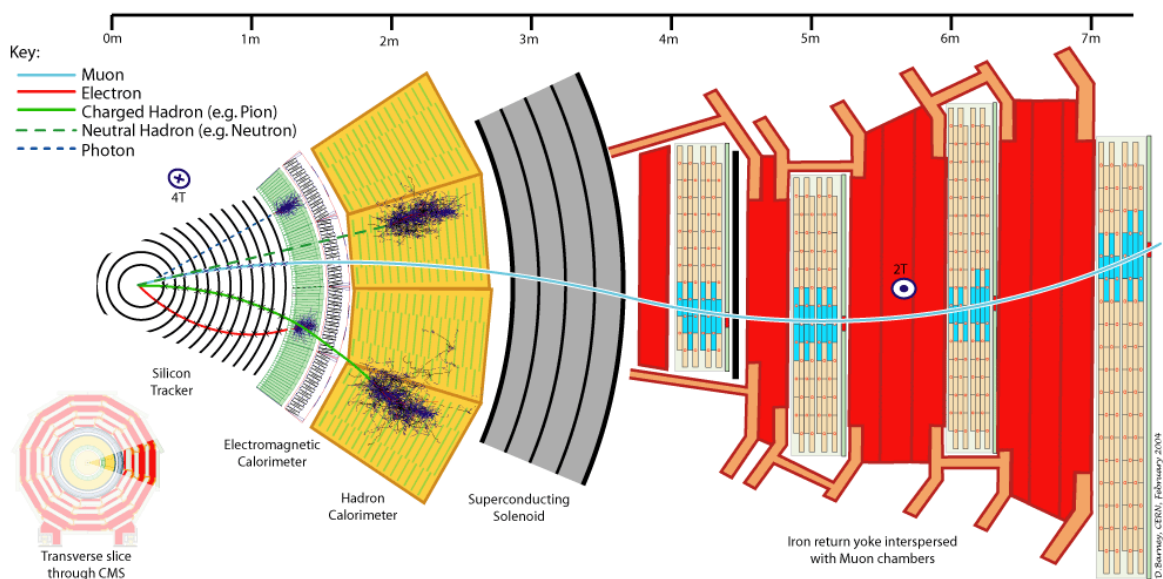


Figura 2.6 – Sezione di CMS, ref[99]

Il tracker è costituito da sensori (9.3 milioni di strips e 66 milioni di pixel) che permettono di misurare il momento delle particelle cariche, tracciare le loro traiettorie e permettere la ricostruzione dei vertici primari. Con i suoi 205m<sup>2</sup> di superficie questo tipo di rivelatore è il più grande mai costruito e si trova immediatamente intorno al canale nel quale avviene la collisione dei fasci di particelle. Il sistema è composto da due gusci cilindrici coassiali: internamente

abbiamo rivelatori a pixel mentre esternamente rivelatori strip, entrambi basati sul silicio che garantisce prestazioni eccellenti in termini di risoluzione spaziale (ordine dei  $\mu\text{m}$ ) che temporale (ordine del ns).

Il calorimetro ECAL è costituito da 80000 cristalli di tungstato di piombo ( $\text{PbWO}_4$ ) ed ha la funzione di misurare precisamente le energie di elettroni e fotoni (i quali sono totalmente assorbiti). Il calorimetro adronico invece ha il compito di determinare l'energia degli adroni (protoni, neutroni) per mezzo di strati di materiale ottone e fibre di quarzo.

Il campo magnetico di CMS, viene garantito da un grandissimo magnete solenoidale. Il campo magnetico curva le particelle e dal raggio di curvatura della traiettoria è possibile misurare la carica e l'impulso delle particelle. Il magnete è lungo 13 metri e ha 6 metri di diametro, viene refrigerato come LHC mediante azoto liquido affinché le bobine di niobio/titanio funzionino in regime di superconduttore così da generare 4 Tesla di campo magnetico assorbendo 20000 Ampere di corrente elettrica.

L'identificazione dei muoni CMS ha 3 tipi di rivelatori: Drift Tubes (DT), Cathode Strip Chambers (CSC) e Resistive Plate Chambers (RPC).

Le DT sono usate per una misura precisa di traiettoria nel barrel di CMS mentre le CSC sono usate negli endcaps. Le camere a RPC invece provvedono a generare un segnale molto veloce nel caso in cui si verifica il passaggio di un muone. Queste camere ricoprono su 4 strati tutto il cilindro di CMS, per un totale di oltre 500 camere. Il brevissimo tempo di risposta delle camere a RPC, circa un nanosecondo, permette di avere un segnale di trigger per tutto l'apparato.

I rivelatori a muoni sono un punto qualificante di CMS rispetto al concorrente ATLAS. La rivelazione dei muoni è particolarmente importante in quanto consente di cercare il bosone di Higgs in un decadimento molto semplice e pulito:

$$pp \rightarrow H^0 \rightarrow Z^0 Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$$

nel quale l'Higgs decade in due bosoni  $Z^0$  i quali a loro volta decadono ognuno in una coppia di muoni.

# 3 IL RIVELATORE RPC E IL PROBLEMA DELLA CONTAMINAZIONE

### 3.a Introduzione

La contaminazione della miscela di gas che alimenta le camere RPC del sistema di trigger a muoni di CMS è molto pericolosa per tutto il rivelatore stesso in quanto ne può variare sensibilmente il punto di lavoro.

In questo capitolo viene descritto il sistema di test dei filtri per contaminanti del sistema finale di ricircolo di CMS. I filtri furono determinati nel 2001 e nel frattempo molte condizioni sperimentali sono cambiate, è stato approntato un sistema di test del ricircolo e i primi risultati hanno dimostrato che è possibile iniziare ad operare gli RPC di CMS con i filtri attuali ma che è necessario comprenderli e caratterizzarli chimicamente per essere più sicuri ad alte dosi di radiazione. Scopo degli studi dell'ISR è caratterizzare i filtri attuali ed ottimizzarli.

Nel corso del capitolo viene evidenziato il lavoro personale svolto su tale sistema al fine di proseguire e completare una caratterizzazione di tutti gli aspetti coinvolti nelle performance del sistema stesso.

Il contributo dato a questo sistema si è concretizzato nella costante analisi dei parametri in gioco e nella manutenzione e aggiornamento di alcuni sottosistemi.

### 3.b Principio di funzionamento

I Resistive Plate Chambers (RPC), sono rivelatori a gas in grado di rivelare il passaggio di particelle cariche attraverso la ionizzazione di una miscela di gas che fluisce al loro interno. La miscela di gas viene fatta passare dentro la camera dove trova un campo elettrico generato da due elettrodi piani paralleli di bachelite, elettrodi resistivi. Il segnale che si genera a causa della ionizzazione nel gas viene trasferito alle strip (o alla pad) e a sua volta può essere integrato nel tempo generando una informazione sulla carica che viene letta da una scheda di acquisizione, ed eventualmente digitalizzata.

Le camere RPC a muoni fanno parte del sistema di trigger di CMS perciò sono vitali per tutto il rivelatore stesso, e la loro sostituzione una volta che l'esperimento sarà partito sarà molto problematica se non impossibile a meno di finestre temporali molto brevi durante le quali sarà possibile operare e mantenere il rivelatore e l'acceleratore stesso.

E' di massima importanza che ogni cosa funzioni perfettamente in quanto sottoterra a causa delle radiazioni sviluppate dal fascio non sono previste frequenti ispezioni.

Il materiale principale delle camere a RPC è la bachelite. Esso è un materiale composito formato da laminati plastici. Alla base del composito possiamo avere tessuti di cotone o carta che insieme ad una matrice di resine melamminiche e fenoliche polimerizzano formando una struttura consistente.

La polimerizzazione è un processo nel quale singoli monomeri si legano ricorsivamente formando grandi macromolecole.

Nello strato centrale della gap il tessuto viene imbevuto con una resina fenolica mentre i layer sono costruiti usando delle resine melamminiche.

Per ottenere una superficie uniforme i layer vengono trattati con olio di lino che polimerizza sulla superficie e la rende levigata e priva di difetti.

Il funzionamento di una camera a RPC consiste nell'imporre una differenza di potenziale a due strati di bacheliti. All'interno fra le due bacheliti, gli elettrodi

resistivi, si genera un campo elettrico che ionizza la miscela di gas che viene appunto fatta fluire all'interno della camera stessa.

La miscela di gas usata per le camere a RPC è questa: 95.4% Freon, 4.20% Isobutano e 0.30% SF<sub>6</sub>. Le bachelite sono poste ad una distanza di 2 mm grazie a degli spaziatori di resistività  $10^{13}$  Ohm cm, due ordini di grandezza più elevata della resistività della bachelite.

I rivelatori a RPC risentono delle radiazioni che accelerano il processo di aging peggiorando le performance, incrementando le correnti della camera stessa. Un altro fattore che influenza gli RPC è la qualità del gas che, specialmente se fatto ricircolare, può accumulare contaminanti, possibili causa di malfunzionamenti.

La strategia del Gas Gain Monitoring System (GGM), un sottorivelatore di CMS, è proprio quella di identificare online la presenza di contaminanti mediante altre camere a RPC opportunamente configurate; inoltre verranno usati anche i tradizionali metodi di ispezioni diretta del gas come gascromatografi e spettrometri di massa. Nel sistema di ricircolo sono comunque presenti filtri che purificano la miscela di gas, ma è in atto uno studio dedicato alla identificazione dei contaminanti generati dalle camere RPC per caratterizzare e ottimizzare i filtri.

### 3.c Il sistema di ricircolo

Il Closed Loop System (CLS) è un sistema il cui fine è il test del sistema di ricircolo del gas all'interno del rivelatore di particelle CMS. Nell'esperimento CMS è stato infatti adottato un tale sistema a circuito chiuso per limitare le ingenti spese economiche circa il consumo di gas. La miscela di gas 95.4% Freon, 4.20% Isobutano, 0.30% SF6 che alimenta gli RPC deve essere il più possibile priva di contaminanti che potrebbero alterare e nella peggiore delle ipotesi danneggiare queste camere. Nella figura 3.1 vediamo lo schema della distribuzione del gas di tutto l'apparato di CMS.

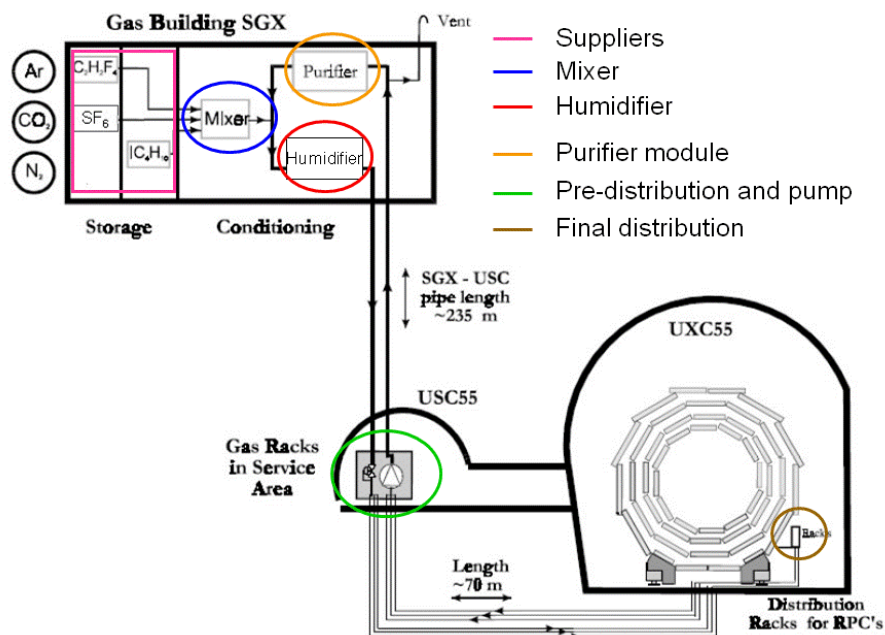


Figura 3.1 – Sistema di ricircolo di CMS, ref[40]

Le camere RPC per funzionare hanno bisogno di una miscela di particolare gas nella quale grazie al campo elettrico applicato dall'esterno avvengono ionizzazioni, registrate sulle pad della camera stessa.

Il sistema è stato progettato a circuito chiuso, il gas in uscita da ogni camera viene fatto circolare in un sistema che lo rimanda in input. A causa delle reazioni di ionizzazione bisogna considerare gli aspetti chimici che essa può provocare; sono stati proposti alcuni modelli partendo dalla chimica dei plasmi a bassa pressione

ma dal punto di vista teorico è molto difficile capire cosa accade in realtà. Perciò sono stati sviluppati particolari filtri che sperimentalmente catturano i contaminanti che si creano nelle camere in seguito al funzionamento prolungato nel tempo.

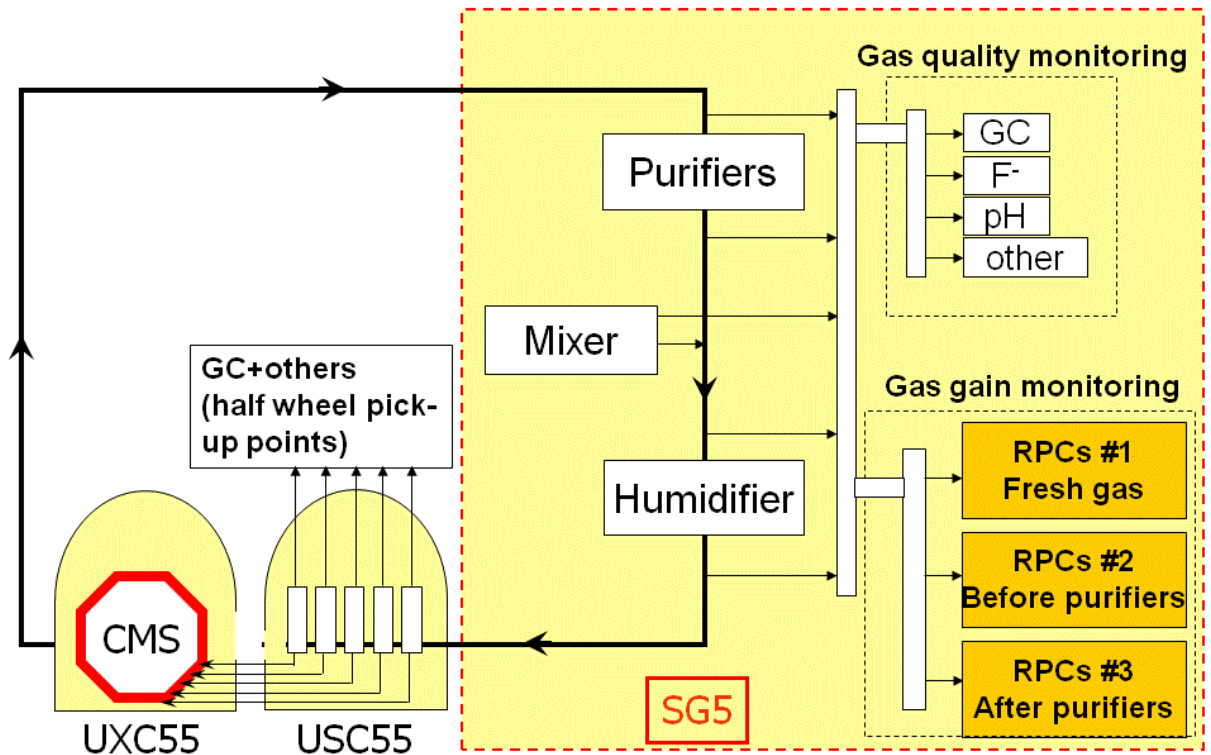


Figura 3.2 – Schema del ricircolo di CMS e GGM, ref[40]

All'interno del CERN, nel sito di Meyrin, e precisamente nell'ISR è stato posto il sistema test del ricircolo del gas di CMS. Nella stessa area dell'ISR si sono succedute installazioni di test di CMS e attualmente è installato e funzionante il sistema test del CLS. Il sistema è composto da 7 camere doppie gap più altre 4 doppie gap nuove e 12 camerette di dimensione ridotta flussate dalla miscela standard (95.4% Freon, 4.20% Isobutano e 0.30%).



In figura 3.3 vediamo la struttura di sostegno di alcune doppie gap nel setup ISR.

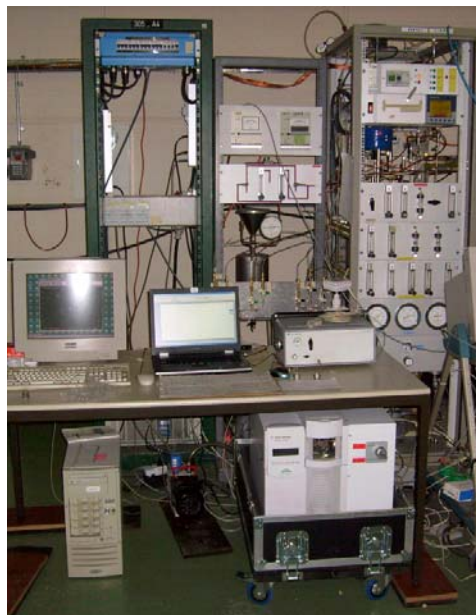


*Figura 3.3 – RPC in ISR*

Tutte le camere sono alimentate da alta tensione da appositi moduli e ne viene registrata la corrente e la carica, oltre al monitoring ambientale.

Le camere grandi misurano 200x100 cm e sono doppie gap, mentre le camere piccole misurano 50x50 cm e sono singola gap.

Nella figura 3.4 vediamo il rack principale del CLS.



*Figura 3.4 – ISR Setup*

Cuore del sistema è il rack del ricircolo. Il gas miscela standard in open loop viene fornito dalle linee in entrata alimentate dal “gas building”: area dove avviene lo stoccaggio e la messa in flusso delle bombole previo controllo di qualità. Nella figura 3.5 vediamo lo schema generale del CLS, in seguito parleremo di alcune variazioni fatte per permettere l’installazione del Chemical Setup (CS).

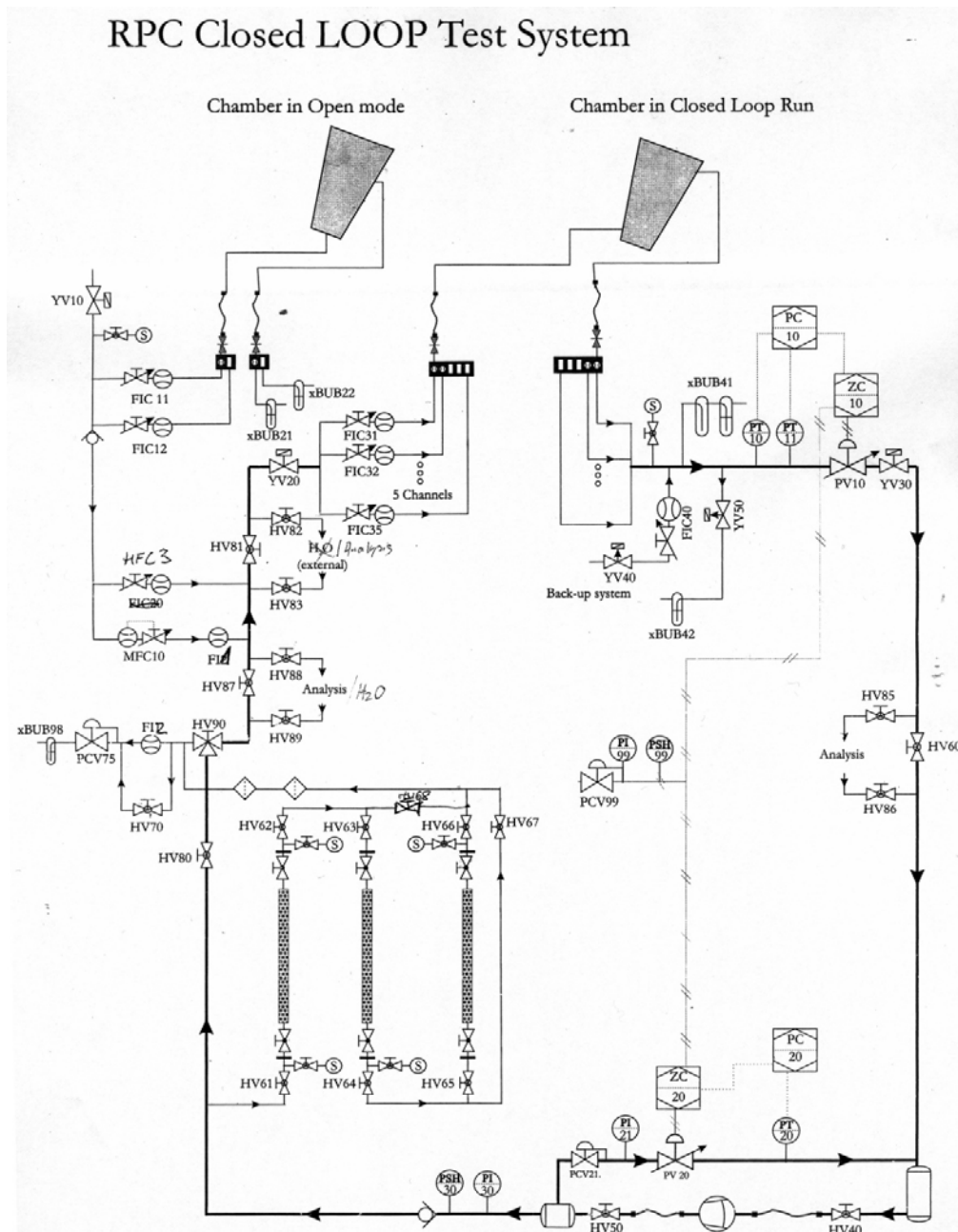


Figura 3.5 – Schema del closed loop in ISR

Quotidianamente sia la miscela in open che in closed loop viene controllata dal gascromatografo (GC) come si vede dalla figura 3.6, YV10 è il punto di prelievo della miscela fresca proveniente dalle bombole mentre HV83 è il punto di prelievo della miscela che ricircola nelle camere.

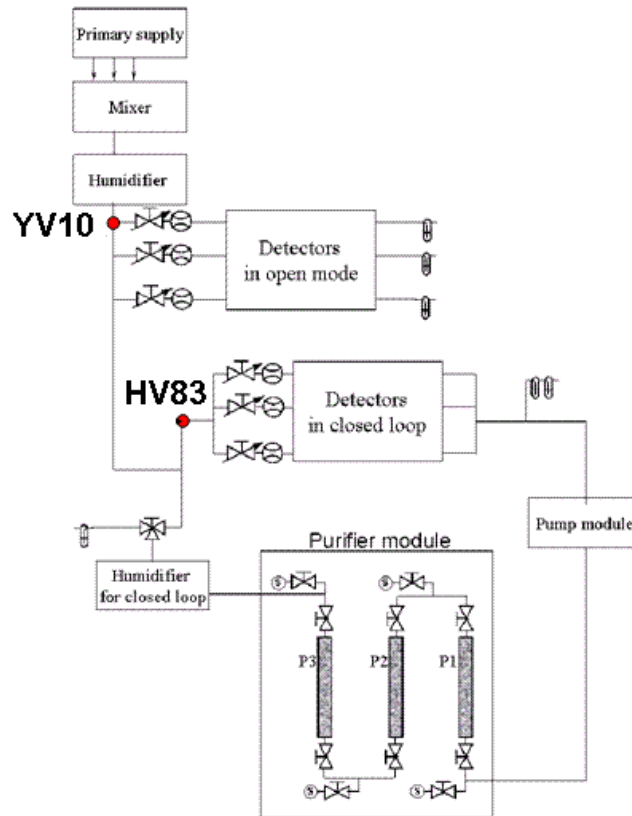


Figura 3.6 – Filtri e punti di campionamento closed loop, ref[39]

CMS prevede di operare con una percentuale di gas fresco, immesso nel gas in ricircolo, del 5-10%. La pompa all'interno del rack provvede a far fluire la miscela di ricircolo nelle camere passando attraverso appositi e studiati filtri che sono stati introdotti col fine di limitare e cancellare contaminanti, generabili durante il processo di ionizzazione dovuto a particelle che attraversano la camera RPC stessa.

### 3.d Studi di filtri all'ISR

Nel CLS sono stati adottati 3 tipi di filtri diversi. Questa combinazione di filtri è frutto di parecchi lavori svolti in passato che hanno fornito un setup stabile e funzionante. Il primo filtro è la Zeolite, un setaccio molecolare, mentre il secondo e il terzo sono filtri metallici Nickel, Nickel-Alluminio, Rame Zinco. Nella figura 3.7 vediamo un prospetto dettagliato della configurazione dei filtri.

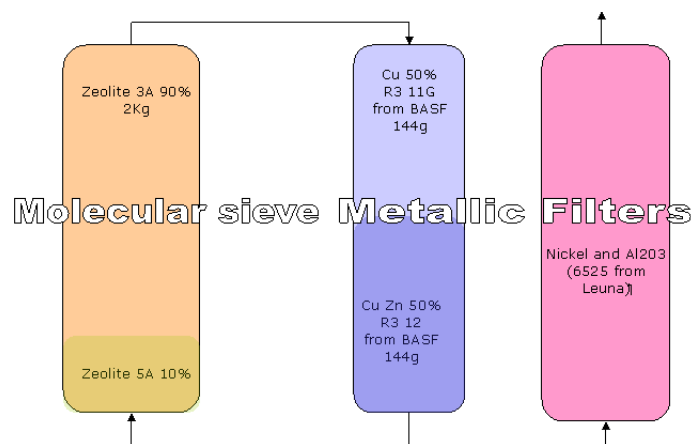


Figura 3.7 – Filtri per purificazione gas

Il gas entra nel primo filtro e trova prima la Zeolite 5A e poi la Zeolite 3A. Dopo il primo filtro a setaccio molecolare ci sono due filtri metallici. Nella prima parte del secondo filtro abbiamo Rame mentre nella seconda parte Rame e Zinco (R3 11G BASF e R3 12 BASF). L'ultimo filtro è un filtro di Nickel e Alluminio (6625 Leuna). Nati per rimuovere  $O_2$  e  $H_2O$ , i filtri sono stati ottimizzati utilizzando la migliore combinazione che riduceva il numero di contaminanti spuri da un'analisi gas cromatografica. Gli aspetti della chimica e la caratterizzazione dei filtri tuttavia non sono stati mai effettuati in profondità, e al fine di comprendere completamente e ottimizzare si è realizzato il sistema di test all'ISR.

Lo studio principale del CLS è valutare la tempistica di rigenerazione o sostituzione dei filtri. Infatti nel rivelatore CMS è fondamentale avere una schedula che riguarda la manutenzione di questi filtri per non compromettere le performance delle camere

RPC flussate dal gas, contaminabile a causa di filtri saturi. Accanto al setup del sistema di ricircolo del gas in ISR a marzo è stato predisposto un nuovo sistema che accanto al monitoring delle correnti delle doppie gaps e delle camerette del GGM effettuerà un'analisi in continuo dello stato delle impurità presenti nel gas quando si è in regime di ricircolo: il CS.

E' stato ampiamente dimostrato infatti che bacheliti non flussate mostrano una composizione chimica con differenti contenuti degli elementi in traccia rispetto alle bacheliti flussate; si nota un impoverimento di Cu, Ni, As, Cr e Sb, che sarebbero immessi nel sistema gassoso; inoltre le bacheliti flussate presentano difetti (NaF). Oltre inquinanti attesi come HF, Na, Ca, abbiamo appunto metalli pesanti, solfuri e probabilmente altri contaminanti che hanno un ruolo chiave per esempio nell'innalzamento delle correnti che periodicamente vediamo. Dopo tale innalzamento di correnti, di norma, viene effettuata una rigenerazione dei filtri, processo non previsto dal produttore e che consiste nel flussaggio di Idrogeno e Argon a 200 °C per 12 ore, per ridurre i metalli dei filtri, tuttavia non è del tutto chiara la sua utilità. Il Setup chimico nell'ISR verificherà anche tra le altre cose l'utilità di questa rigenerazione. Nella figura 3.8 vediamo uno schema di principio del funzionamento del CS.

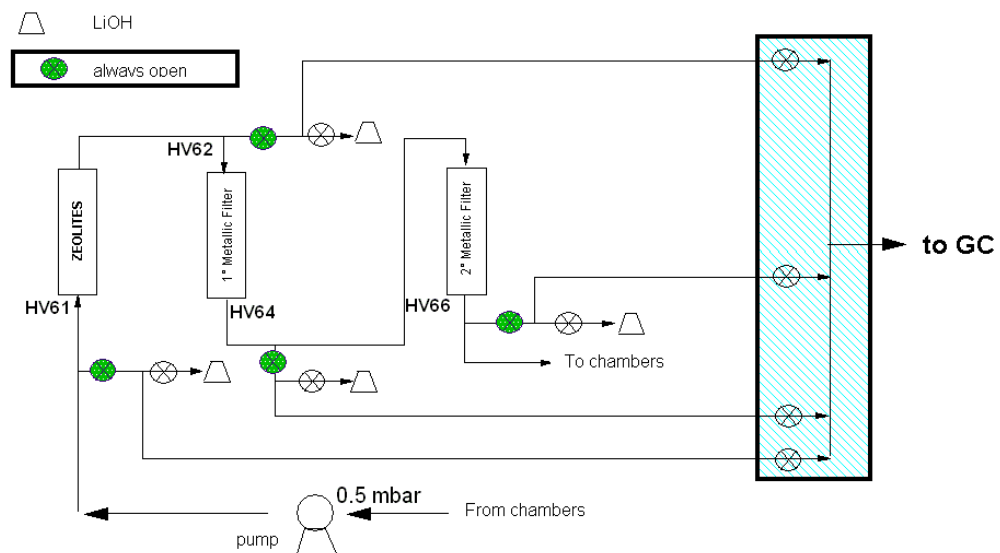


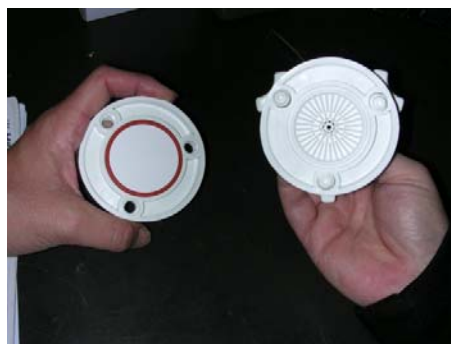
Figura 3.8 – Schema del setup chimica

Vediamo che prima e dopo i 3 filtri del CLS sono stati predisposti nuovi punti di prelievo oltre ai vecchi punti di prelievo che portano al GC. Da questi 4 punti di prelievo partono 4 linee che arrivano a dei gorgogliatori che vediamo in figura 3.9.



*Figura 3.9 – Gorgogliatori del setup di chimica*

Nei gorgogliatori è presente della soluzione di idrossido di litio e il programma prevede di flussare queste bottiglie in certi intervalli temporali, dopo i quali verranno analizzate. Misurando quotidianamente la portata del flusso sarà possibile effettuare misure quantitative sulla presenza di contaminanti presenti nel CLS rispetto a tutto il gas flussato nelle camere. Abbiamo predisposto anche dei filtri particolato da  $0,4\ \mu\text{m}$  come si vedono in figura 3.10, molto più piccoli dei pre-filtri presenti prima e dopo ogni filtro del closed loop ( $20\ \mu\text{m}$ ).



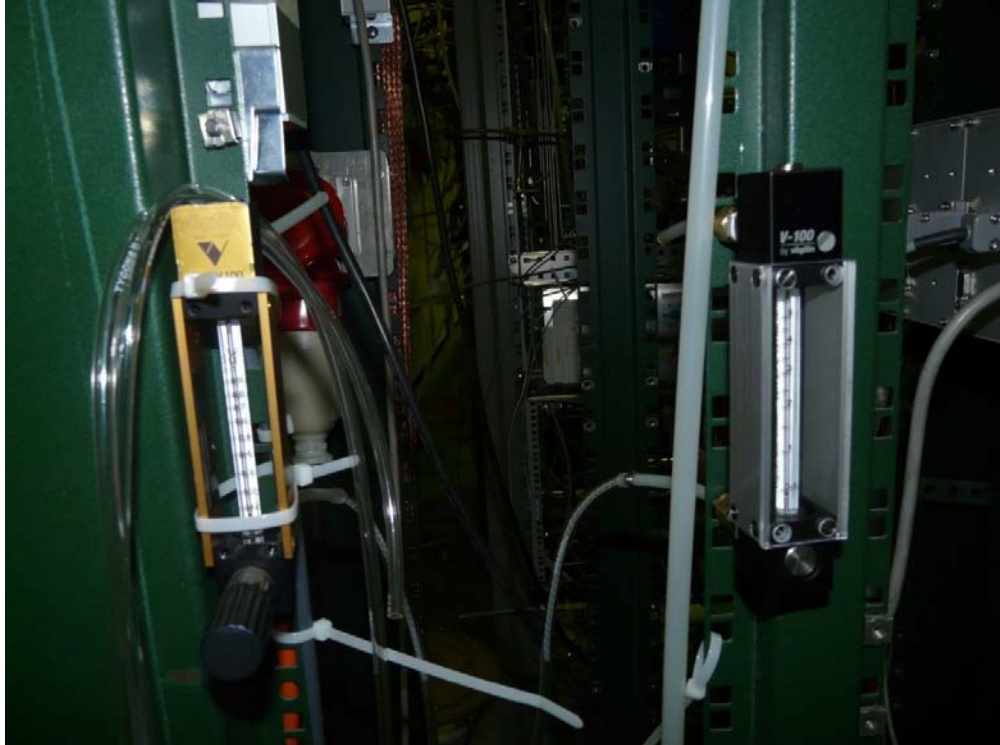
*Figura 3.10 – Filtri del setup di chimica*

### 3.e Calibrazione flussimetri

Nel CS, per misurare la portata di gas su ogni linea di campionamento, era stato installato un flussimetro a bolla che quotidianamente veniva usato di volta in volta su ogni linea.

In seguito abbiamo deciso di modificare questa installazione ponendo 4 flussimetri online uno su ogni linea. I flussimetri installati sono certificati e calibrati in aria che ha un peso molecolare molto diverso dal freon, quest'ultimo pesa quasi il triplo. Oltre al peso molecolare diverso cambiano alcuni parametri fisico/chimici del gas che non rendono possibile una proporzione lineare tra il flusso in aria e quello in freon, perciò abbiamo calibrato i nuovi flussimetri con il flussimetro a bolla che non risente del tipo di gas utilizzato.

Per avere una fine risoluzione abbiamo messo in serie al flussimetro da calibrare un flussimetro con una scala più ridotta che per questo può più finemente variare il flusso a monte del flussimetro da calibrare, come in figura 3.11.



*Figura 3.11 – Calibrazione flussimetri*

Per calibrare il flussimetro abbiamo impostato i valori di flusso da 1 a 3 litri per ora variando di 0.5 litri/ora e abbiamo scritto i valori ottenuti dal flussimetro a bolla.

Misura 1 (s)	Misura 2 (s)	Misura 3 (s)	volume (ml)	Equivalenza in litri / ora			Valore Medio	Deviazione Standard
9,49	9,54	9,35	20	1,26	1,26	1,28	1,27	0,01
5,54	5,5	5,30	20	2,17	2,18	2,26	2,20	0,05
4,15	4,21	3,98	20	2,89	2,85	3,02	2,92	0,09
4,41	4,43	4,5	30	4,08	4,06	4,00	4,05	0,04
4,17	4,32	4,23	30	4,87	4,92	4,76	4,85	0,08

Facendo un fit con un polinomio di primo grado (retta) abbiamo ottenuto la curva di calibrazione in figura 3.12. Il valore di  $\chi^2$  mostra che la qualità del fit non è ottimale, ma in ogni caso la determinazione della retta di calibrazione è adeguata per gli scopi di questo studio.

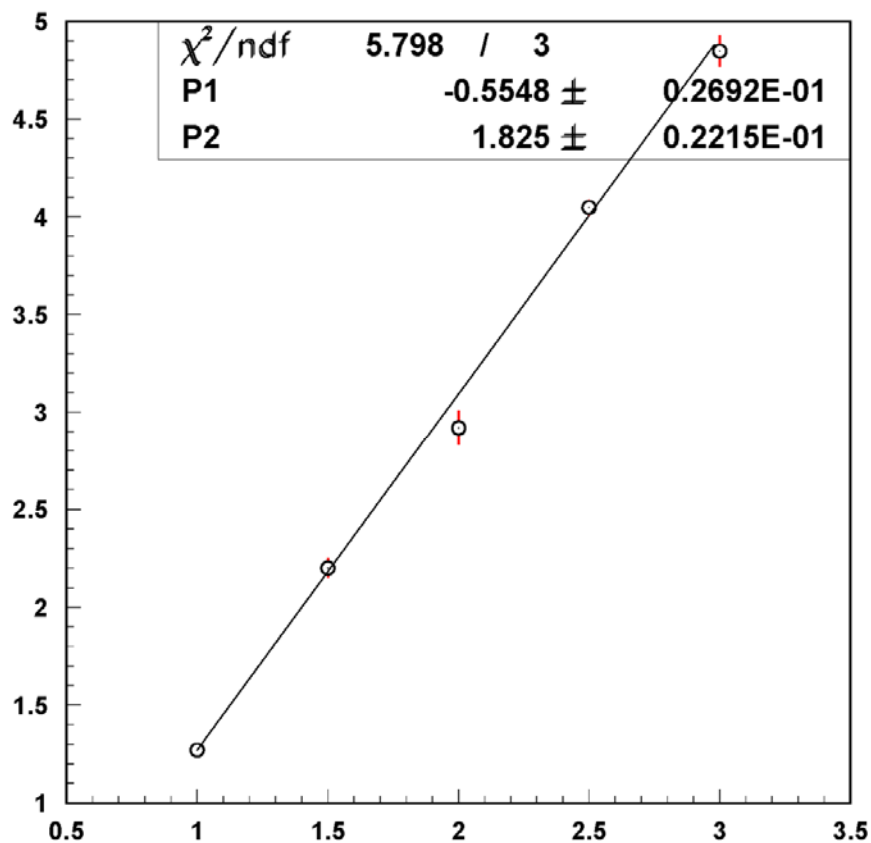


Figura 3.12 – Fit sui dati sperimentali affetti da errori



### 3.f Correnti camere grandi

Nelle figure seguenti vediamo dei grafici di esempio tratti dalla vita delle camere a RPC che monitoriamo in ISR. L'andamento della corrente tirata da una camera RPC essenzialmente dipende dalla miscela di gas e dalle sue condizioni ambientali quali: temperatura, pressione, umidità (sia dell'ambiente circostante e sia della miscela di gas). La miscela di gas influenza la risposta della camera perché cambia il punto di lavoro della camera stessa facendola operare in diversi regimi in relazione alle "capacità ionizzanti" della miscela di gas.

In ISR operiamo con variabili ambientali costanti quali: Temperatura 20° C e umidità 40%; grazie a umidificatori, deumidificatori e climatizzatori. Questo consente col passare del tempo di fare raffronti sul comportamento della camera.

Come vediamo dalla figura 3.13 le correnti delle camere periodicamente oscillano tra un valore massimo e un valore normale. Il valore normale è quello relativo alla corrente tirata in condizioni di open-loop mentre la corrente massima tirata è quella relativa a condizioni di closed-loop dopo circa un paio di mesi quando a causa del ricircolo di gas i filtri hanno esaurito le loro capacità filtranti e non purificano più la miscela, dove, essendo presenti contaminanti incrementano le correnti delle camere peggiorandone le prestazioni. Nella figura 3.13 si vedono in un diagramma stellare un plot riassuntivo relativo alla situazione intermedia proprio nel passaggio dal closed-loop all'open-loop. Infatti dopo che le correnti aumentano per il fatto di aver operato in ricircolo, le camere vengono rinfrescate con gas in fresco per un certo tempo fino a quando le correnti non tornano normali, a quel punto i filtri vengono sostituiti o rigenerati e si ricomincia il ciclo di salita di corrente. Queste fasi stanno permettendo di capire la natura dei contaminanti stessi, effettuando campionamenti ad hoc in ogni fase descritta.

Nelle immagini successive vediamo la storia di ogni camera da aprile 2007. In alcune occasioni ci sono stati dei picchi di corrente dovuti a saturazioni dei filtri, ma questo non è accaduto per tutte le camere; inoltre come si vede dalle figure 3.14 e seguenti, l'environment non è sempre stato costante ed ha risentito di variazioni

stagionali che possono essere corrette teoricamente da formule empiriche come questa:

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

$$P_0 = 1010mbar \quad T_0 = 293,5K$$

Che mostra come la tensione vista dagli elettrodi non è quella applicata ma deve essere corretta con la pressione, temperatura relative.

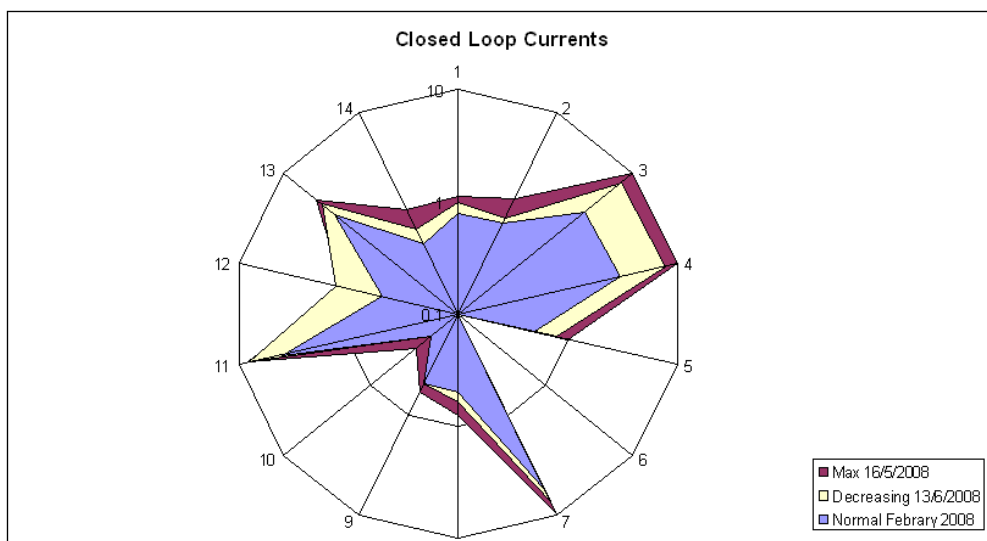


Figura 3.13 – Quadro riassuntivo correnti RPC closed loop

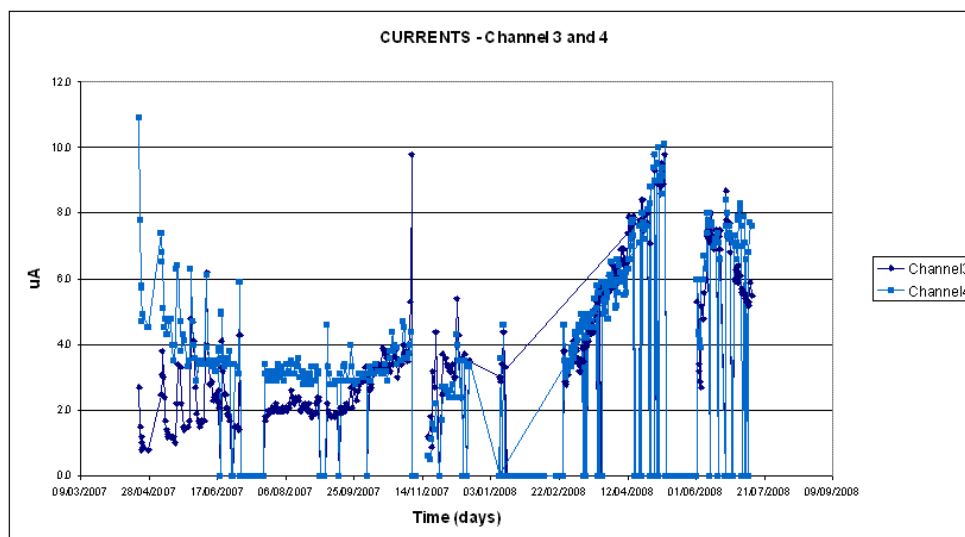


Figura 3.14 - RPC closed loop canali 3 e 4

## ENVIRONMENT

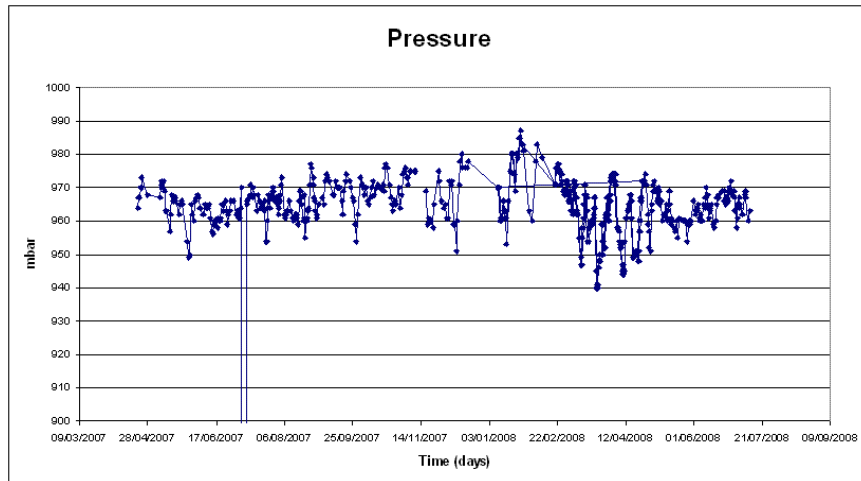


Figura 3.15 Andamento pressione da luglio 2007 a maggio 2008

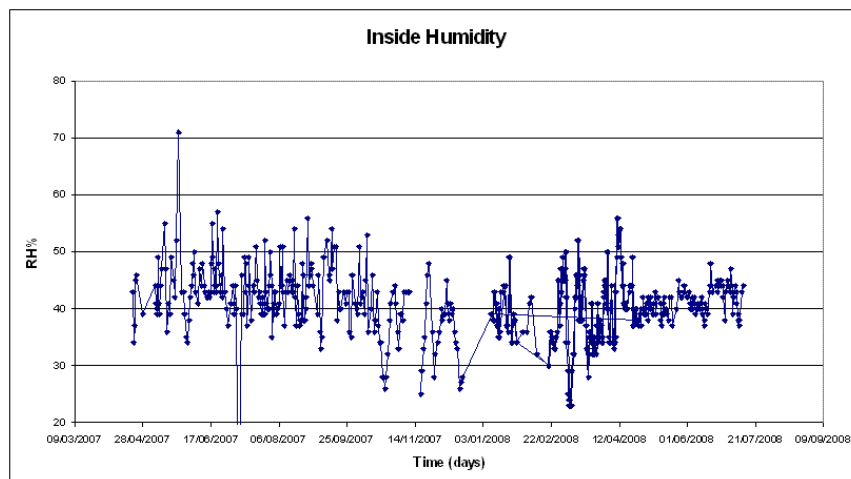


Figura 3.16 - Andamento umidità dentro capanna RPC da luglio 2007 a maggio 2008

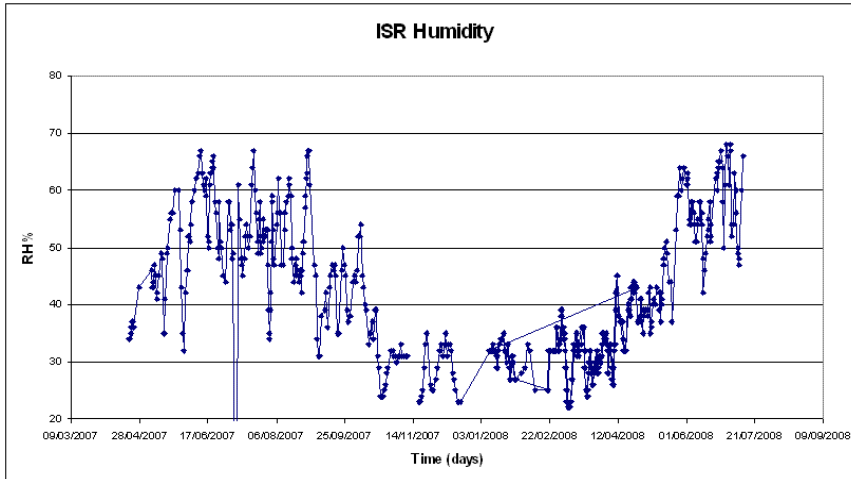


Figura 3.17 - Andamento umidità ISR da luglio 2007 a maggio 2008

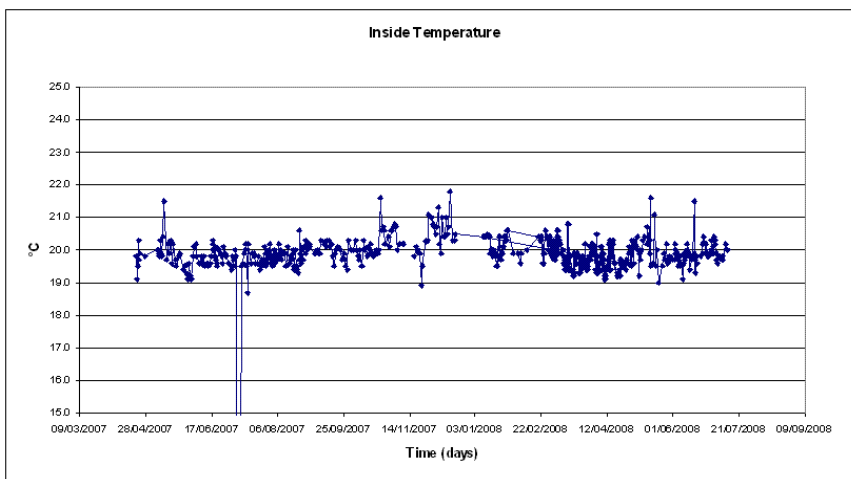


Figura 3.18 - Andamento Temperatura dentro capanna RPC da luglio 2007 a maggio 2008

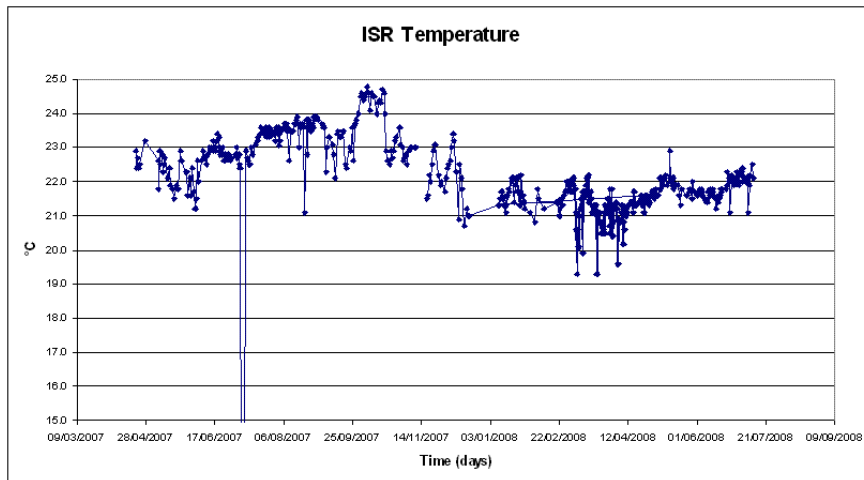


Figura 3.19 - Andamento Temperatura ISR da luglio 2007 a maggio 2008

### 3.g Conclusioni

Il setup dell'ISR è di fondamentale importanza per la corretta gestione e manutenzione dell'esperimento CMS. Infatti come abbiamo visto nel suddetto setup è stato installato il medesimo sistema di ricircolo, seppure in scala ridotta, del gas che lavora su tutto l'esperimento CMS. Accanto a questo setup abbiamo un monitoraggio e campionamento continuo che allo stato attuale ci permette di studiare l'evolvere del sistema e presto ci permetterà di operare su di esso, in special modo sui filtri, al fine di migliorare le performance e garantire un funzionamento migliore a tutto l'esperimento CMS.

Ho realizzato e seguito in prima persona la gestione dell'ISR curando il sistema quotidianamente attraverso un monitoring costante di tutti i parametri al fine di garantire un corretto funzionamento di tutti i sottosistemi. Questo ha consentito di avere uno storico dell'evoluzione del sistema molto preciso e dettagliato che consente di eseguire una notevole serie di analisi.

## 4 GAS GAIN MONITORING SYSTEM

## 4.a Introduzione

In questo capitolo vengono illustrate motivazioni, caratteristiche progettuali, realizzazione, commissioning e prestazioni del sistema di gas gain monitoring (GGM) per rivelatori RPC di CMS.

Questo capitolo contiene importanti elementi di originalità essendo stati sviluppati come parte integrante e qualificante del lavoro di tesi: il software di lettura dell'elettronica di acquisizione, l'intero package di analisi dei dati in uscita dal GGM, lo studio della risposta del GGM alle variazioni ambientali, la determinazione delle variabili discriminanti attuali, l'integrazione del software di analisi nel framework ufficiale dei controlli di CMS, la modellizzazione con la rete neurale per nuovi modelli teorici sul comportamento degli RPC.



## 4.b Il sistema di gas gain monitoring

Il gas gain monitoring system (GGM) è un telescopio di raggi cosmici costituito da piccoli rivelatori a RPC di cui viene controllato il punto di lavoro online. Tale sistema di monitoring è progettato per provvedere una veloce e rapida determinazione di ogni spostamento del punto di lavoro e correlare tale spostamento del punto di lavoro ad una possibile impurezza nella miscela di gas.

E' fondamentale che il gas sia privo di contaminanti; per questo scopo i componenti della miscela e la miscela stessa sono continuamente controllati con gascromatografi ma questa tecnica si è rivelata insufficiente a prevenire alcuni fenomeni che potrebbero danneggiare le camere nel lungo periodo. La pericolosità dei contaminanti, primo fra tutti l'aria, risiede nel fatto che possono far aumentare la corrente (carica) letta dalle strip degli RPC; il GGM usa proprio camere a RPC per monitorare la qualità del gas, correlando una misura di carica sulle pad di piccole camere RPC si ottiene una stima della qualità del gas; infatti uno spostamento del punto di lavoro del sistema indica una miscela di gas che è cambiata. Lo schema del GGM è in figura 4.1; abbiamo 12 camerette, di cui 4 forniscono il trigger, mentre altre 8 camerette sono usate per il monitoring.

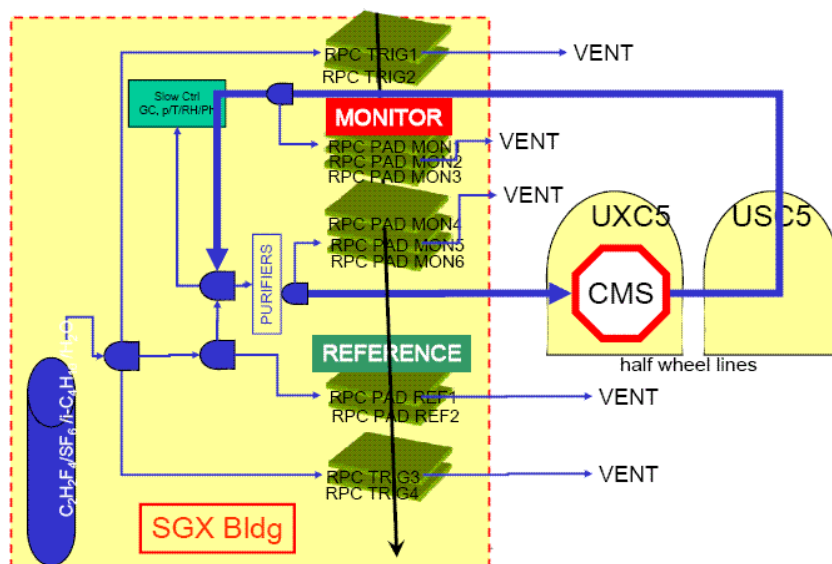


Figura 4.1 – Schema del GGM in CMS, ref[40]

Nel monitoring vengono tenute sotto controllo 2 camere flussate con gas fresco proveniente dall'open-loop, 3 camere flussate con gas di ricircolo proveniente da CMS e altre 3 camerette flussate con gas di ricircolo sempre di CMS ma dopo che quest'ultimo è stato depurato da appositi filtri.

All'ISR, dove il GGM è stato commissionato, ha lavorato prevalentemente con tutte e 8 le camere in open-loop e sta per essere testato con alcune camere in ricircolo con gas prelevato dopo i filtri; i filtri usati all'ISR sono identici come materiali a quelli usati in CMS, come del resto anche la miscela di gas, tipo di camere RPC e le loro condizioni operative.

Il contributo personale al GGM è consistito dapprima nello sviluppo del software di acquisizione e in seguito nello sviluppo di una serie di post-processor che hanno reso il monitoring un processo semi-automatico. Sempre sull'aspetto software sono stati, inoltre, considerati molti modi su come integrare il GGM in CMS, alcune idee stanno trovando applicazione e sono in fase avanzata di realizzazione. Infine il GGM viene seguito costantemente, come il CLS, al fine di garantire un perfetto funzionamento.

## 4.c Elettronica e Sistema di acquisizione

Il sistema di acquisizione sviluppato è in grado di leggere da un modulo adc la carica letta dalle pad delle camerette e memorizzarla-catalogarla in opportuni file dati. L'adc è un CAEN 2718, installato su un crate VME connesso con una fibra ottica al computer daq, deputato all'acquisizione.

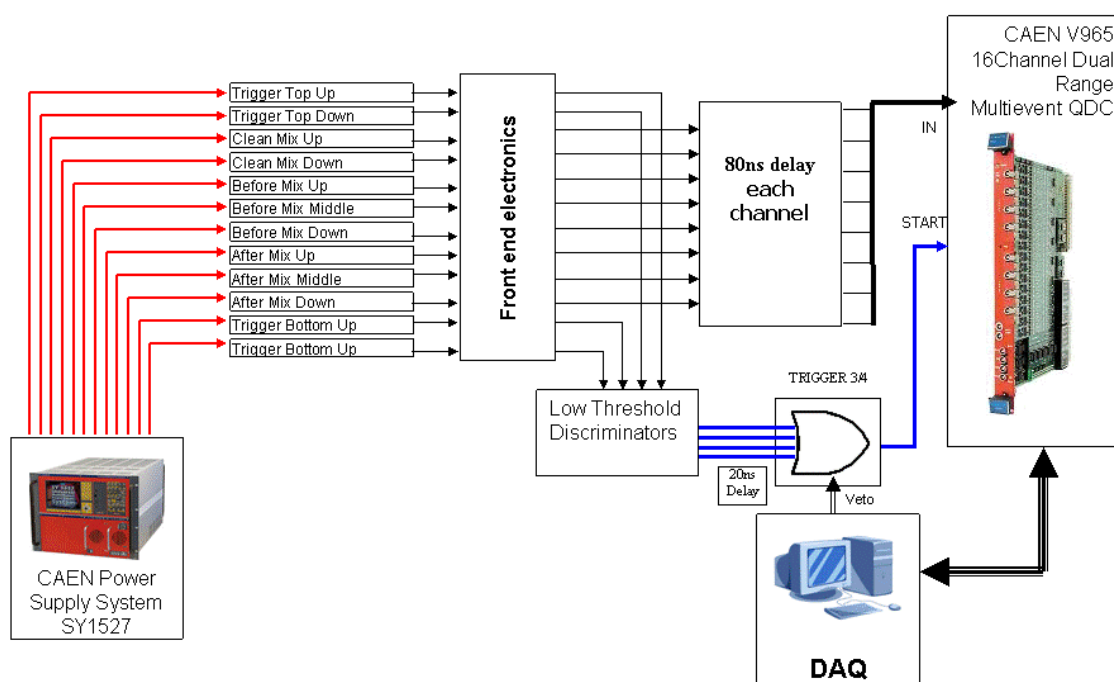


Figura 4.2 – Setup GGM in ISR, ref[41]

Nella figura 4.2 vediamo uno schema dell'impianto del GGM in ISR. Le nostre 12 camerette, alimentate dal modulo di alta tensione SY1527 della CAEN, generano un segnale che elaborato dall'elettronica di front-end viene digitalizzato dall'adc che viene letto dal controller VME 2718 della CAEN per mezzo di una fibra ottica che è connessa ad uno slot pci del computer.

Il computer appunto tramite il controller CAEN sul crate VME legge il buffer dell'adc e dopo aver effettuato opportuni controlli e conversioni ne memorizza il contenuto in file raw.

Il file raw è organizzato nel seguente modo:

Reading ADC Caen v965 controlled by Caen V2718 - LOW RANGE  
Thu 2007-09-06 10:27:28 CEST The run number is: 410

event_number	unixtime	caen_event	channel1	...
--------------	----------	------------	----------	-----

Nella prima colonna viene indicato il numero di evento relativo al run in esecuzione, nella seconda colonna abbiamo il timestamp in unixtime, nella terza abbiamo il numero di evento progressivo memorizzato dal caen e dalla quarta colonna in poi troviamo i valori dei canali dell'adc digitalizzati.

La conversione analogico-digitale avviene su due registri: High Range e Low Range; nel Low Range ogni canale adc corrisponde a 8 femto Coulomb mentre nel registro High Range ogni canale corrisponde a 25 femto Coulomb.

Il software di acquisizione leggendo interamente il buffer memorizza entrambi i registri e li salva su due file distinti. Inoltre durante l'acquisizione è stato implementato via hardware (e conseguentemente via software) un sistema per ottenere il piedistallo automatico. Questo sistema consiste nell'usare un doppio gate; il secondo gate nasce con un ritardo di un millisecondo rispetto al primo, (durante questo tempo l'adc viene inibito) e l'adc converte il segnale di rumore presente su quel canale. L'acquisizione perciò per ogni evento ha due informazioni: la prima contenente il segnale e il rumore, e la seconda con il solo rumore. Tutto questo viene memorizzato in diversi file, ottenendo un file di puro piedistallo, un file di piedistallo e segnale, e un file di puro segnale; tutto questo per entrambi i registri dell'adc, High e Low.

Il rate di acquisizione dipende dalla frequenza dei raggi cosmici che in ISR, quando le camere di trigger sono pienamente efficienti, è circa 5Hz.

Abbiamo testato e sviluppato il software e l'elettronica fino a 1kHz, per evitare di perdere degli eventi che potrebbero essere molto ravvicinati nel tempo, anche avendo una frequenza medio bassa.

Nella figura 4.3 si vede l'evoluzione non in scala delle versioni software che si sono succedute.

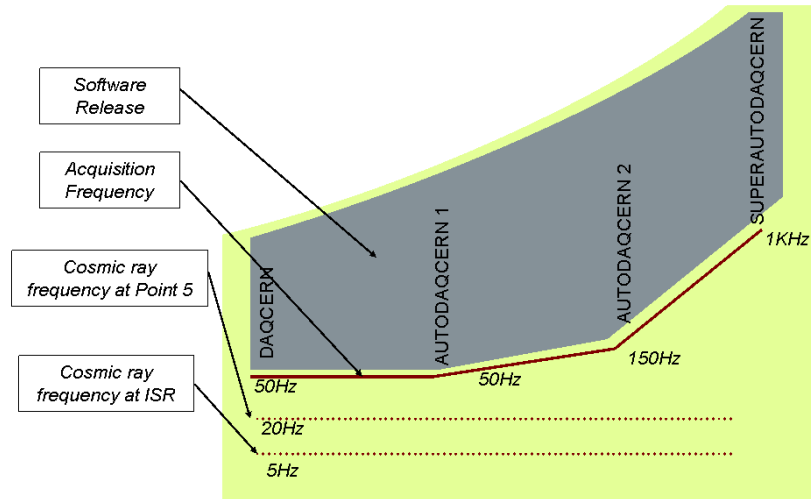


Figura 4.3 – Sviluppi del DAQ

In particolare è stato rilevante il problema dello sviluppo di software performante in quanto per eliminare il piedistallo di rumore presente in ogni segnale acquisito operando col sistema del doppio gate è necessaria una perfetta sincronia del sistema e una perfetta acquisizione che non perda mai un evento. Se succedesse si verificherebbe uno scavallamento di eventi che porta a confondere gate di segnale con gate di rumore e viceversa.

Infine è stata scritta una nota interna ai Laboratori Nazionali Frascati riguardante tutti i package sviluppati ref[43].

## 4.d Funzionamento

In realtà lo spostamento del punto di lavoro delle camere a RPC può dipendere anche da fattori esterni alla miscela dei gas: per esempio variazioni ambientali di pressione, umidità o temperatura variano la tensione equivalente applicata alla camera, e di conseguenza variano il punto di lavoro. Queste variazioni però incidono su tutte le camere, sia quelle di riferimento (alimentate con gas noto), sia quelle alimentate con gas di ricircolo; perciò sono effetti cancellabili, data la ridondanza del sistema

Nella figura 4.4 vediamo un esempio di segnale proveniente da una delle camerette del GGM ottenuto con l'oscilloscopio.

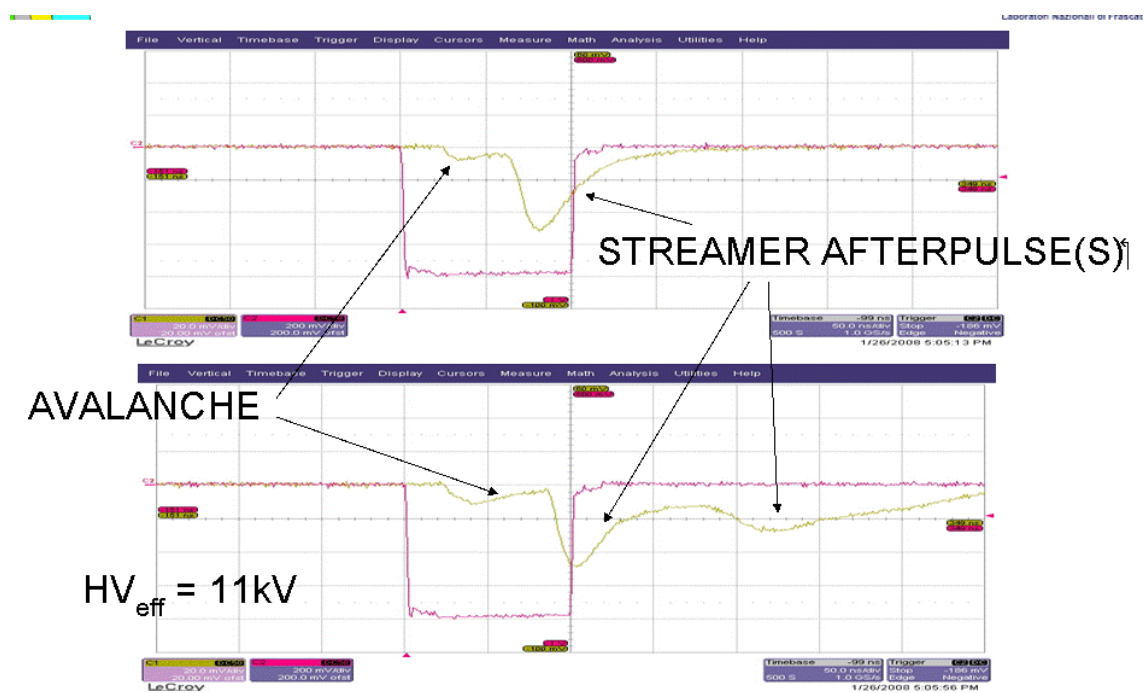


Figura 4.4 – Segnali di Avalanche e Streamer sull'Oscilloscopio

Vediamo tracciato in rosso il segnale del gate e in giallo il relativo segnale prelevato dalla pad della camera a RPC. Si notano diverse regioni: la prima regione è il precursore (Avalanche), mentre la seconda rappresenta effetti secondari (Streamer) che si generano o possono generare dal precursore, in

particolari condizioni. Questo ultimo segnale dipende fortemente dal tipo di miscela di gas e dalla tensione applicata agli elettrodi.

E' stato verificato, anche nel setup dell'ISR che per esempio una modifica della composizione della miscela fa alterare la presenza dello streamer. In particolare l'esperimento condotto ha fatto crescere enormemente lo streamer rispetto all'avalanche di circa 40 volte diminuendo nella miscela la frazione di SF6.

In figura 4.5 vediamo un istogramma relativo a 10000 eventi dove si vedono chiaramente distinte 3 zone. La prima è una gaussiana molto stretta e rappresenta il piedistallo di rumore del canale di lettura adc, la seconda area è una curva approssimabile ad una funzione landau e rappresenta il segnale di Avalanche, mentre l'ultima area è il segnale di Streamer.

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} e^{-\frac{1}{2}(x+e^{-x})} \quad \text{Funzione di Landau}$$

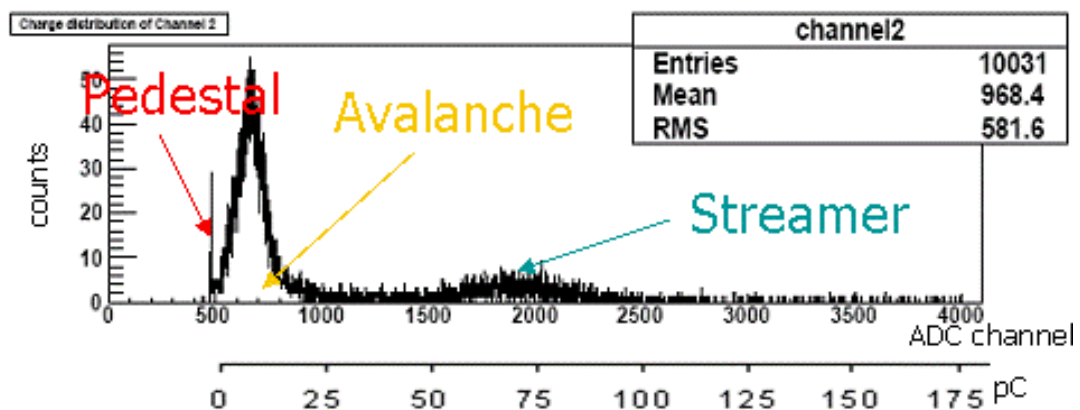


Figura 4.5 – Spettro di segnale

Il nostro software di acquisizione esegue dei fit di queste distribuzioni per valutare l'efficienza della camera, e il rapporto streamer/avalanche, variabile molto sensibile a cambiamenti del punto di lavoro.

Nella figura 4.6 si vede esplicitamente questa sensibilità. Infatti modificando la tensione applicata agli elettrodi da 9.4kV a 10.2kV si passa da un regime di streamer completamente assente ad un regime di avalanche e streamer.

In questo ultimo regime la carica media integrata è ovviamente maggiore perciò osservando la variabile carica media è possibile monitorare se ci sono stati cambiamenti del punto di lavoro del sistema.

Un altro regime interessante per vedere una variazione del punto di lavoro è quello relativo al solo avalanche con tensioni fino a 9.8kV, quando si è in plateau di efficienza al contrario delle tensioni a 9.4kV dove la camera ha un'efficienza di circa il 50%.

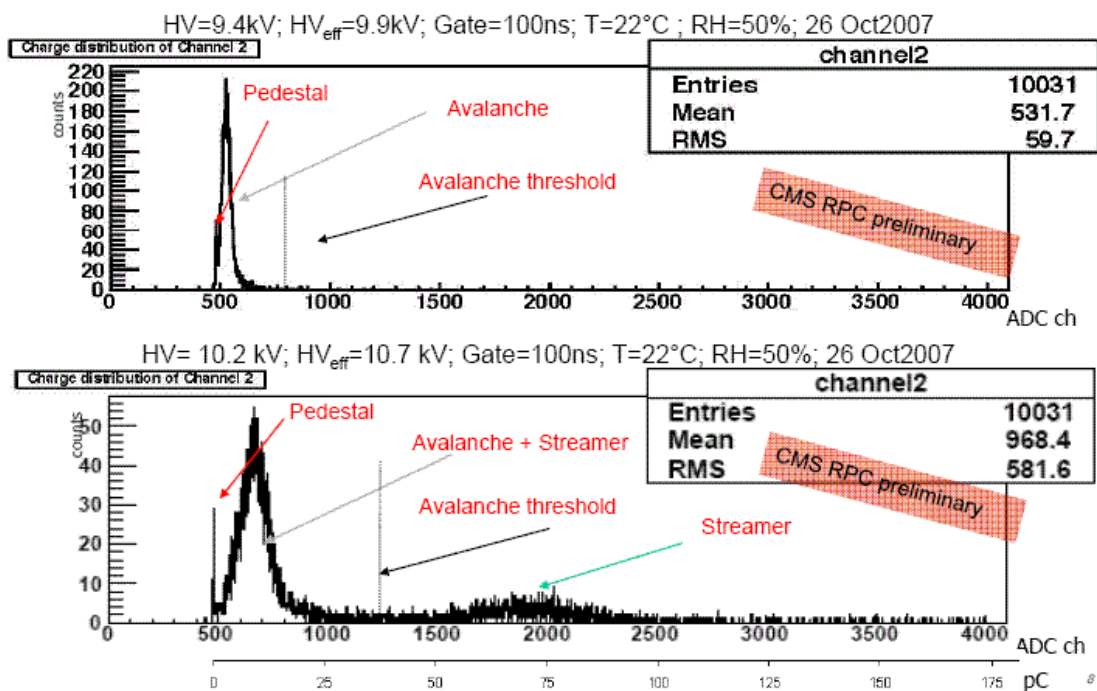


Figura 4.6 – Spettri di segnale relativi a punti di lavoro diversi

A tal proposito per quanto riguarda l'efficienza delle camere RPC, di seguito in figura 4.7 abbiamo fatto uno scan di tensione e calcolato l'efficienza e la frazione di streamer. Le camere raggiungono un'efficienza del 98% a 9.8kV quando lo streamer ancora non è presente. A tensioni superiori l'efficienza è arrivata al plateau e cominciano a crescere i conteggi dello streamer, quelli dell'avalanche diminuiscono relativamente.



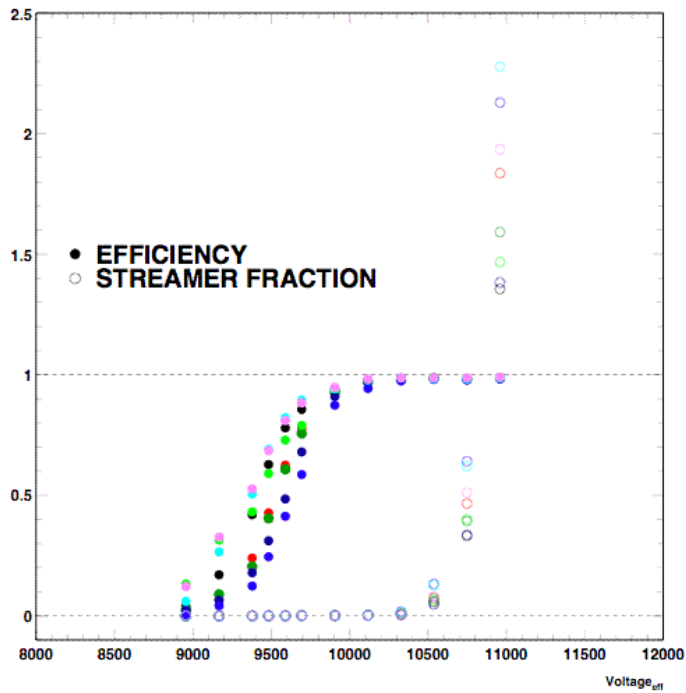


Figura 4.7 – Scan Efficienza RPC GGM

Questo è ancora più chiaro nella figura 4.8 dove sulle ordinate sono riportati i conteggi dell'avalanche e streamer.

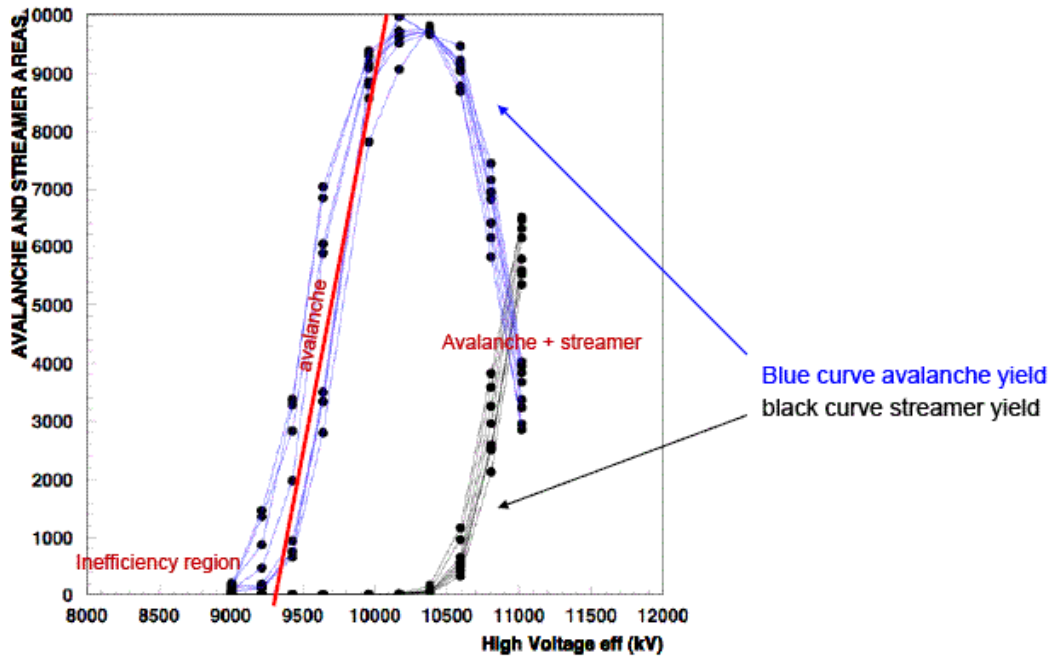


Figura 4.8 – Variazione del punto di lavoro dovuta alla HV

Vediamo la crescita dell'avalanche dal regime di inefficienza fino alla piena efficienza e poi vediamo la decrescita dei conteggi dell'avalanche in favore dei conteggi di streamer. Quando lo streamer e l'avalanche sono paragonabili abbiamo che il loro rapporto è unitario; nella figura 4.8 vediamo 5000 conteggi ciascuno in quanto abbiamo standardizzato l'acquisizione a fare run 10000 eventi. Per tensioni minori di 9.5kV circa siamo in regime di inefficienza della camera, mentre fino a 10kV si è in regime di avalanche con uno slope di  $1.25\text{pC} / 10\text{ Volt}$ . Oltre 10kV accade che il numero di conteggi avalanche diminuisce perché inizia a nascere il segnale di streamer che man mano diventa molto preponderante se la tensione supera 10.4kV.

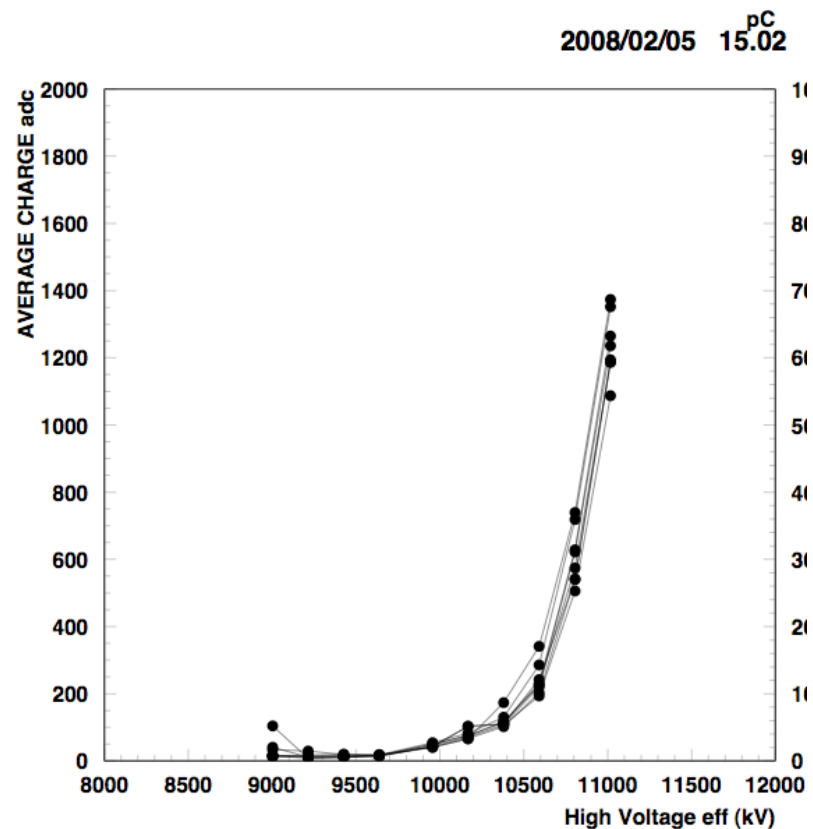


Figura 4.9 – Variazione del punto di lavoro dovuta alla HV

La stessa transizione dal regime di avalanche puro al regime di avalanche-streamer la possiamo osservare nella figura 4.9 dove viene stimata la sensibilità della variazione della carica media sul punto di lavoro (alta tensione applicata).

E' anche chiaro dalla figura 4.8 e 4.9 la variazione del punto di lavoro in ragione dell'alta tensione applicata alle camere. I regimi più sensibili sono appunto quelli di transizione.

In figura 4.11 vediamo un plot di monitoring delle variabili sensibili relativo a condizioni ambientali di cui in figura 4.10 ed è chiara la connessione tra l'andamento della pressione e l'andamento della carica media. Le camere a RPC si comportano come perfetti barometri, questo effetto dovrà essere corretto a regime di funzionamento per identificare spostamenti del punto di lavoro dovuti esclusivamente a modifiche nella miscela del gas e non a condizioni ambientali cambiate. I plot di cui in figura 4.11 sono plot riassuntivi che mostrano l'andamento nel tempo degli spettri dell'adc.

In realtà tutti gli effetti delle variabili ambientali sono eliminabili in quanto il GGM è composto da 12 camerette e questa ridondanza permette una facile eliminazioni degli effetti comuni a tutte le camere. A titolo di esempio nelle figura 4.12 e 4.13 riportiamo gli andamenti delle cariche medie di due camere poste a tensione diversa e osserviamo la medesima influenza della pressione se pur in modo proporzionale alla alta tensione applicata.

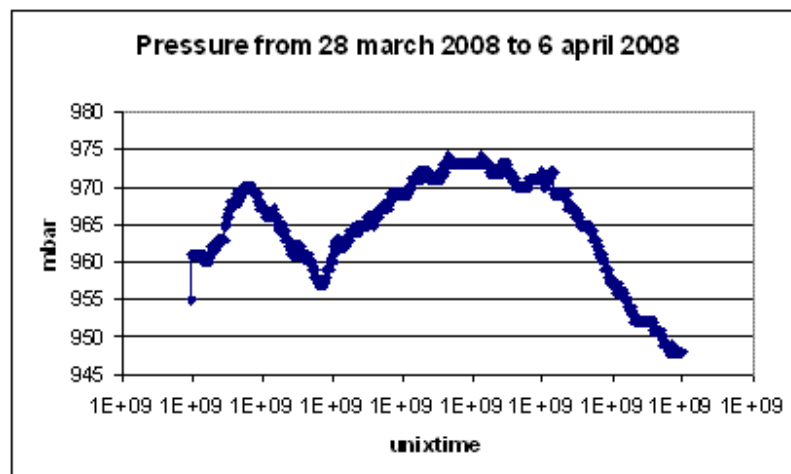


Figura 4.10 – Andamento pressione 28 marzo 6 aprile 2008

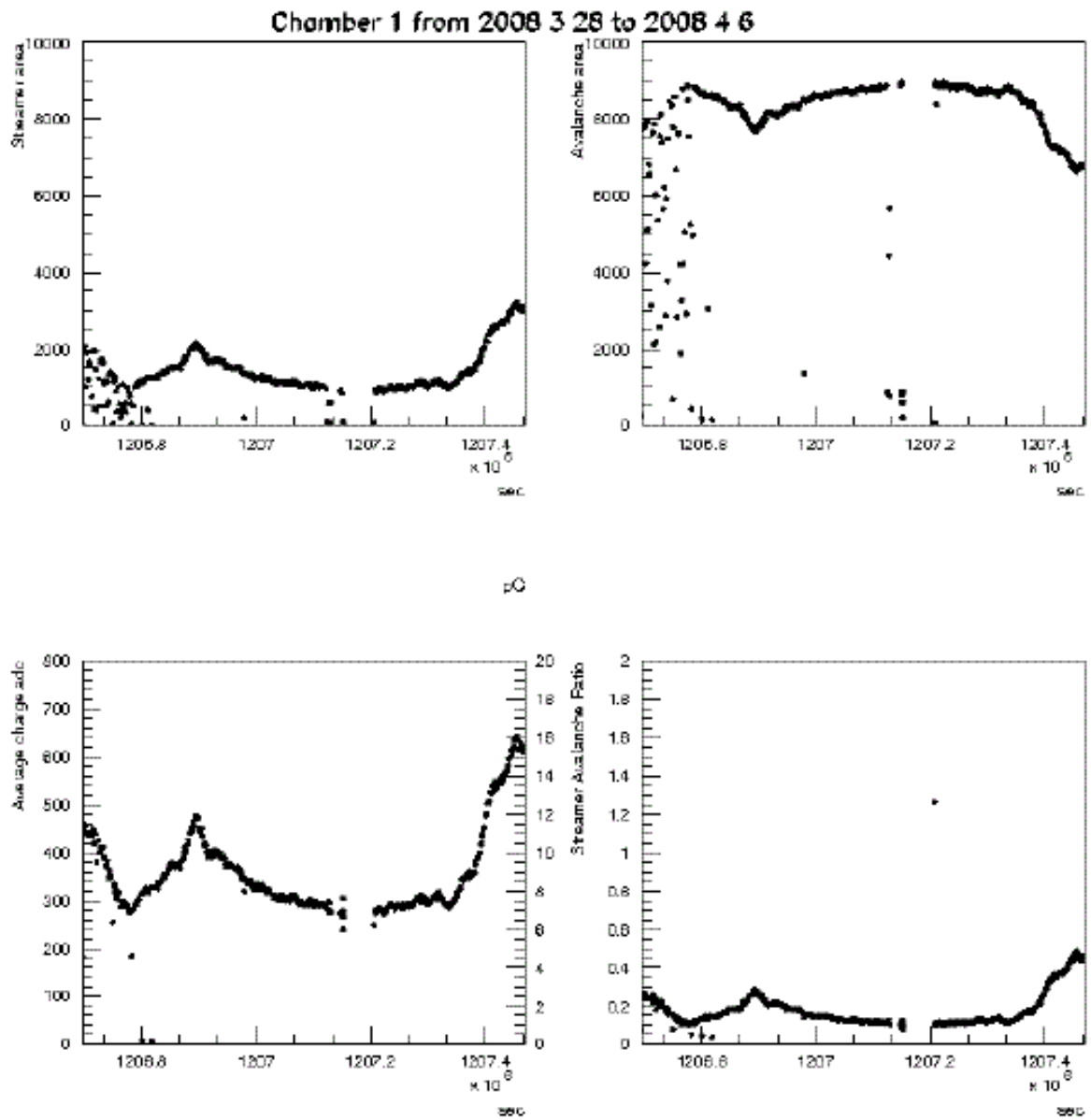


Figura 4.11 – Plot riepilogativo variabili sensibili GGM

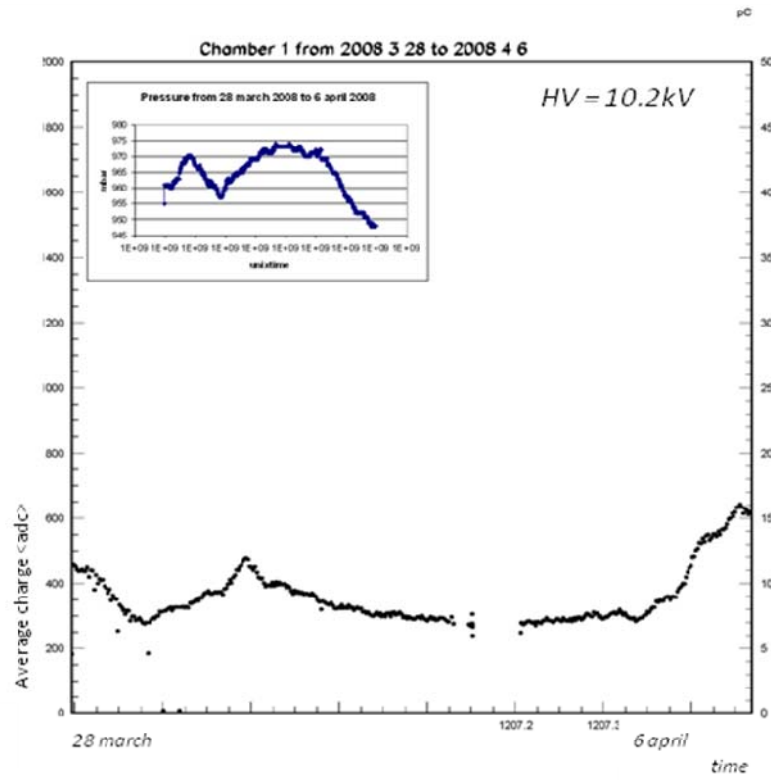


Figura 4.12 – Andamento carga media camera a 10.2kV

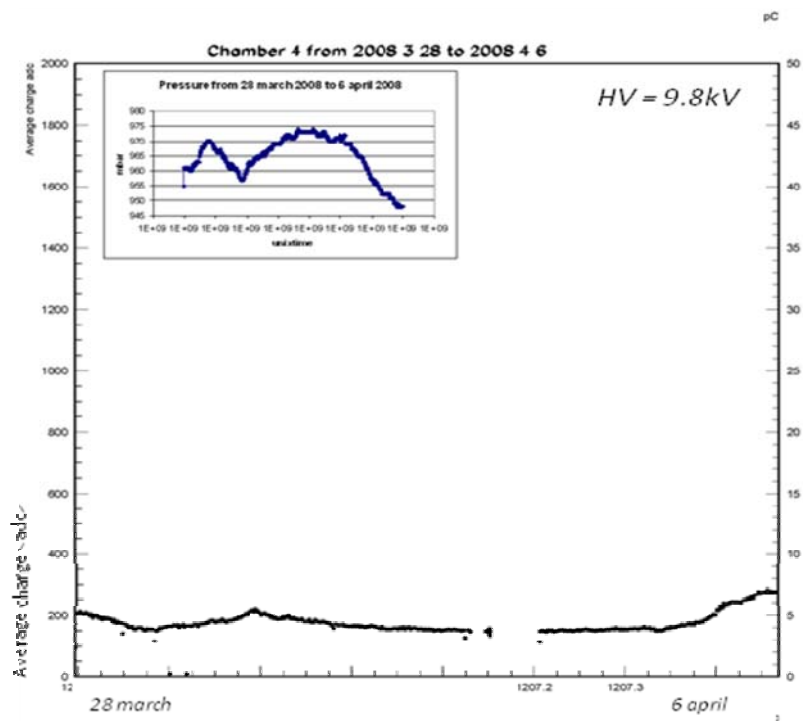


Figura 4.13 – Andamento carga media camera a 9.8kV

## 4.e Sviluppo di xDAQ, DCS/PVSS

CMS ha sviluppato una rete privata dove soltanto particolari computer autorizzati potranno accedere. In questa rete è possibile usare solo librerie permesse e codice validato scritto e compilato sotto alcune restrizioni. Tutto ciò per evitare che crash di alcuni computer, o di alcuni software possano fisicamente compromettere a catena ulteriori danni a tutto il sistema. Inoltre tutto CMS userà un database comune su ORACLE il cui accesso è possibile soltanto essendo interni alla rete. Essere interni alla rete di CMS è un vantaggio in quanto viene fornita anche assistenza hardware sulle macchine; inoltre le varie applicazioni sono gestite centralmente ed un eventuale crash viene gestito da un apposito gruppo che interviene in tempo reale per ripristinare il problema.

Questi vantaggi hanno il prezzo che i software scritti devono essere rivisti, adeguati e ricompilati in modo particolare. Nella prima fase di test del GGM in ISR si è sviluppato un software stand-alone che nei suoi vari sviluppi è arrivato a costituire un vero e proprio database stand-alone.

Nella figura 4.14 si vede il piano generale di controllo/progettazione del software.

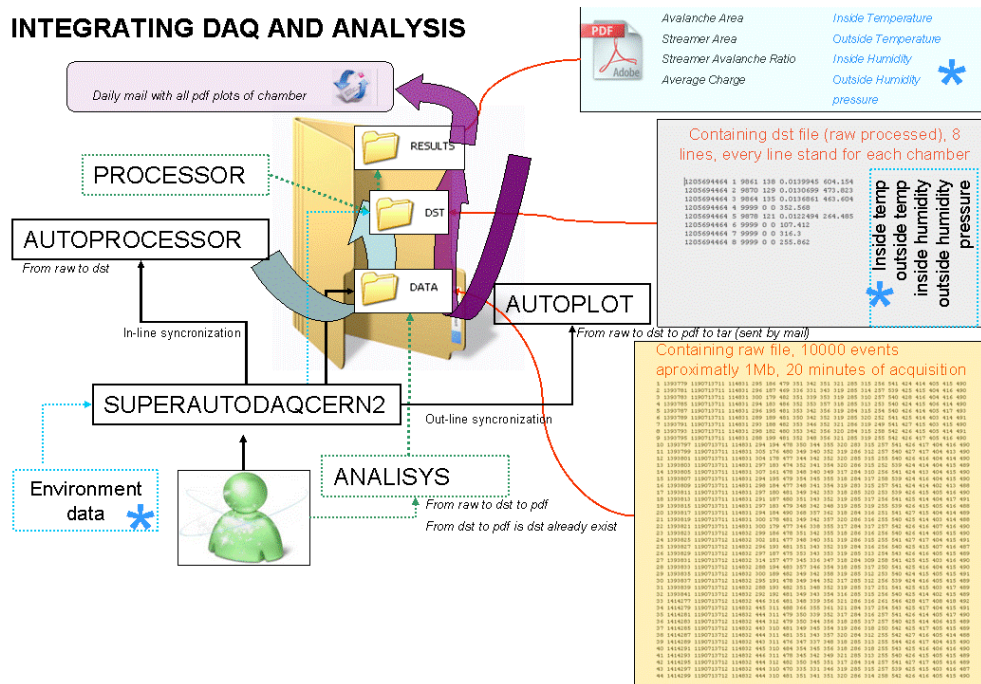


Figura 4.14 – Mappa concettuale tools sviluppati per il GGM

Nella versione finale infatti l'acquisizione dopo aver memorizzato i buffer degli adc nel file raw, processa tali file ogni 10000 eventi ottenendo un file leggero e di facile lettura che riassume i 10000 eventi memorizzati. Questo file dst, integrato con le variabili ambientali, è quello che costituisce il database locale e che nella versione CMS XDAQ punterà il database centralizzato ORACLE. Un file dst è fatto in questo modo: abbiamo 8 righe, ognuna relativa ad ogni camera e in ogni riga abbiamo il riferimento della camera, timestamp unixtime, area avalanche, area streamer, rapporto streamer / avalanche e carica media, temperatura, umidità e pressione. Le ultime informazioni ambientali sono prese automaticamente da un'area nella quale un sensore è in continuo monitoring. La weather station misura la temperatura, umidità e pressione sia dentro la capanna con le camerette e sia le variabili all'interno dell'ISR. Questi file dst sono poi postprocessati da una macro di PAW (Physics Analysis Workstation).

Come abbiamo detto vengono generati concatenando i file dst, che contengono variabili già processate e per questo sono leggeri e di facile utilizzo, tali file verranno integrati nel futuro database PVSS / ORACLE e costituiranno il monitoring.

Altri tools che sono stati sviluppati sono in grado di poter plottare le variabili delle camerette di cui sopra a partire da un certo anno/mese/ora fino ad un altro anno/mese/ora e tool automatici di plot quotidiani.

Tutto questo software è in fase avanzata di spostamento sulla piattaforma XDAQ, un linguaggio molto performante con molte librerie scritte da un gruppo CERN, che permette un facile accesso diretto ad ORACLE e una facile integrazione in ROOT, l'erede di PAW come post process grafico.

In figura 4.15 vediamo una configurazione promettente e probabile di tutto il sistema.

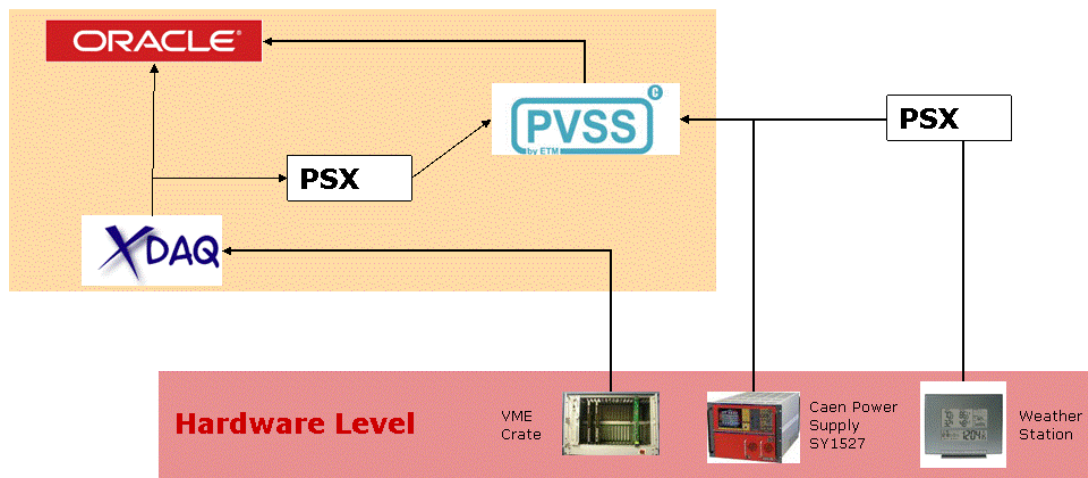


Figura 4.15 – Schema integrazione GGM in CMS

A partire dal livello Hardware, attraverso una XDAQ Application è possibile interfacciare l'acquisizione dell'adc (VME Crate) con ORACLE, e anche con PVSS attraverso PSX che porge i dati da XDAQ a PVSS; nel frattempo PVSS, se si trova su macchina facente parte della rete CMS, può dialogare con ORACLE e trasmettere il monitoring delle correnti e dell'alta tensione del CAEN SY1527. Infine le variabili ambientali il cui software gira su piattaforma windows possono essere interfacciate tramite PSX sempre su PVSS che vedrà i file dati dell'environment come un device logico.



#### 4.f.i Risultati del monitoring: Analisi picchetto

In questa parte del lavoro di tesi ho analizzato un evento occorso a fine aprile, quando a causa di una bombola di Freon non perfettamente pura abbiamo flussato le camere a RPC con una miscela dove era presente un contaminante.

Nella figura 4.16 vediamo la timeline di quello che è accaduto con i rispettivi valori massimi di picco espressi in mV; dopo aver riscontrato dai nostri grafici che era successo qualcosa alla miscela del gas abbiamo indagato e abbiamo scoperto che il 28 Aprile sono state messe in flusso delle bombole che dopo un'analisi prima al GC e poi allo spettrometro di massa hanno dimostrato avere un picco sconosciuto. Queste bombole sono state in flusso per 2 giorni, dopodiché abbiamo ripristinato il flusso con bombole nuove.

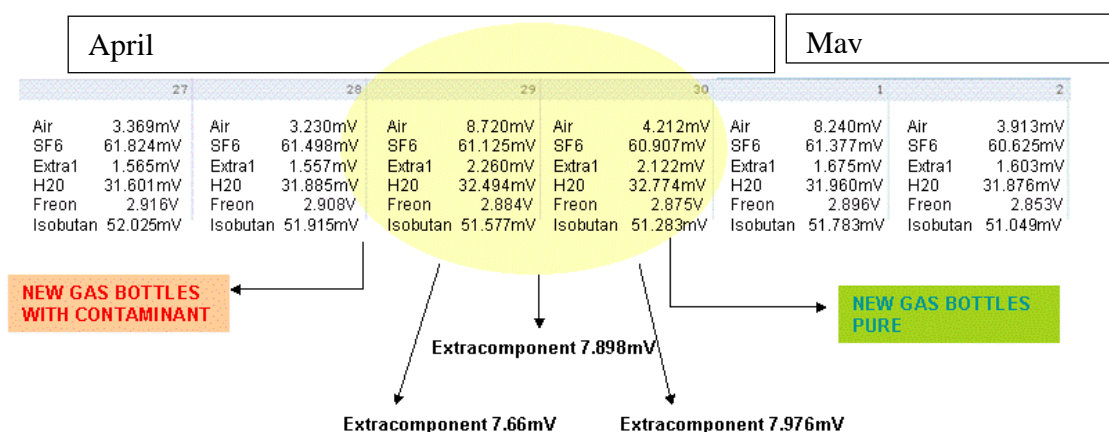


Figura 4.16 – Valori dei picchi dei gas in mV

Nelle seguenti figure da 4.17 a 4.23 vediamo le concentrazioni dei singoli gas che compongono la miscela standard Open Loop, mentre le figure da 4.25 a 4.31 si riferiscono alle concentrazioni relative al CLS. Fluttuazioni della composizione sono abbastanza normali in quanto il mixer ha un certo grado di precisione e comunque queste concentrazioni sono state ricavate da un tool sviluppato nel lavoro di tesi ad hoc che permette facilmente di post-processare l'uscita del Gascromatografo. Tale processo non è completamente perfetto in quanto vengono

integrati gli spettri dei picchi ipotizzando che il gascromatografo abbia la stessa efficienza su tutto l'asse temporale.

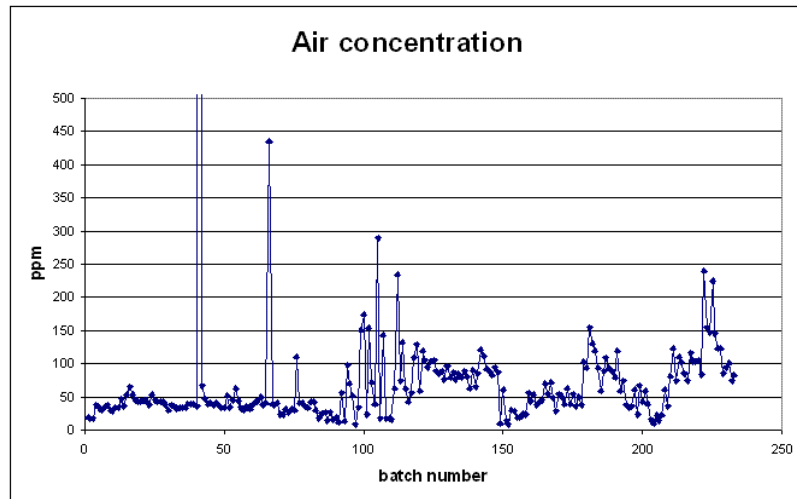


Figure 4.17 – Stima concentrazione aria in open loop da luglio 2007 a maggio 2008

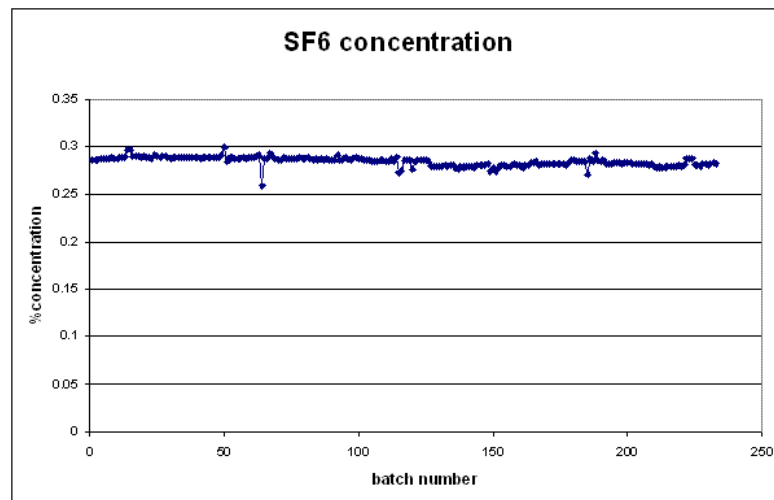


Figure 4.18 – Stima concentrazione SF6 in open loop da luglio 2007 a maggio 2008

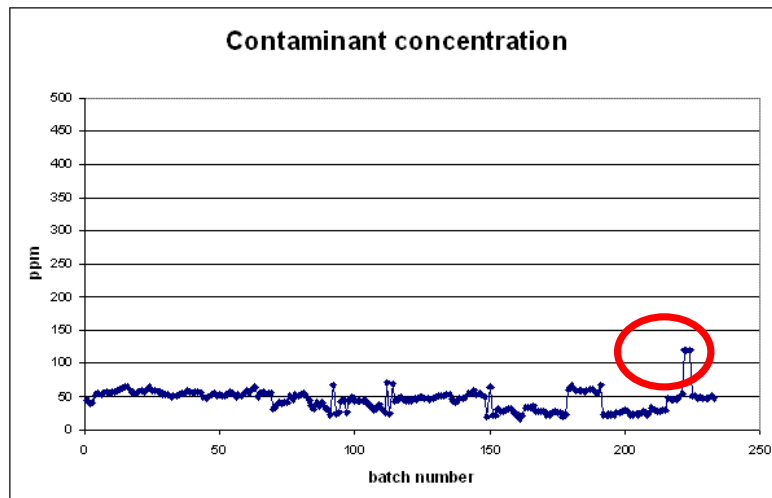


Figure 4.19 – Stima concentrazione contaminante incognito in open loop da luglio 2007 a maggio 2008

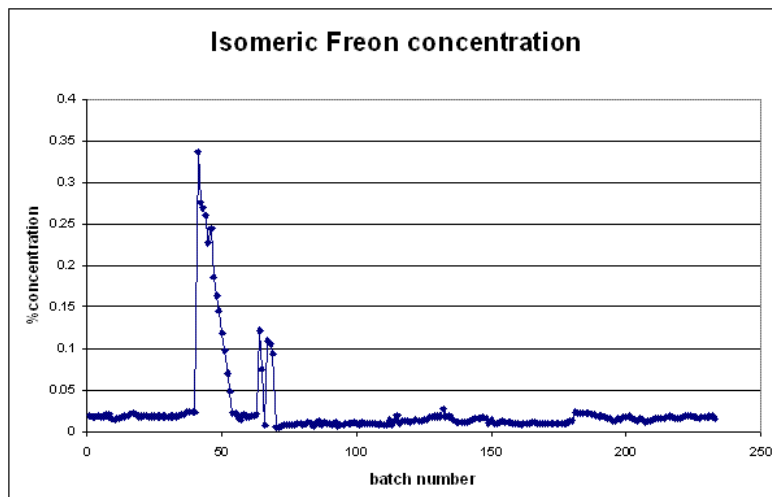


Figure 4.20 – Stima concentrazione extra componente open loop da luglio 2007 a maggio 2008

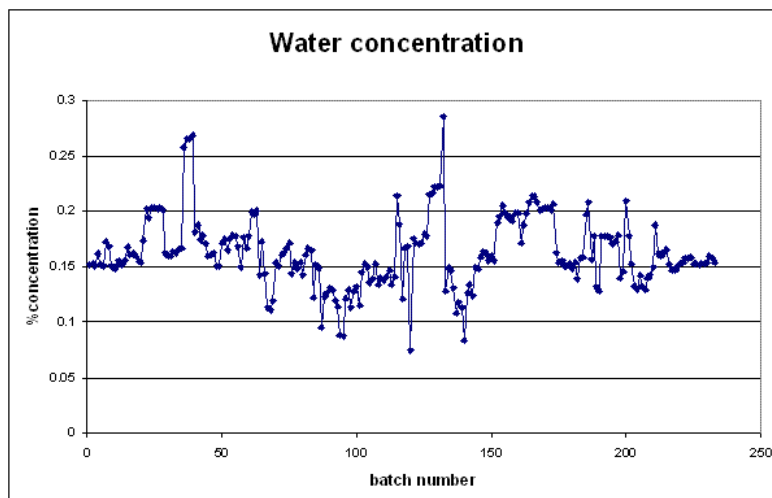


Figure 4.21 – Stima concentrazione acqua open loop da luglio 2007 a maggio 2008

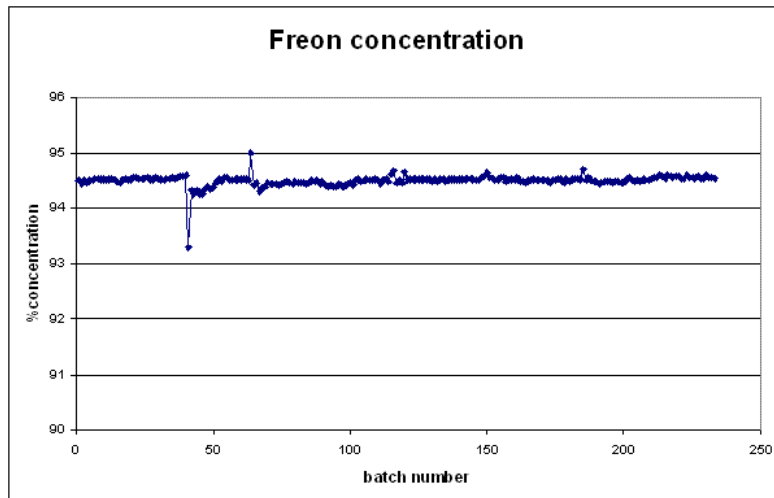


Figure 4.22 – Stima concentrazione Freon in open loop da luglio 2007 a maggio 2008

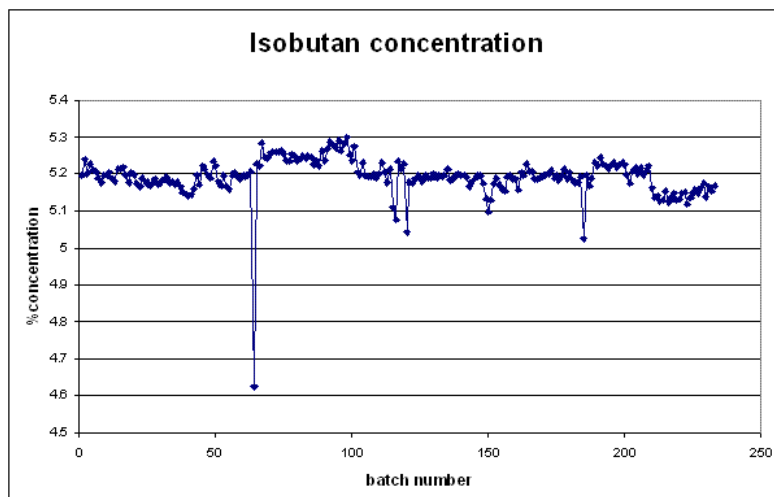


Figure 4.23 - Stima concentrazione Isobutano in open loop da luglio 2007 a maggio 2008

Nella figura 4.24 vediamo i valori di picco massimi registrati dal gascromatografo durante il periodo nel quale abbiamo usato la bombola contaminata e nelle figure 4.25 a 4.31 vediamo le concentrazioni dei gas del CLS.

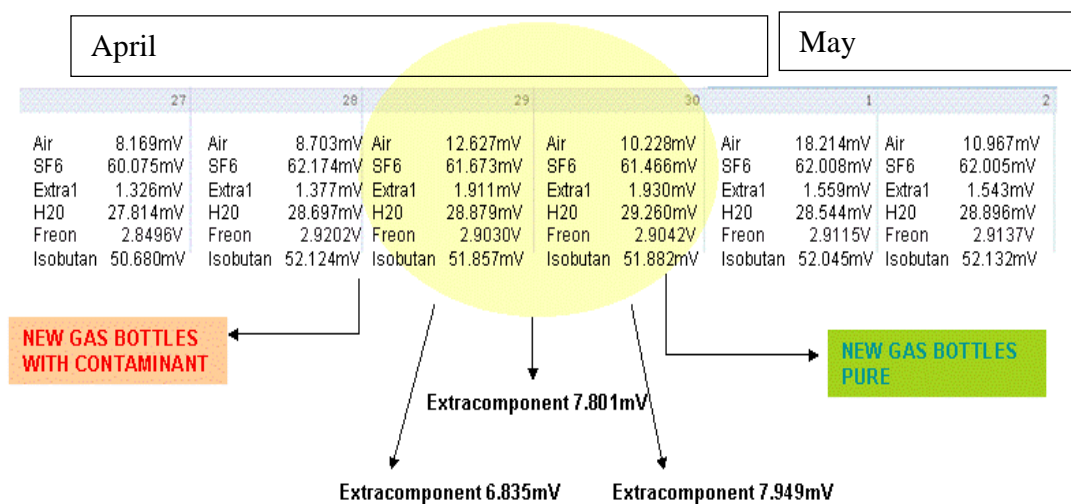


Figura 4.24 - Valori dei picchi dei gas in mV

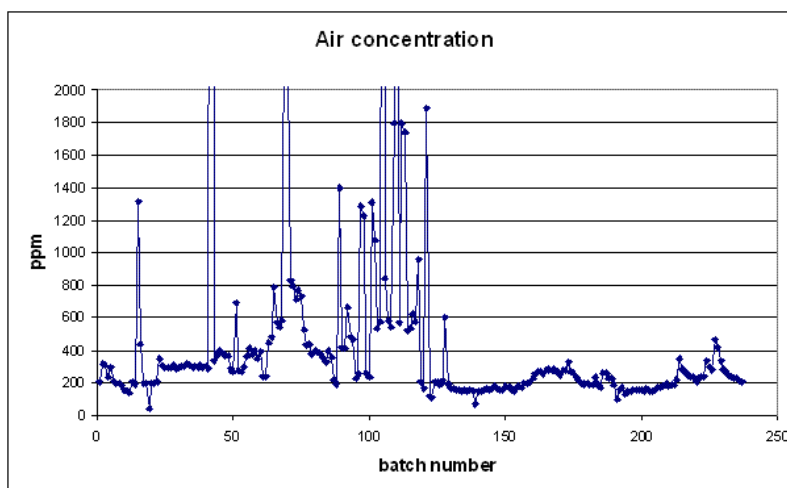


Figura 4.25 - Stima concentrazione aria da luglio 2007 a maggio 2008

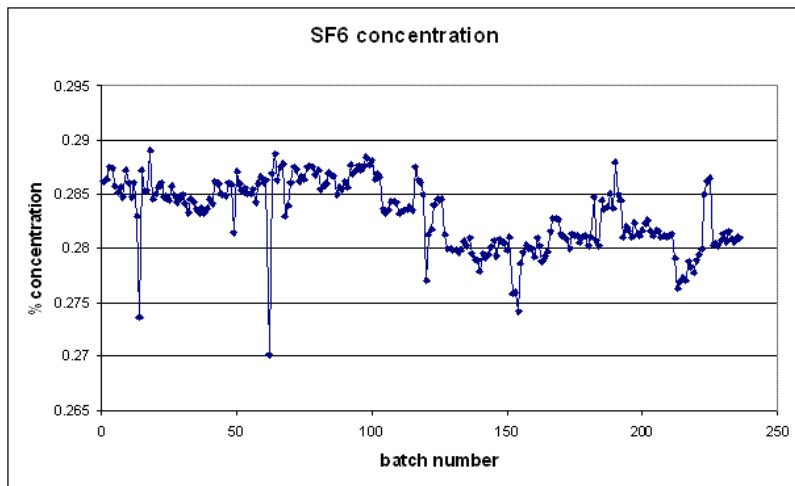


Figura 4.26 – Stima concentrazione SF6 da luglio 2007 a maggio 2008

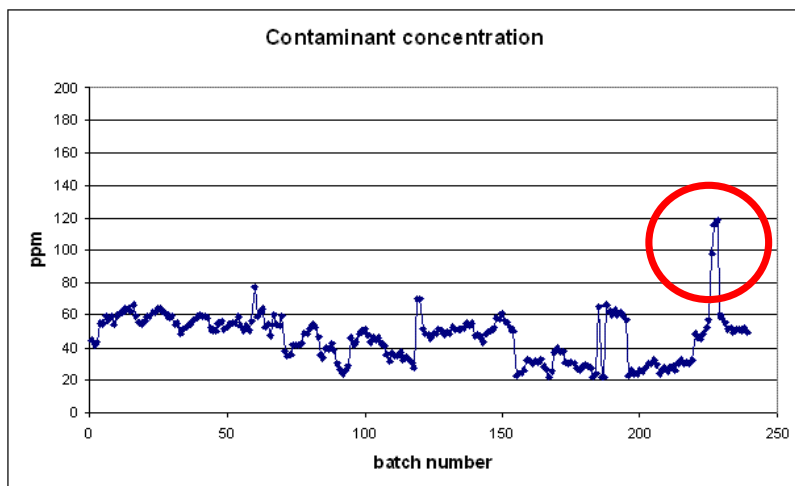


Figura 4.27 – Stima concentrazione contaminante da luglio 2007 a maggio 2008

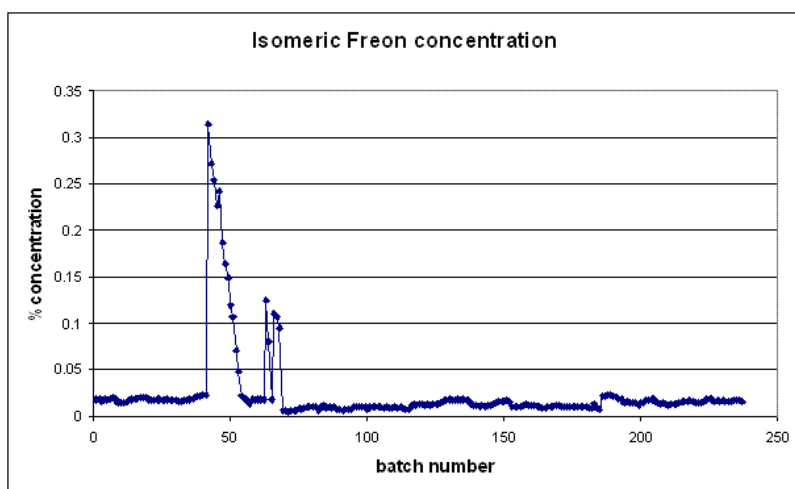


Figura 4.28 – Stima concentrazione isomero freon da luglio 2007 a maggio 2008

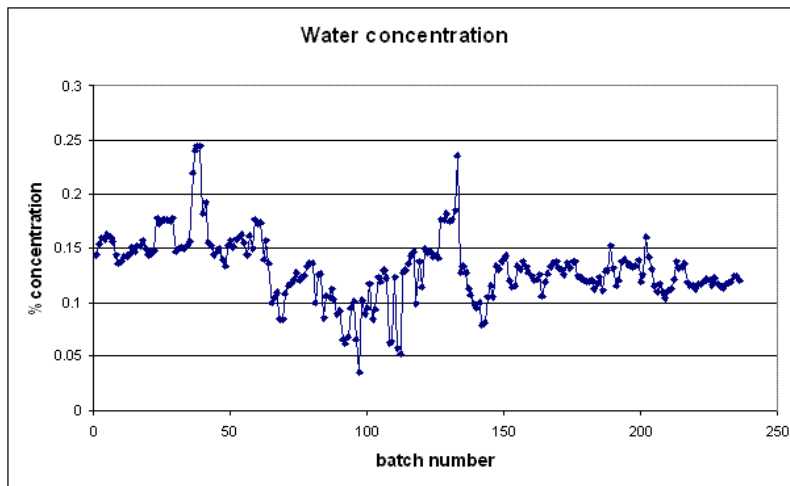


Figura 4.29 – Stima concentrazione acqua da luglio 2007 a maggio 2008

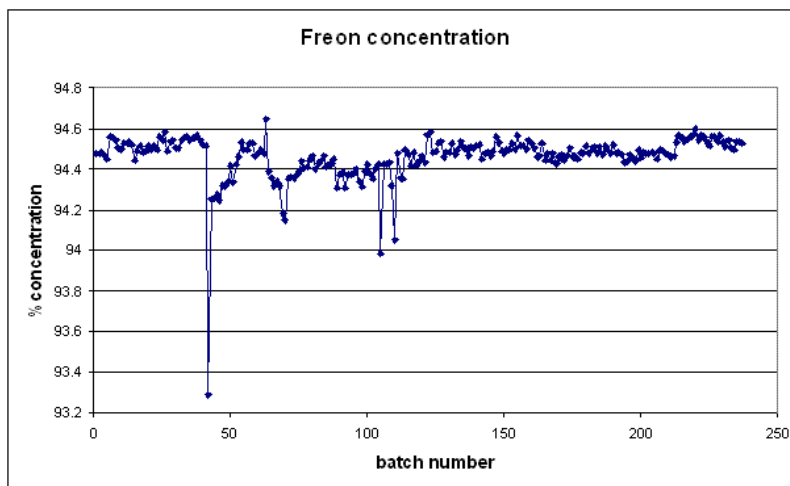


Figura 4.30 – Stima concentrazione freon da luglio 2007 a maggio 2008

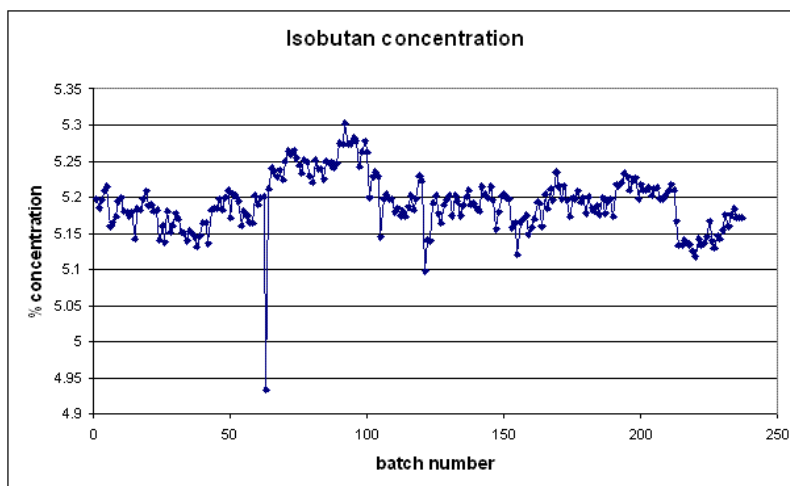


Figura 4.31 – Stima concentrazione isobutano da luglio 2007 a maggio 2008

## 30 Aprile 2008 – CAMPIONAMENTO OPEN LOOP

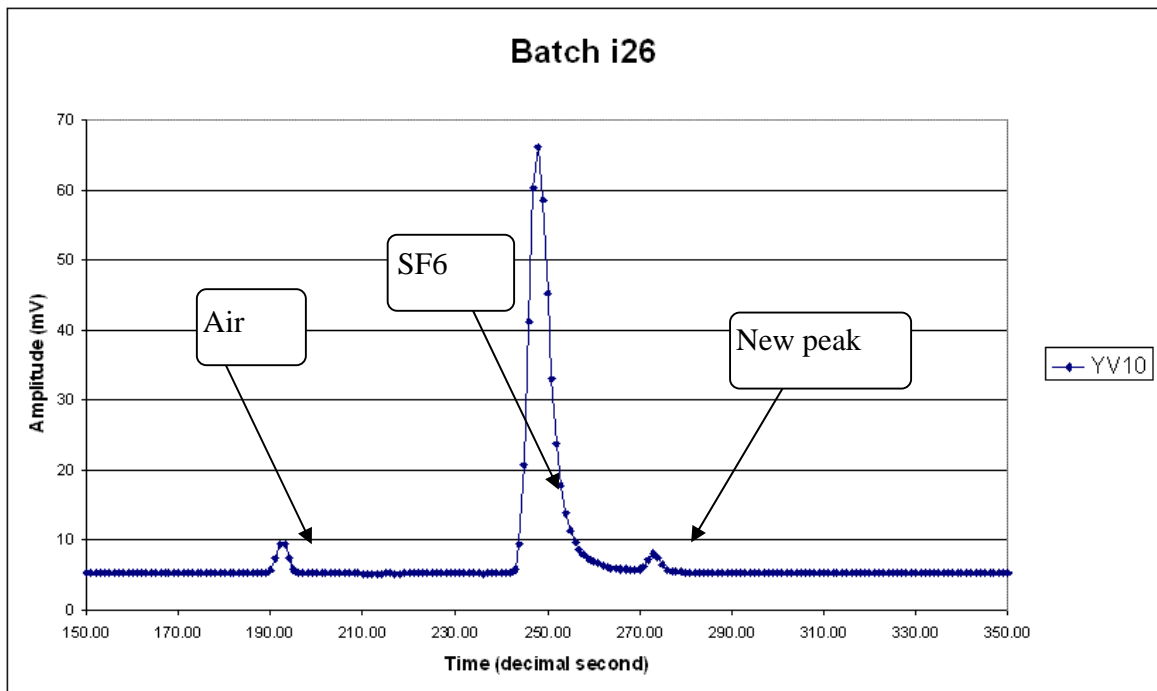


Figura 4.32 – Miscela gas open loop 30 aprile 2008

## 30 Aprile 2008 – CAMPIONAMENTO RICIRCOLO

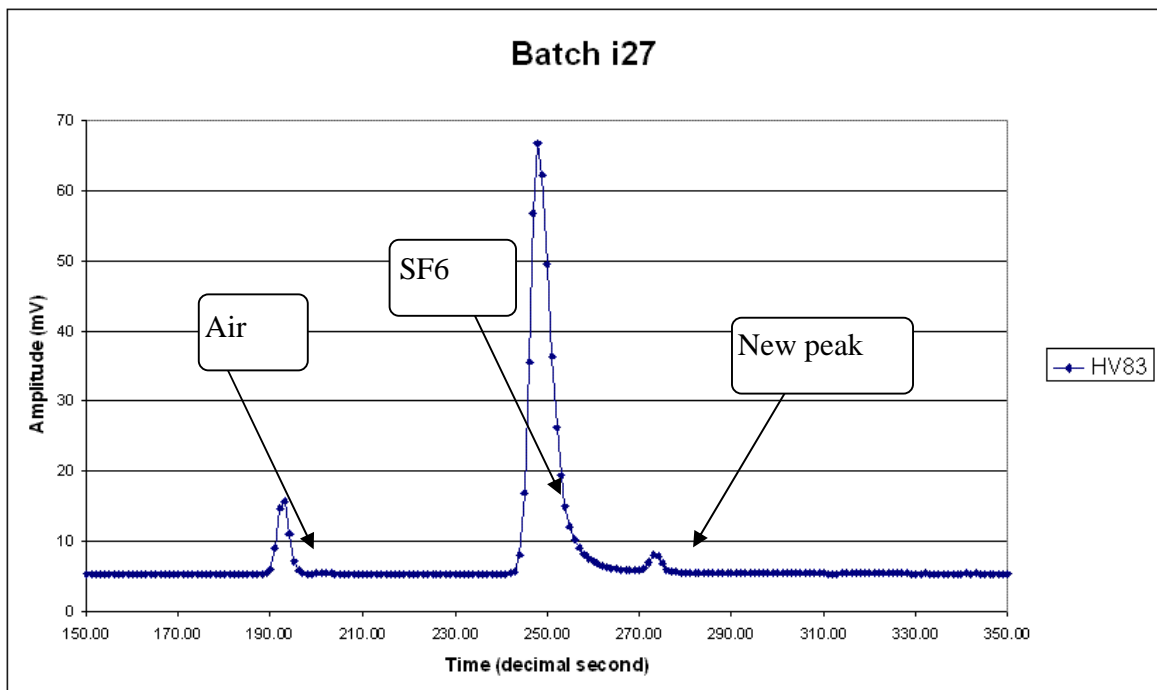


Figura 4.33 – Miscela gas closed loop 30 aprile 2008



## 2 Maggio 2008 – CAMPIONAMENTO OPEN LOOP

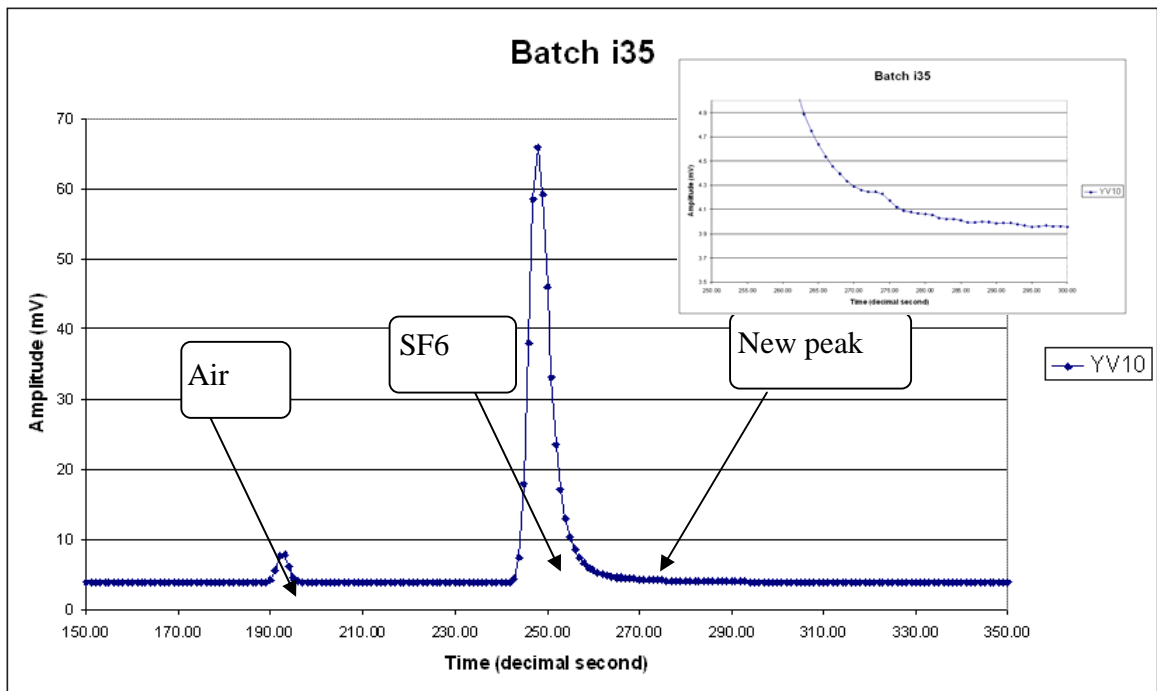


Figura 4.34 – Miscela gas open loop 2 maggio 2008

## 2 Maggio 2008 – CAMPIONAMENTO RICIRCOLO

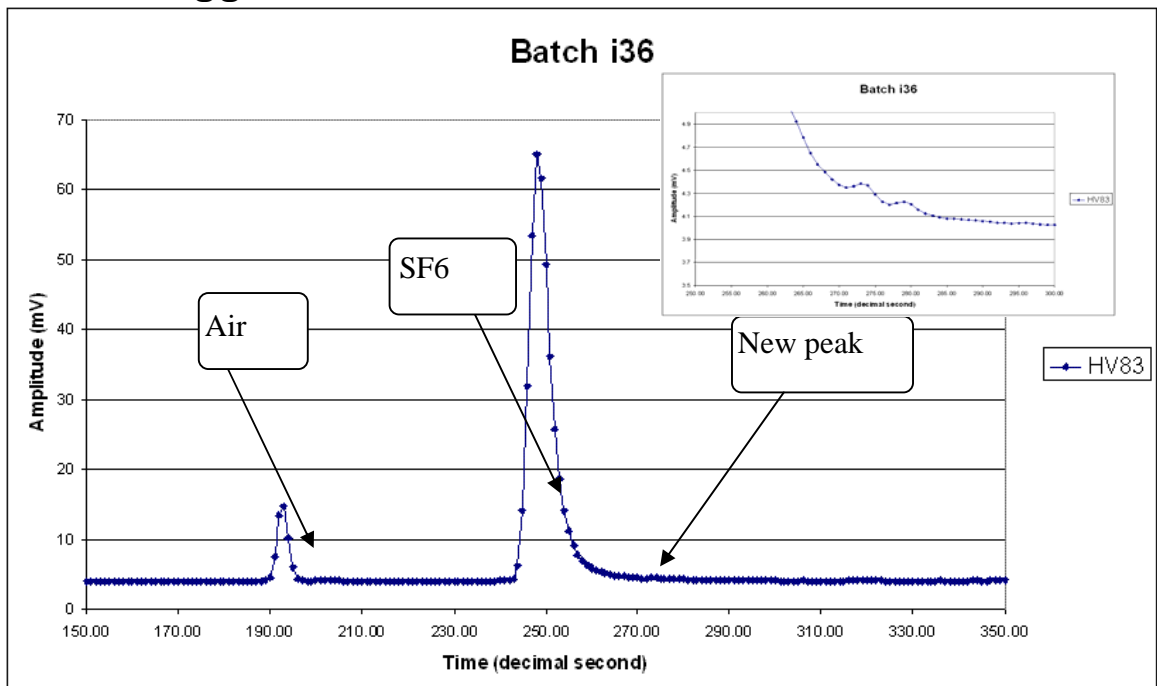


Figura 4.35 – Miscela gas closed loop 2 maggio 2008

#### 4.f.ii Risultati del monitoring: Effetti preliminari

Dopo aver caratterizzato la scoperta del contaminante nelle bombole, e aver visto che le correnti delle camere grandi e delle camerette non ne erano influenzate, abbiamo analizzato le variabili del GGM. L'andamento della carica media è risultato crescente nel periodo di presenza del contaminante; essendo temperatura ed umidità quasi costanti mentre la pressione era variata molto abbiamo corretto la carica media per la pressione, usando una parametrizzazione carica/pressione ricavata da un precedente periodo di stabilità. Abbiamo visto che l'aumento della carica è risultato perfettamente compatibile con l'andamento della pressione.

Nelle figure da 4.36 a 4.42 vediamo gli effetti del picco contaminante sulle cariche medie delle camere del GGM, non corrette con la pressione. Gli intervalli temporali senza dati si riferiscono a periodi durante i quali il DAQ del monitoring non era attivo.

Gap summary

Clean Up

HV 10200 V; Surface 40cmx40cm; Temp 22°C; RH 40%

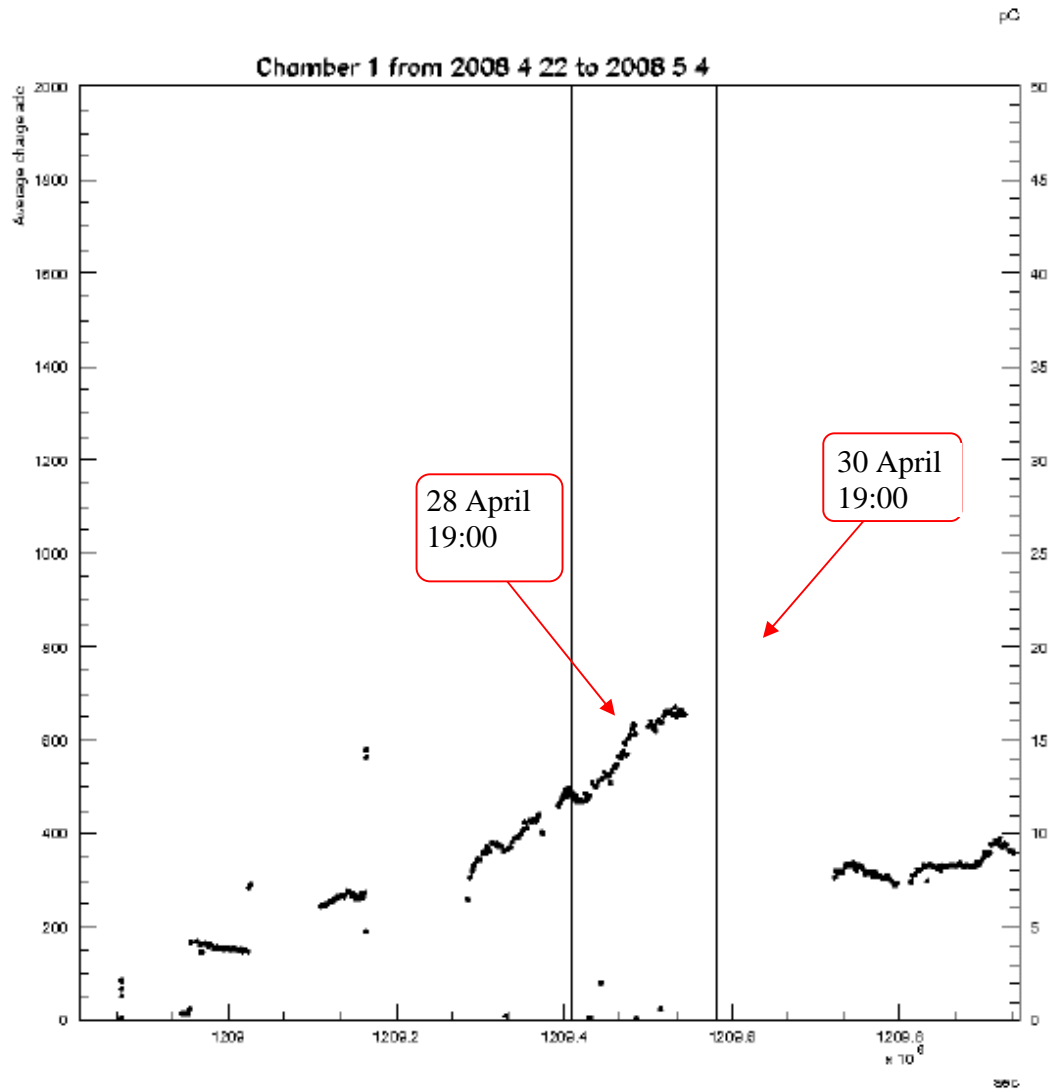


Figura 4.36 – Gas Gain monitoring chamber 1

## Gap summary

### Clean Down

HV 9800 V; Surface 40cmx40cm ; Temp 22°C; RH 40%

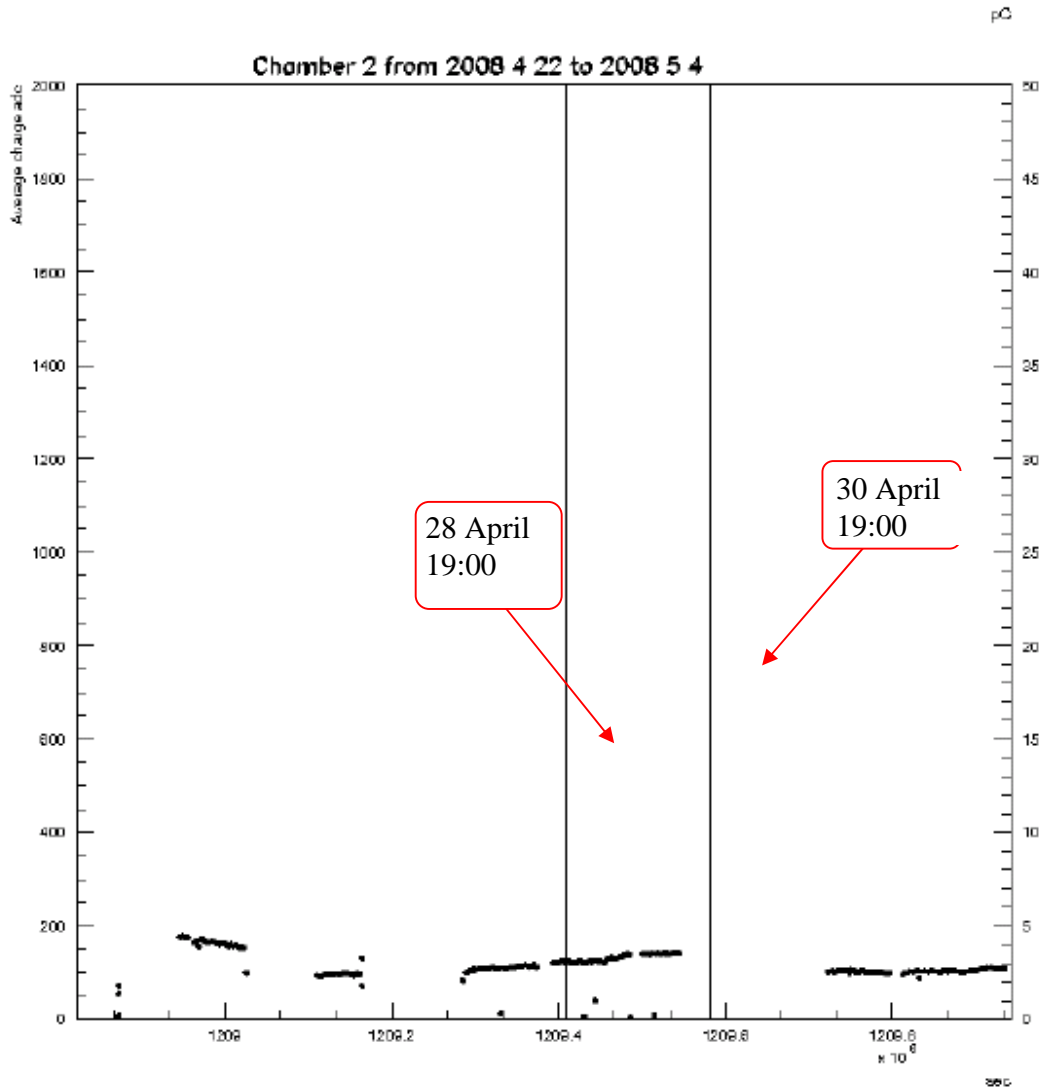


Figura 4.37 – Gas Gain monitoring chamber 2

### Gap summary

Before Up

HV 10000 V; Surface 40cmx40cm ; Temp 22°C; RH 40%

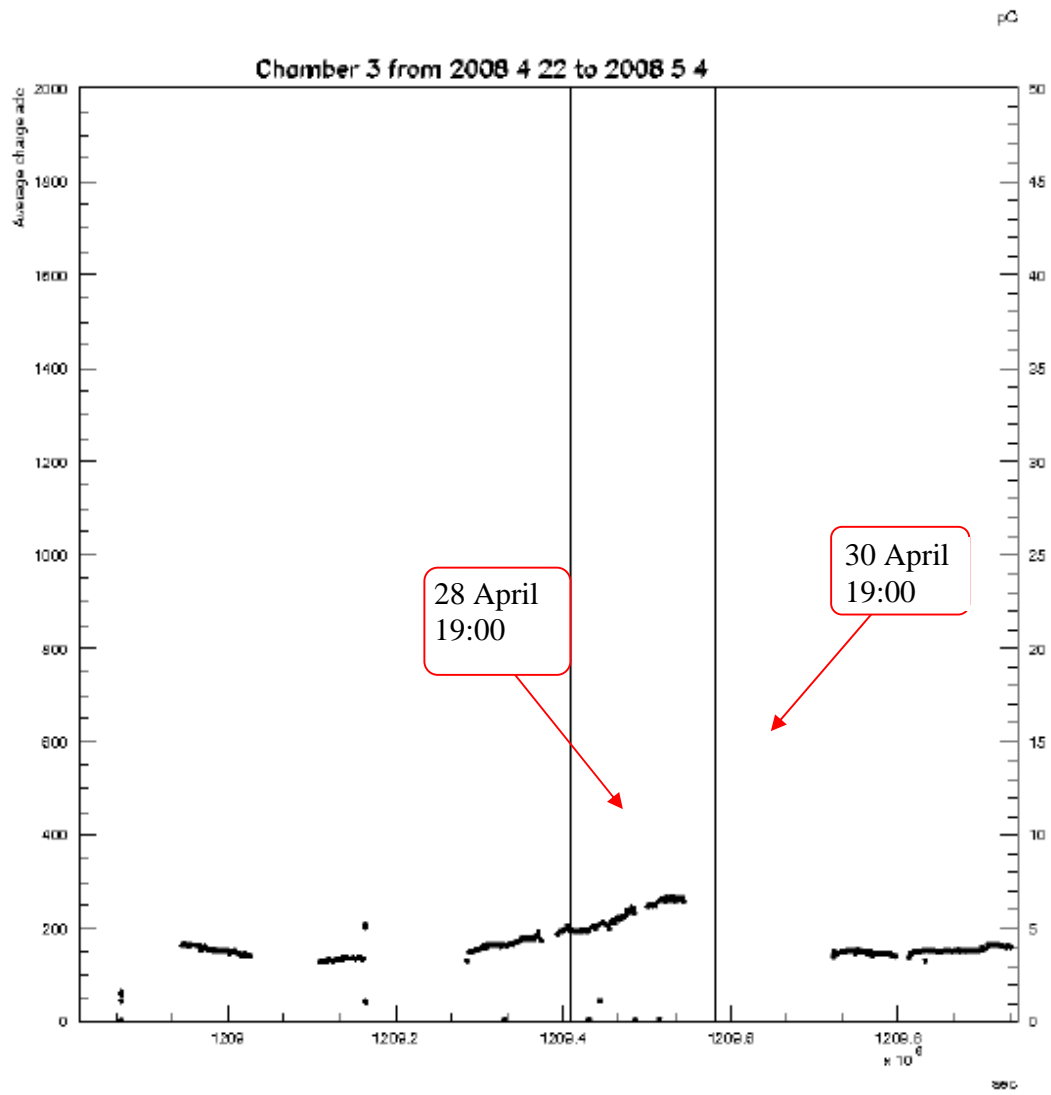


Figura 4.38 – Gas Gain monitoring chamber 3

Gap summary

Before Middle

HV 10000 V; Surface 40cmx40cm ; Temp 22°C; RH 40%

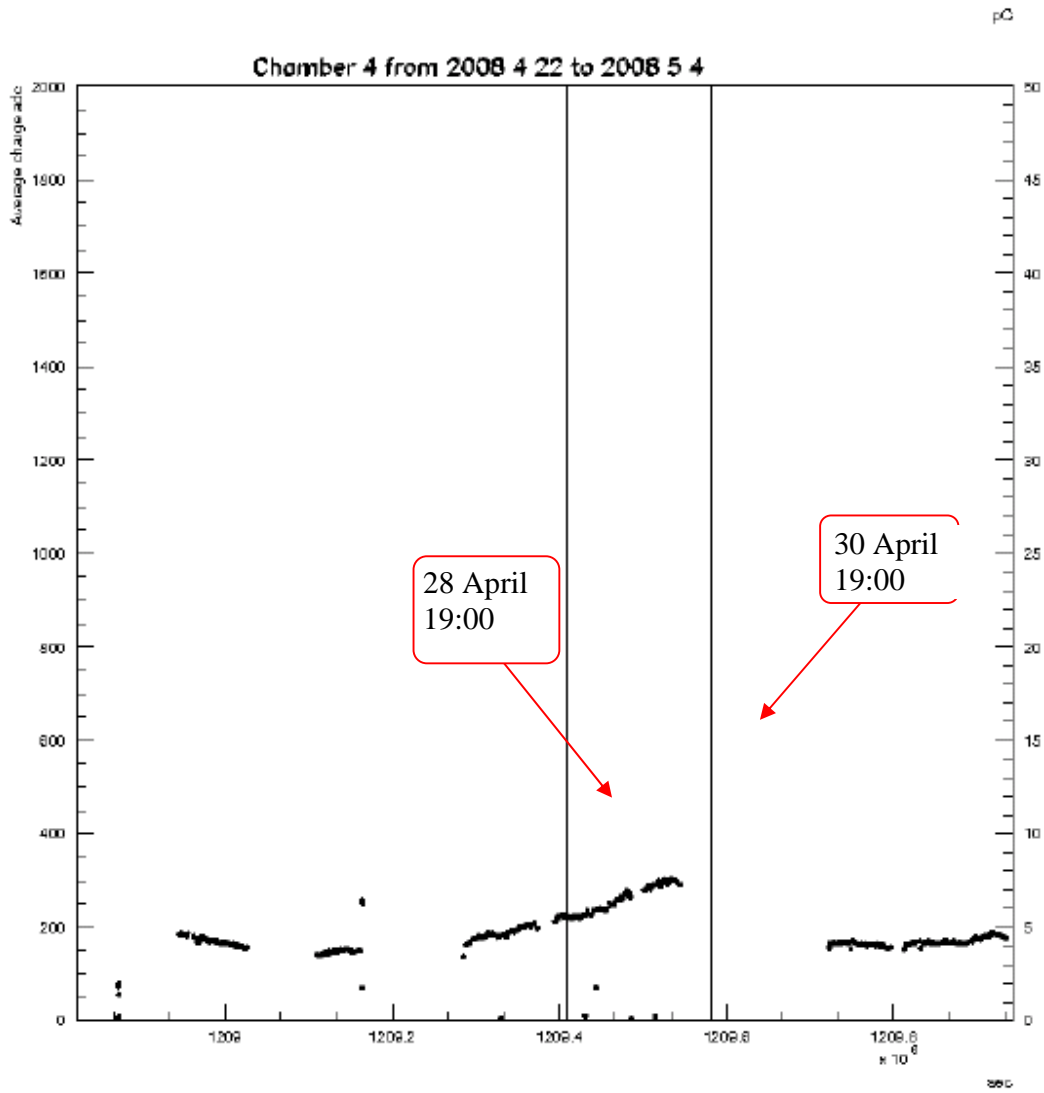


Figura 4.39 – Gas Gain monitoring chamber 4

### Gap summary

*Before Down*

HV 9800 V; Surface 40cmx40cm ; Temp 22°C; RH 40%

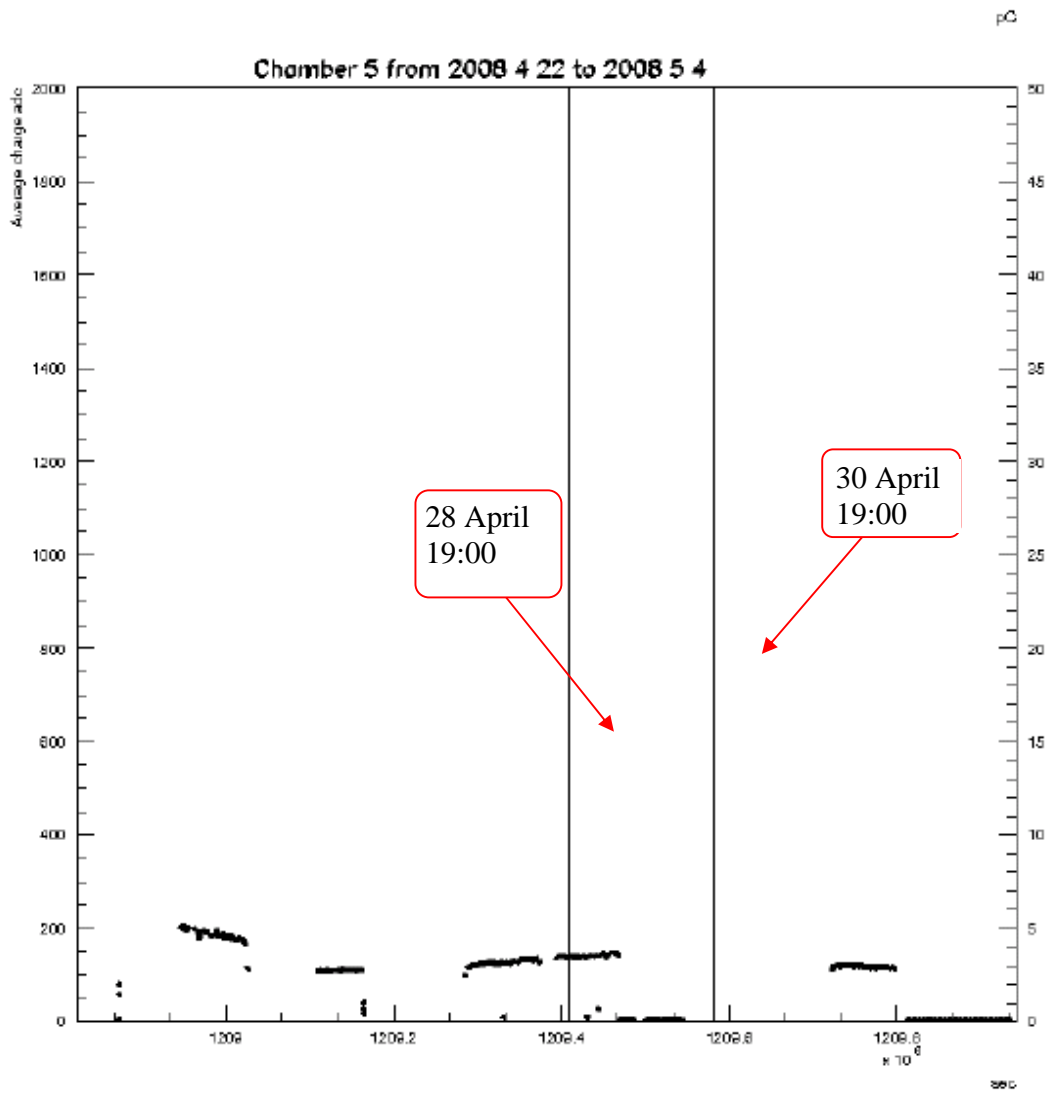


Figura 4.40 – Gas Gain monitoring chamber 5

### Gap summary

After Up

HV 10400 V; Surface 40cmx40cm ; Temp 22°C; RH 40%

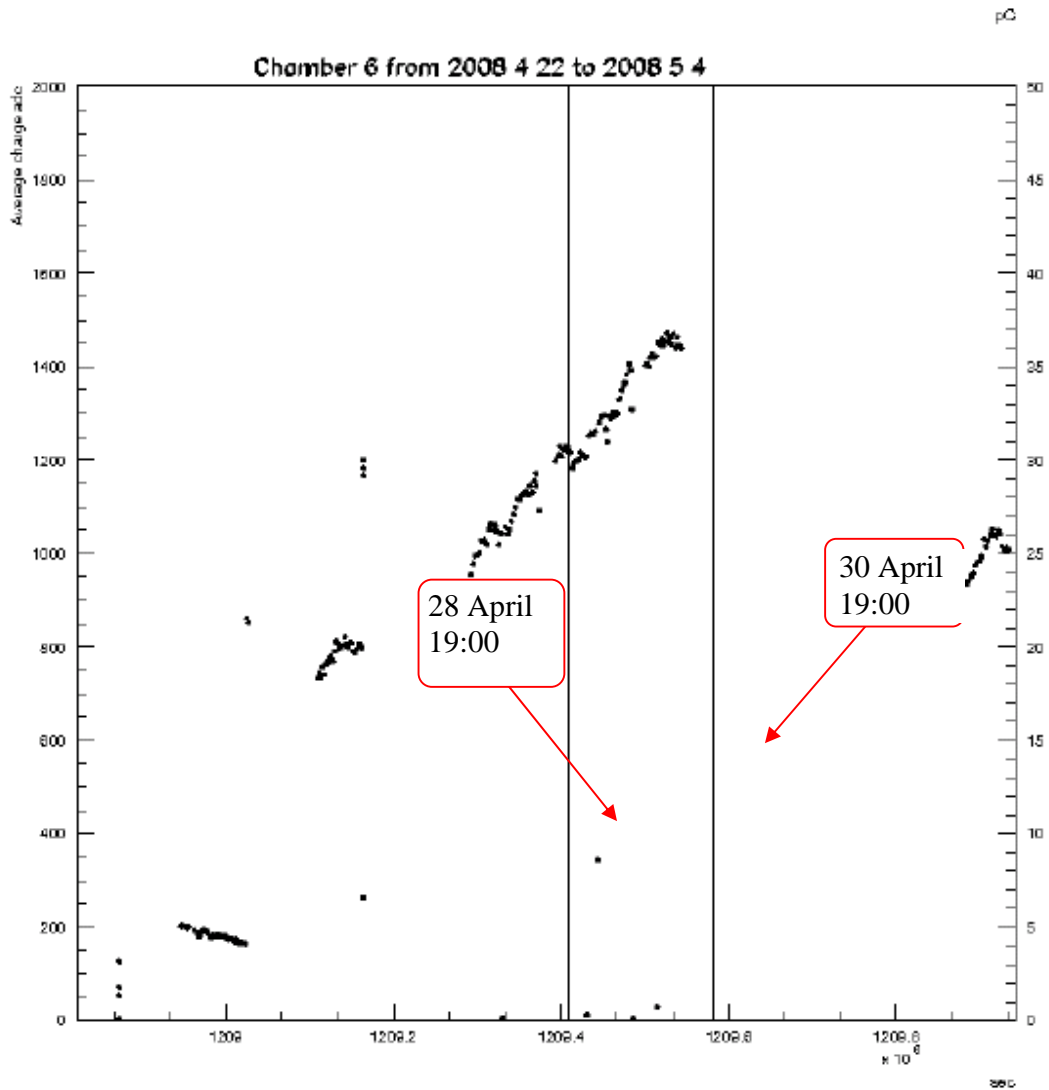


Figura 4.41 – Gas Gain monitoring chamber 6



### Gap summary

After Middle

HV 10200 V; Surface 40cmx40cm ; Temp 22°C; RH 40%

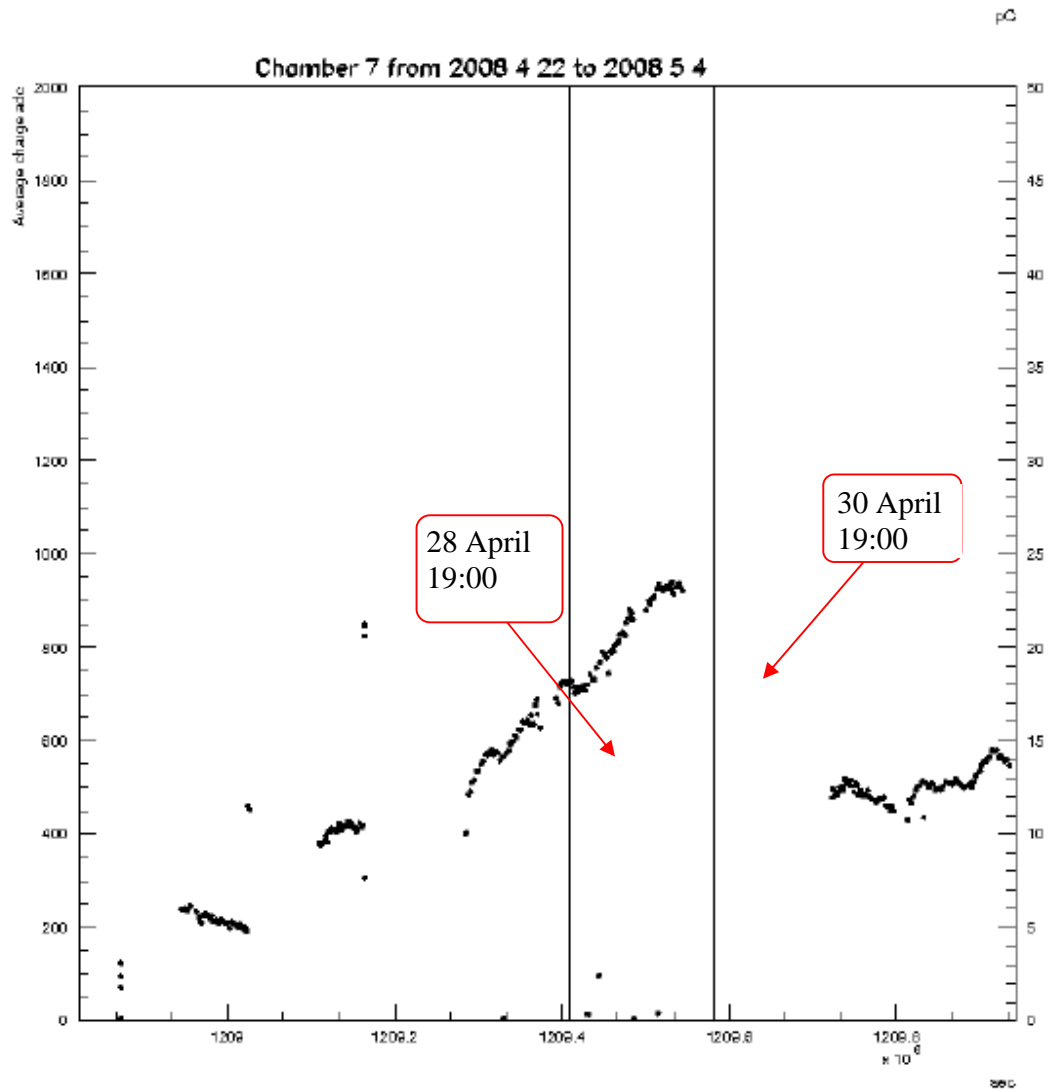


Figura 4.42 – Gas Gain monitoring chamber 7

Gap summary

After Down

HV 10200 V; Surface 40cmx40cm ; Temp 22°C; RH 40%

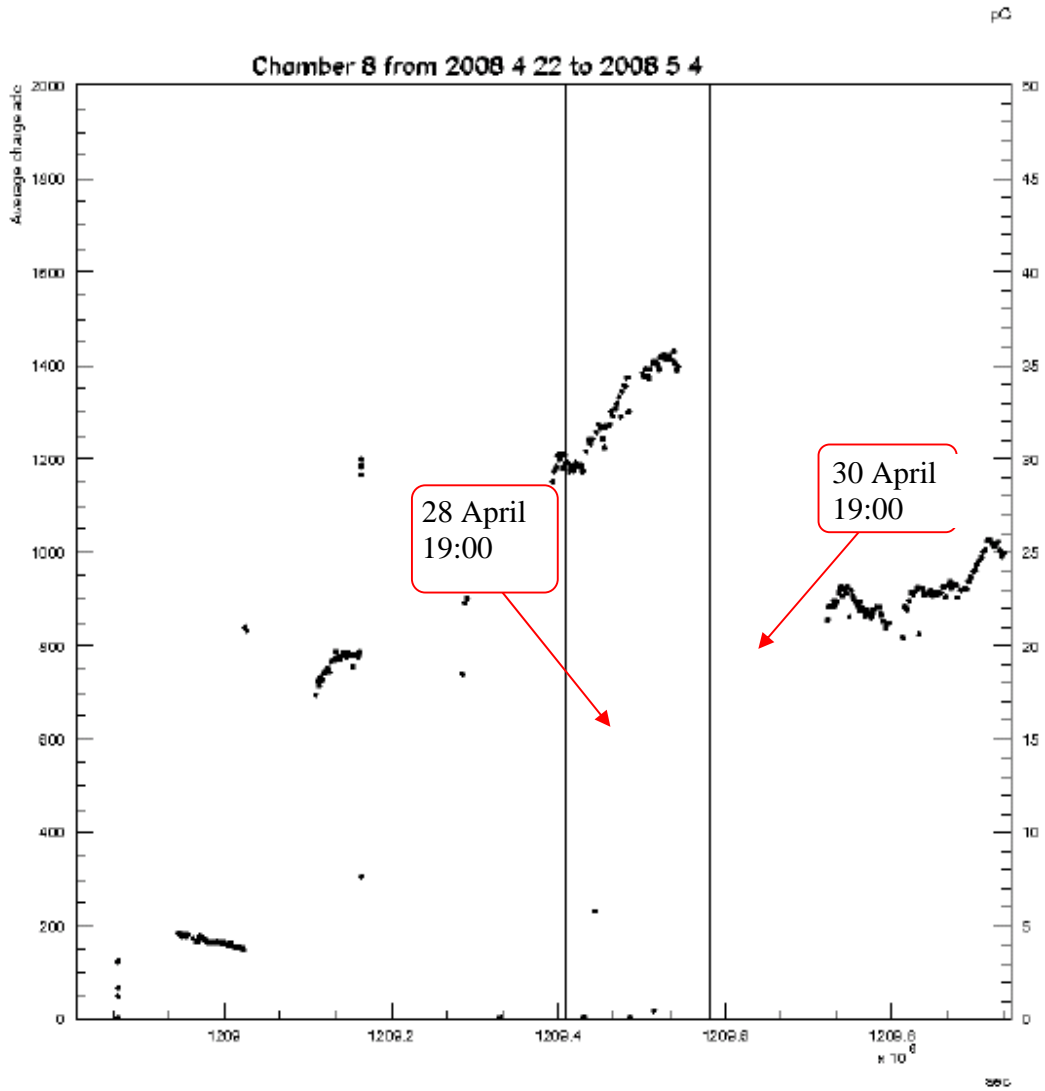


Figura 4.43 – Gas Gain monitoring chamber 8

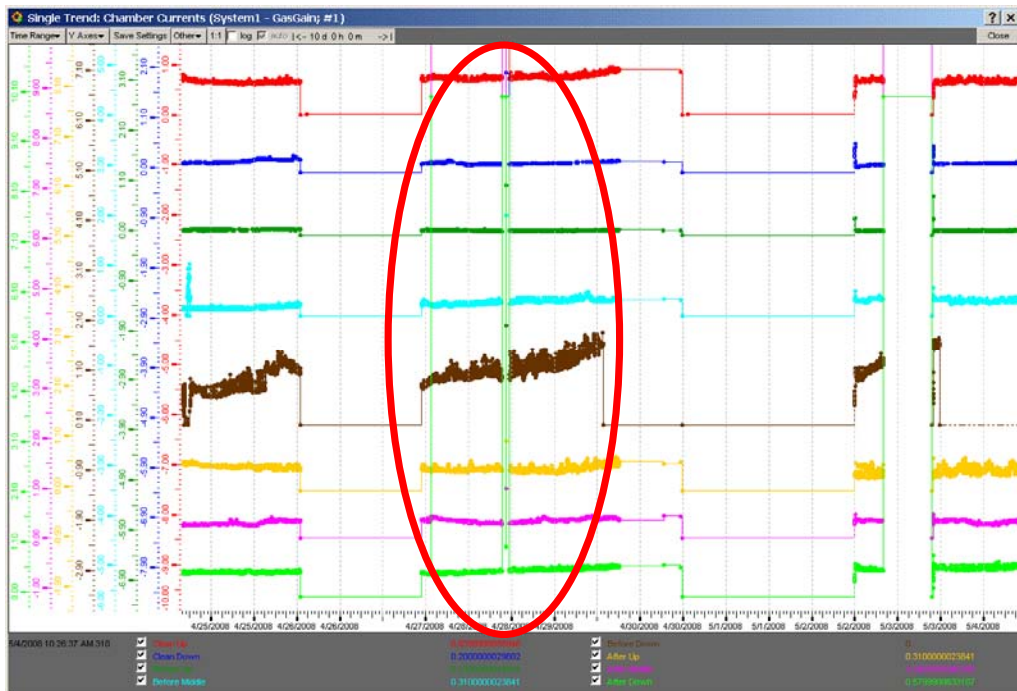


Figura 4.44 – Correnti GGM RPC segnale mediante DCS

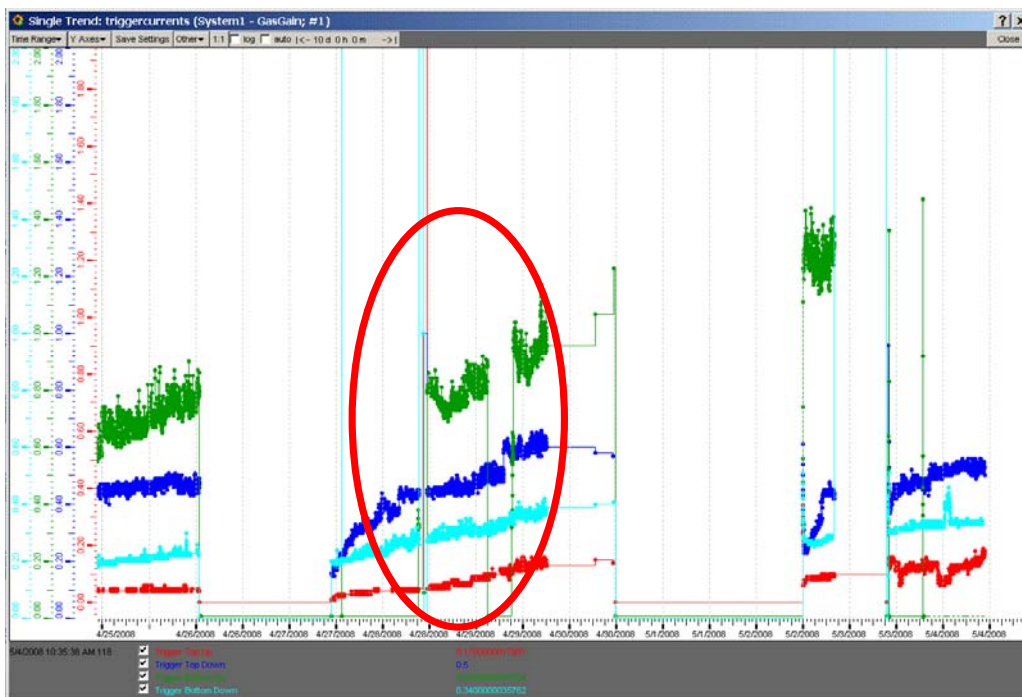


Figura 4.45– Correnti GGM RPC trigger mediante DCS

In figura 4.46 e 4.47 vediamo due plot a titolo di esempio delle correnti delle camere grandi del Closed Loop test, notiamo con un cerchio rosso la zona interessata dalla presenza del picchetto contaminante.

**GAPS SUMMARY:** HV 9200 V; Surface 2,36m<sup>2</sup> ; Temp 20°C; RH 40%

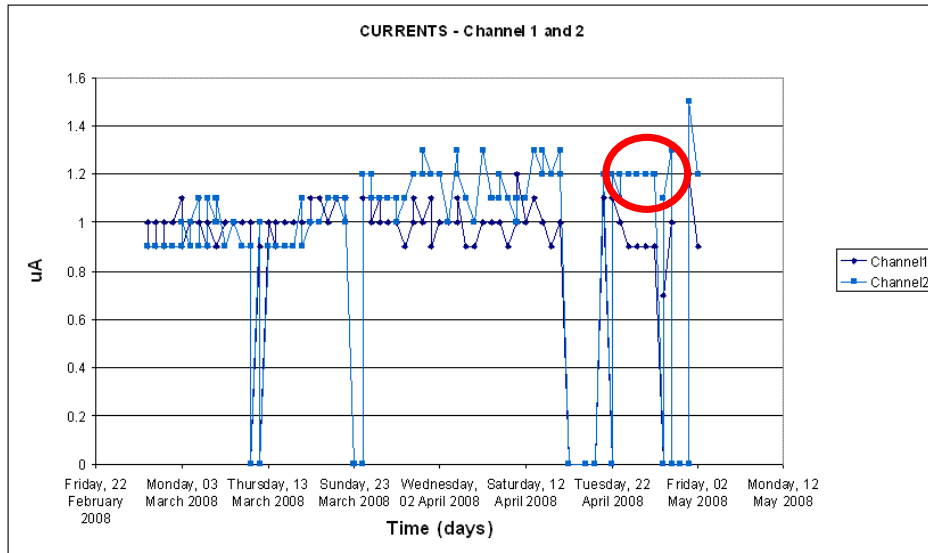


Figura 4.46 – Correnti canali 1 e 2 RPC CLS

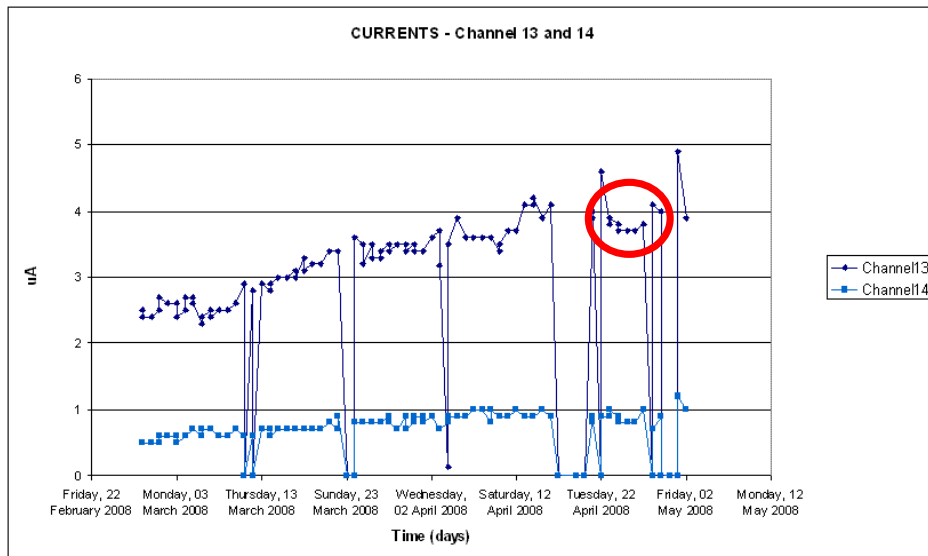


Figura 4.47 – Correnti canali 13 e 14 RPC CLS

# ENVIRONMENT

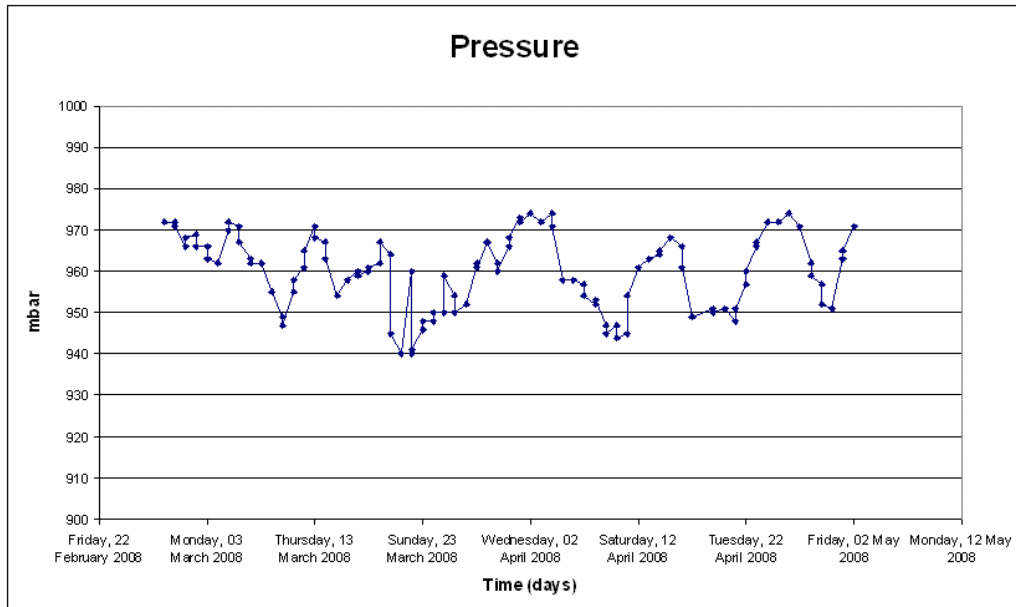


Figura 4.48 – Andamento pressione

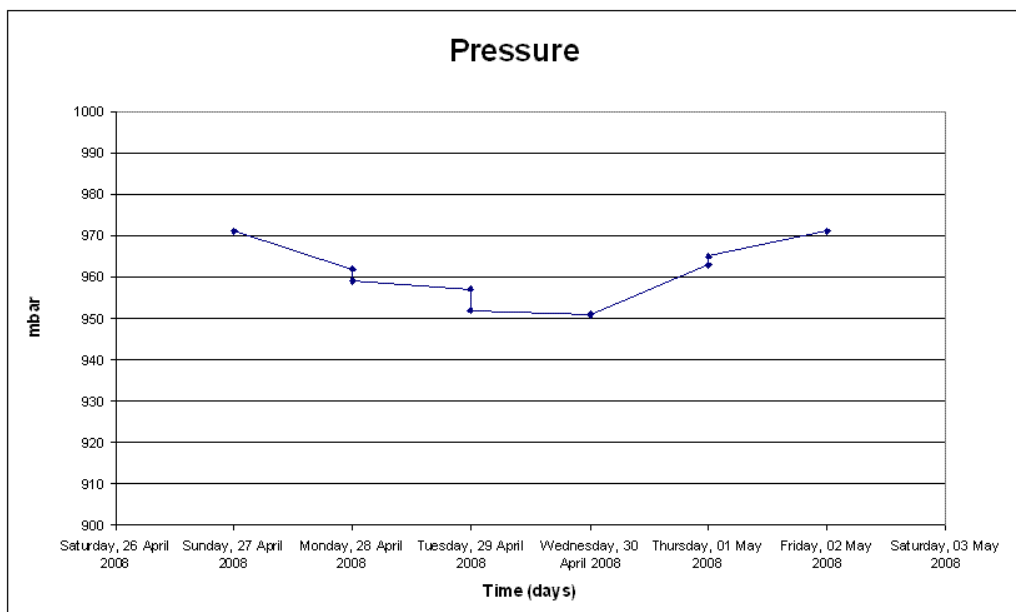
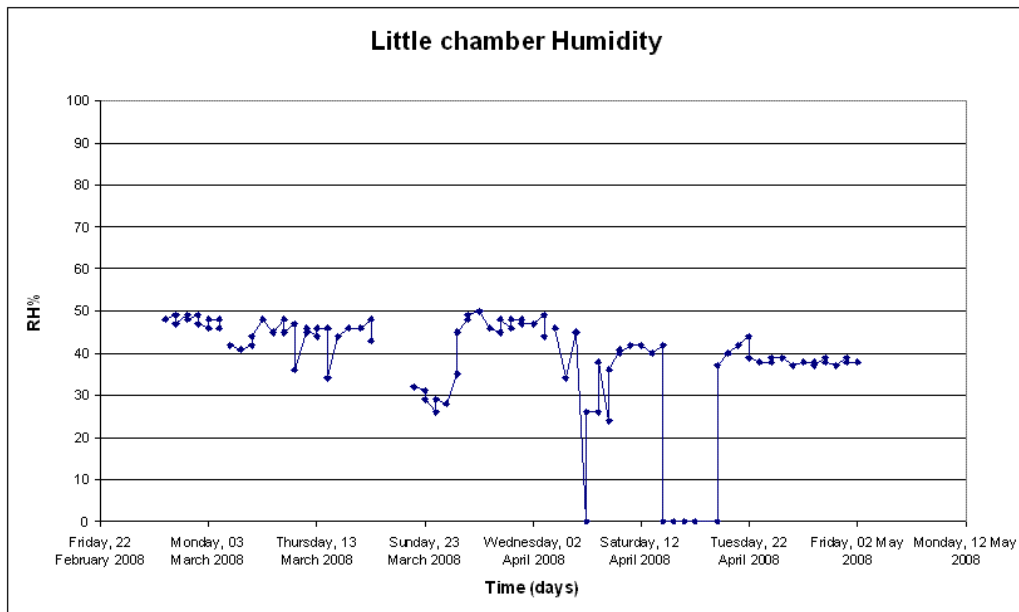
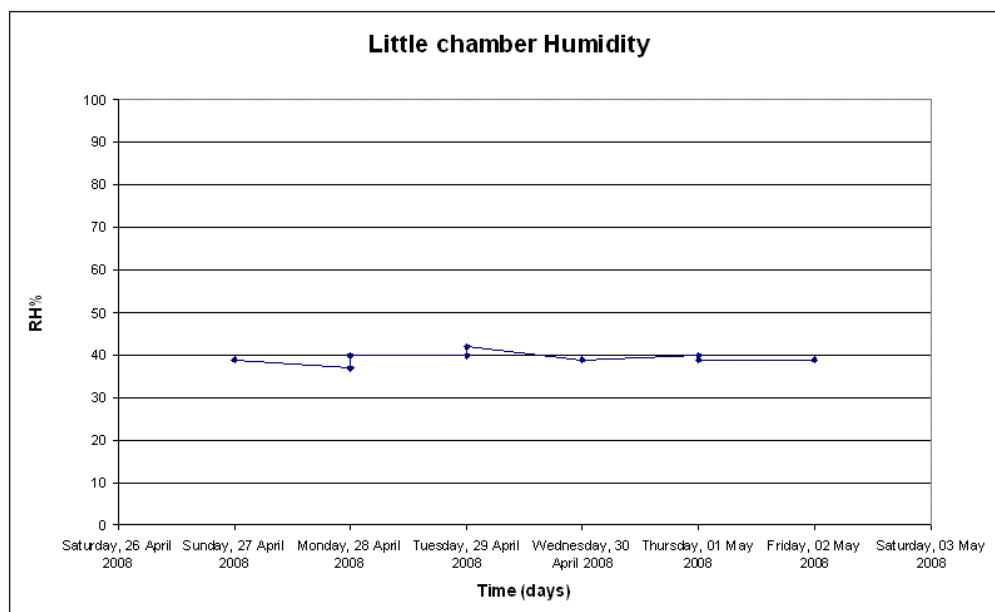


Figura 4.49 – Andamento pressione 29-30 Aprile



*Figura 4.50 – Andamento umidità RPC GGM*



*Figura 4.51 – Andamento umidità RPC GGM 29-30 Aprile*

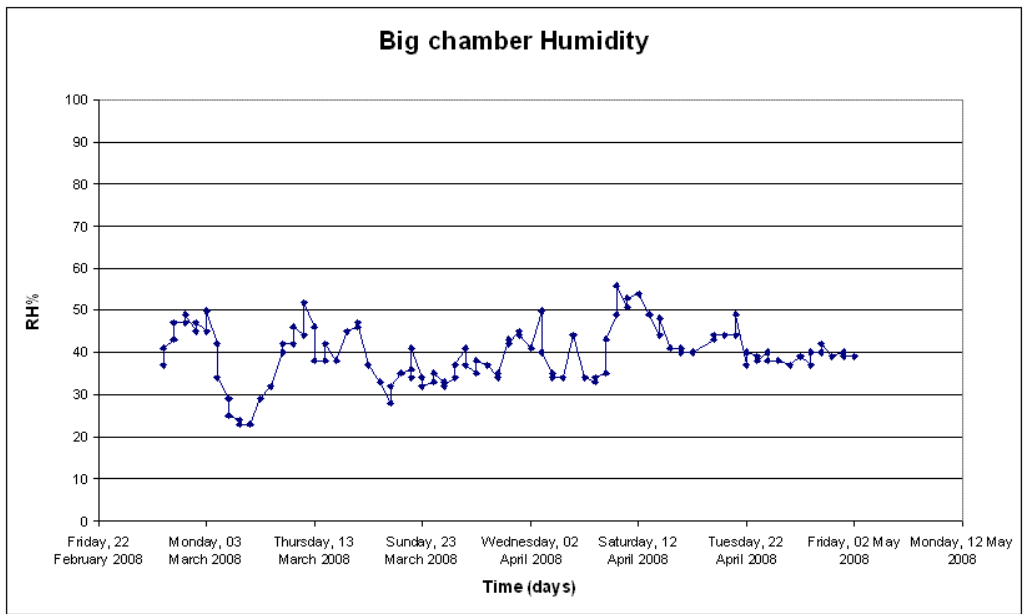


Figura 4.52 – Andamento umidità RPC CLS

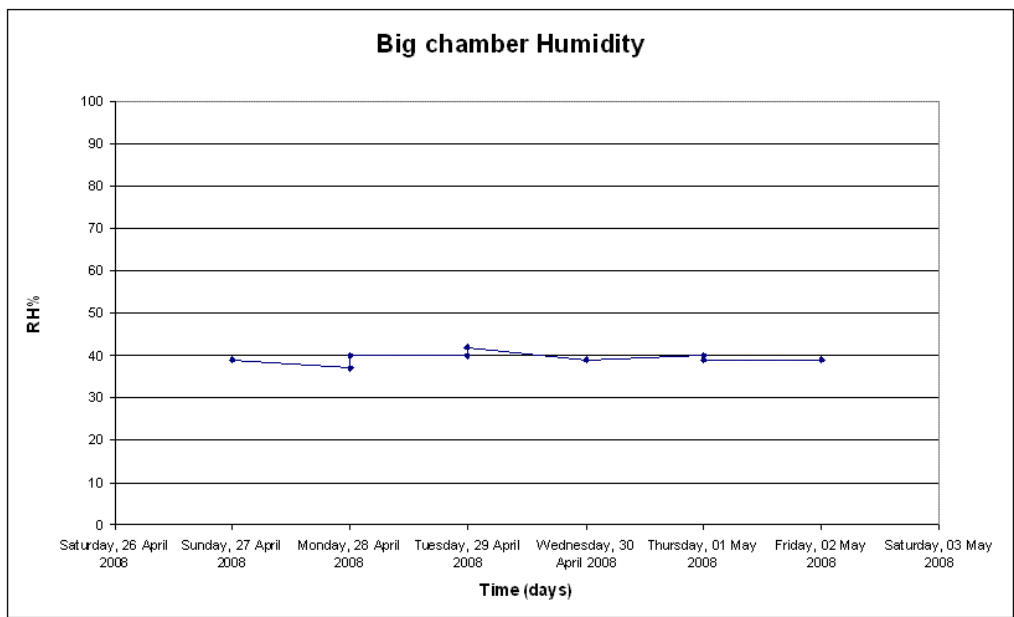


Figura 4.53 – Andamento umidità RPC CLS 29-30 Aprile

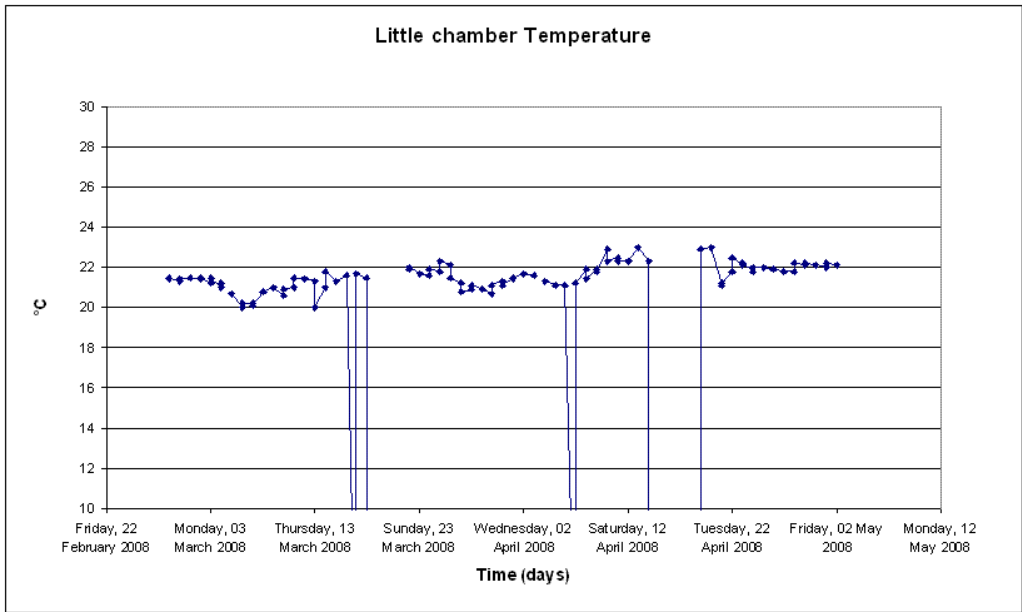


Figura 4.54 – Andamento temperatura RPC GGM

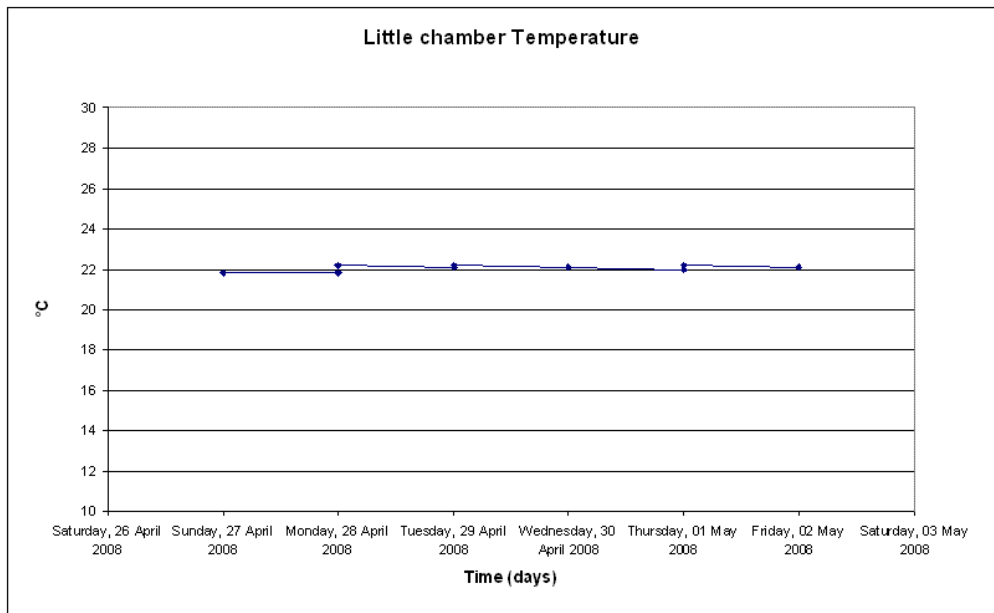


Figura 4.55 – Andamento temperatura RPC GGM 29-30 Aprile



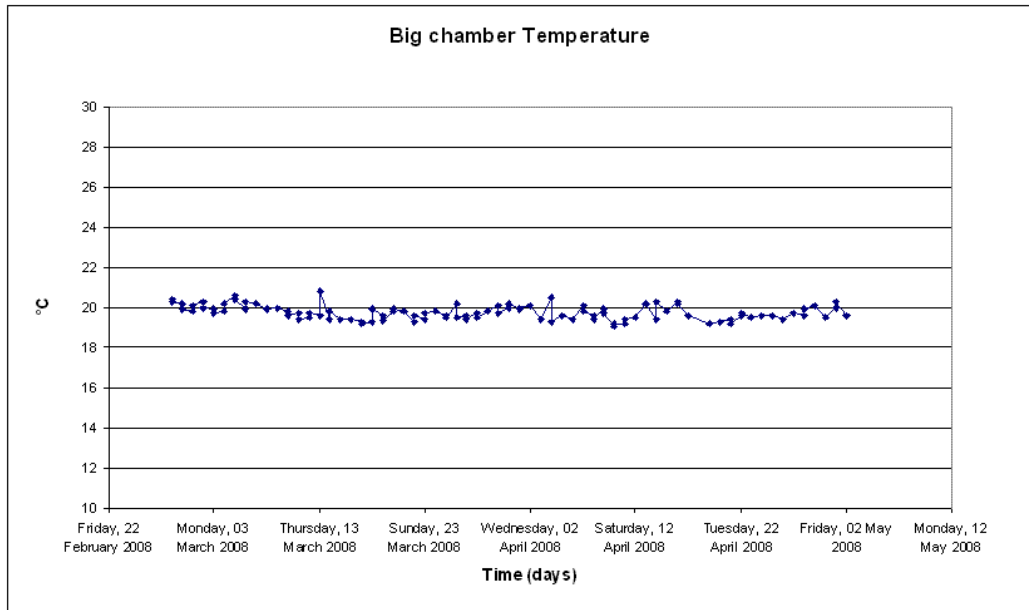


Figura 4.56 – Andamento temperatura RPC CLS

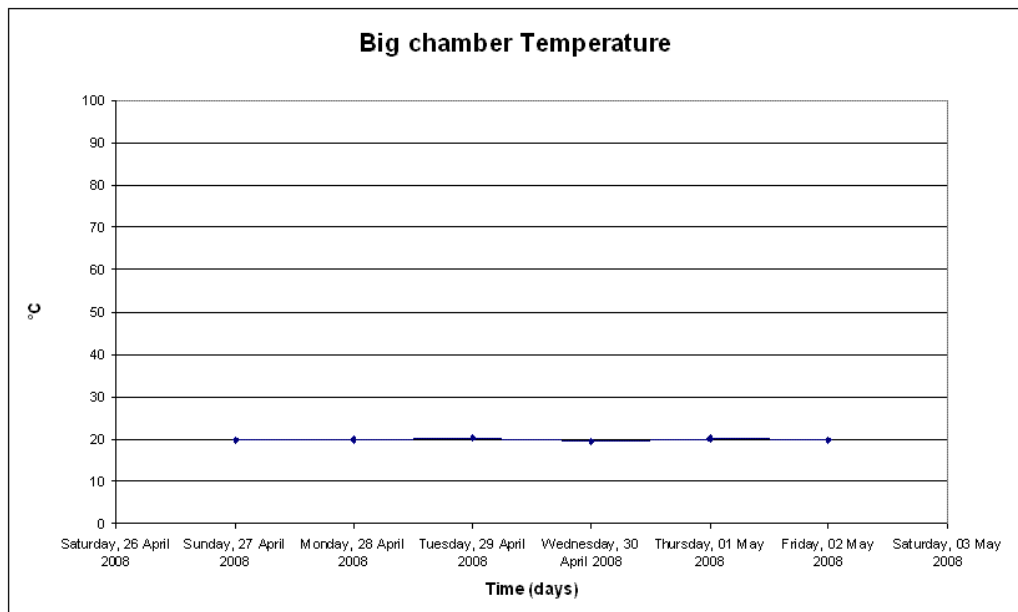


Figura 4.57 – Andamento temperatura RPC CLS 29-30 Aprile

#### 4.f.iii Risultati del monitoring: Conclusione

Analizzando le figure da 4.36 a 4.42 abbiamo corretto l'andamento di carica crescente con l'andamento della pressione. L'influenza della pressione sulla carica è stata modellizzata costruendo una funzione che correlasse queste due variabili. In particolare è stato preso un periodo di riferimento, e una camera di esempio, nel quale la pressione era variata molto e si è fatto un fit con una funzione polinomiale di terzo grado. Ottenuti i parametri di tale curva abbiamo corretto la carica relativa al periodo nel quale abbiamo scoperto il picco incognito per un fattore correttivo, l'inverso della funzione. In figura 4.58 vediamo l'andamento della carica rispetto al tempo in un periodo di stabilità, durante il quale la pressione è variata. In nero vediamo il vero andamento della carica mentre in rosso vediamo l'andamento che abbiamo ricostruito dalla sola informazione della pressione.

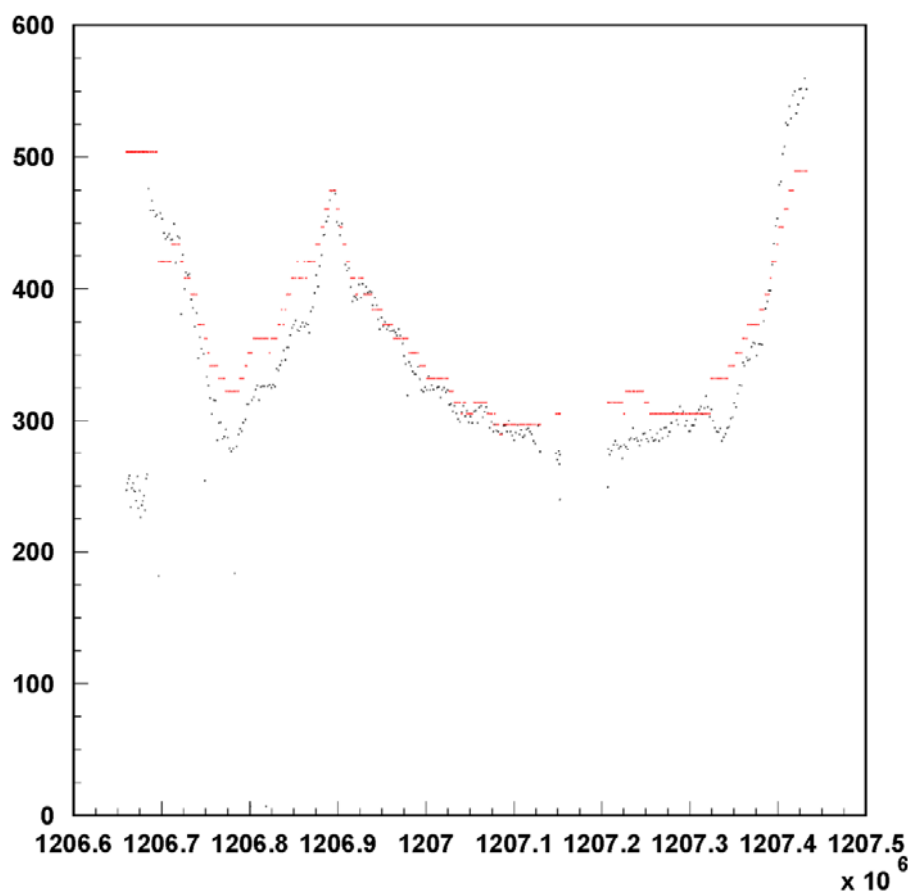


Figura 4.58 – Andamento carica influenzata da pressione in periodo stabilità

La curva rossa non segue perfettamente la curva nera sperimentale in quanto il processo di fit ha coinvolto solo la pressione e la carica supponendo che tutte le altre variabili siano rimaste costanti. Come si vede dalle figure 4.51 e 4.54 invece ci sono state lievi variazioni di temperatura e umidità. E' in corso una analisi multivariata più approfondita che terrà conto anche dell'influenza degli altri parametri. Abbiamo comunque applicato la correzione precedente per stimare quale sarebbe stata la carica che avremmo avuto per la sola pressione e abbiamo ottenuto il plot come in figura 4.57. L'andamento della curva rossa segue bene i punti dei dati e si conferma quindi che l'aumento di carica osservato è compatibile con il solo aumento di pressione ambiente.

L'analisi della risposta delle camere di GGM conferma quindi con alta sensibilità che il contaminante non ha effetto sul punto di lavoro dei rivelatori a RPC.

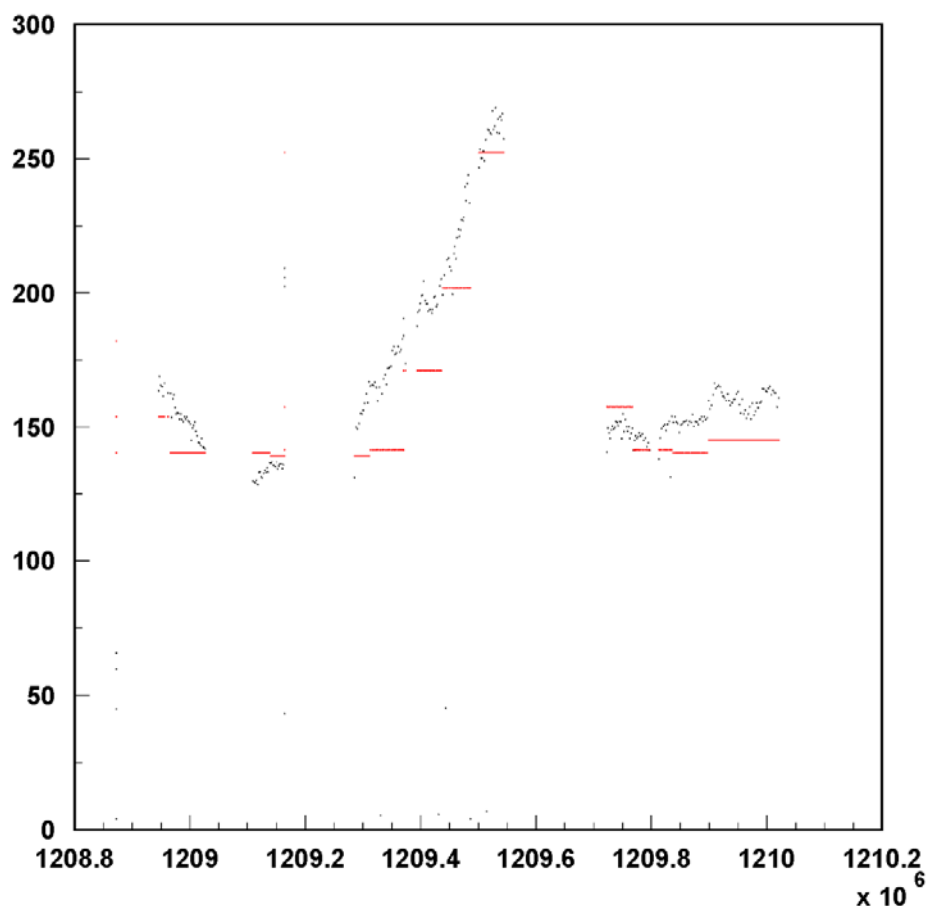


Figura 4.57 – Andamento carica influenzata da pressione nel periodo contaminato

#### 4.f.iv.1 Modellizzazione: Rete Neurale

Un modello teorico del comportamento delle camere RPC sarebbe di estremo interesse per il monitoring delle camere stesse perché potrebbe prevedere situazioni critiche in anticipo e permettere per tempo operazioni di recupero delle performance del rivelatore.

Come abbiamo detto nel comportamento nel tempo di queste camere entrano in gioco moltissimi fattori, i quali si possono accoppiare e rendere di difficile comprensione l'influenza dei singoli parametri. Perciò a questo proposito si è pensato di partire direttamente dai dati sperimentali, anche perché i modelli solo teorici proposti sono insufficienti e coinvolgono aspetti troppo diversi fra loro per costruire un modello coerente. Si hanno quantità enormi di dati con parametri molto diversi e si possono usare questi dati già esistenti per costruire un telaio di modello.

Il concetto base è quello di addestrare una rete neurale con tutte le variabili che prendono parte nella vita operativa di una camera RPC: storico della temperatura, umidità, radiazione, composizione e parametri gas, resistività bachelite ecc ecc.

Le reti neurali sono state usate in passato e tuttora ancora oggi nei campi più disparati e nei modi più diversi; la caratteristica base di ogni rete consiste in una grande elasticità di apprendimento che è stata pensata proprio ad imitazione di quella umana.

La struttura di base delle reti neurali risiede nel simulare il comportamento dei neuroni biologici prendendo come spunto le caratteristiche fisico/chimiche degli impulsi che ricevono e inviano e delle interconnessioni relative. Proprio questo ultimo punto sembra essere alla base, forse, dell'intelligenza umana. Le reti neurali sono dei sistemi adattivi che modificano la loro struttura in base a segnali esterni pesati dall'esperienza ricevuta.

Questo approccio è molto utile nello studio di sistemi non lineari, infatti i processi biologici si basano sulla non linearità della vita stessa per la maggior parte delle cose.

Questi sistemi neurali sono stati usati per lo studio di sistemi ad intelligenza artificiale, algoritmi genetici, metodi di ottimizzazione e studio di sistemi non lineari complessi.

Quello che rende il nostro cervello capace di acquisire input e imparare da essi è la capacità di memorizzare dinamicamente l'informazione; invece di memorizzare come un hard disk l'informazione in modo sequenziale, il cervello usa un meccanismo scattered cioè tutta l'informazione è distribuita attraverso una rete di neuroni la cui attivazione è garantita dal processo di apprendimento stesso che privilegia alcuni pattern invece che altri. Questo processo è un processo empirico e lento che inizia in modo random durante la fase di crescita e formazione del cervello. Una rete neurale è una struttura simile che all'inizio è un contenitore vuoto ma che funzionando acquisisce input dall'ambiente esterno che via via modificano la struttura del pattern e ciò consente alla struttura di memorizzare complessi set di dati.

Uno dei meccanismi più usati è quello della "Error back propagation" cioè dell'apprendimento supervisionato, che consente di associare input e output della rete creando una matrice di transizione tra input e output che rappresenta essa stessa la funzione di trasferimento tra due set di environment diversi. Col tempo iterando questo processo su moltissimi set di dati e minimizzando l'errore in uscita retropropagandolo all'indietro nella rete in modo tale da modificare i pesi delle connessioni neuronali si stabilizzano i valori del pattern e si ottiene una funzione di trasferimento che ben si accorda con la realtà. Il tutto viene memorizzato nei pesi tra le connessioni di tutti i neuroni della rete.

#### 4.f.iv.2 Modellizzazione: Validazione modello

Come prima applicazione di una rete neurale abbiamo scelto di usare questa configurazione in figura 4.58.

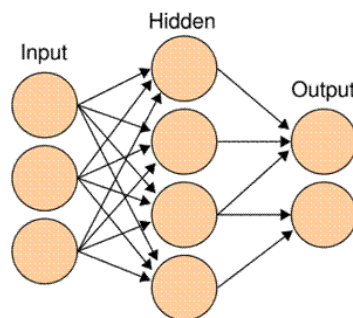


Figura 4.58 – Esempio di rete neurale con singolo strato intermedio

Questa configurazione ha uno strato di input, uno strato nascosto e uno strato di uscita. Lo strato di output è connesso all'input tramite lo strato nascosto che retropropaga l'errore cioè lo scarto tra valore fornito dalla rete e valore desiderato, quello dei dati sperimentali. Per validare la rete abbiamo usato un set di dati nel quale ad una variazione di pressione è corrisposta una variazione nella carica media delle camerette del GGM. Nella figura 4.59 vediamo l'andamento della pressione scelto per validare la rete.

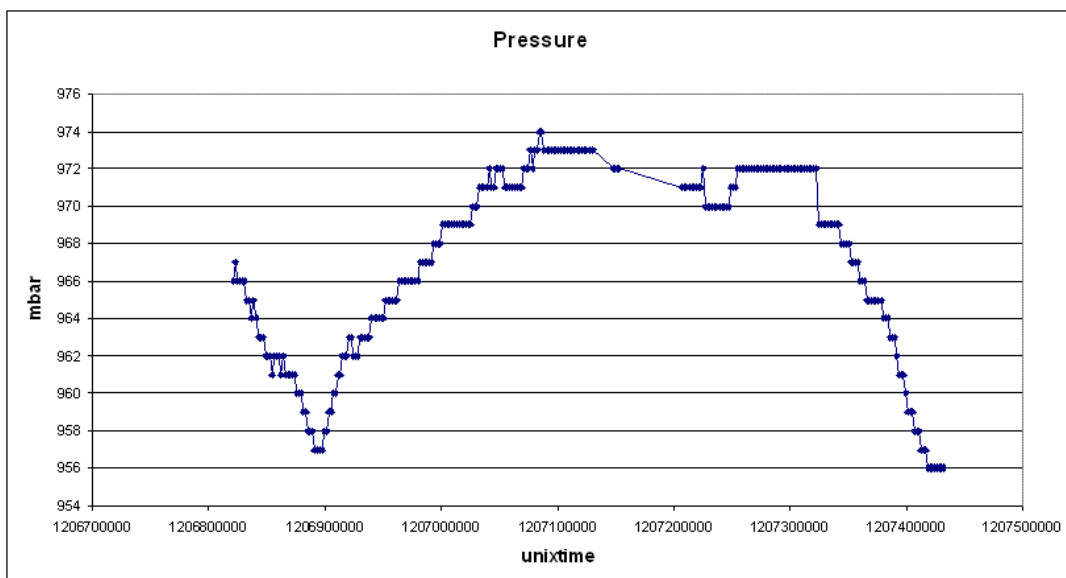


Figura 4.59 – Andamento della pressione scelto per validare modello

Nella figura 4.60 vediamo sia l'andamento della carica media sperimentale, in blu, e sia l'andamento della carica media calcolata mediante la rete neurale, in rosso. Vediamo che la camera si comporta come un perfetto barometro in quanto la pressione si riflette sulla tensione efficace e così facendo sposta il punto di lavoro della camera e i valori ottenuti dalla rete neurale sono in perfetto accordo con quelli sperimentali, se pur usando pochi punti sperimentali e pochi cicli di apprendimento.

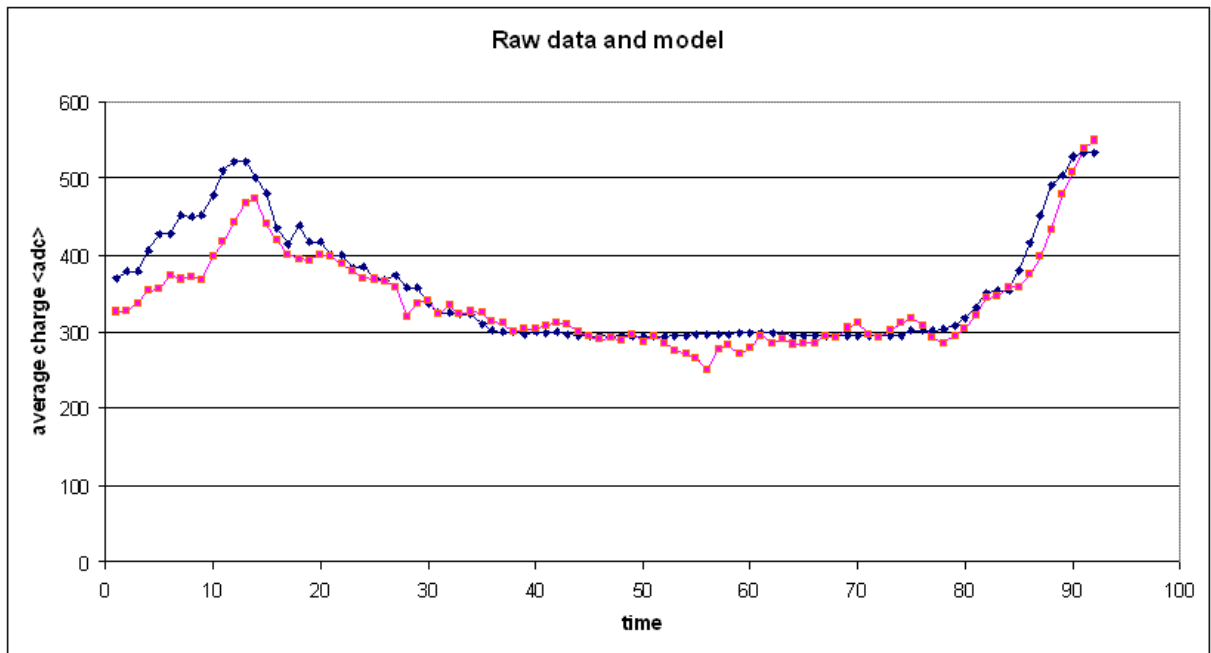
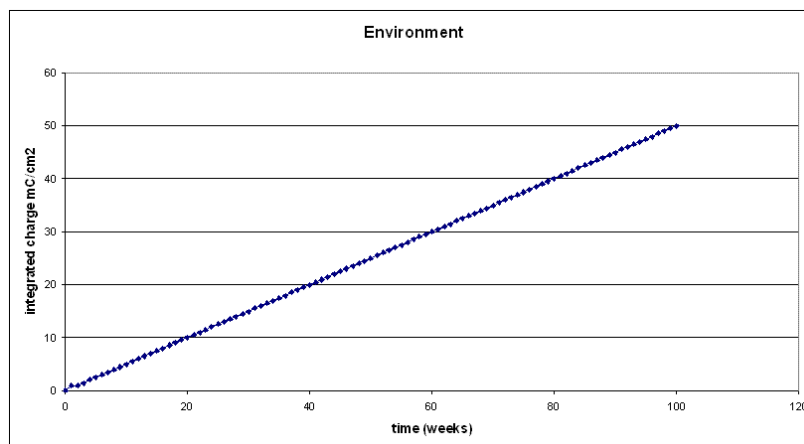


Figura 4.60 – Dati sperimentali e dati simulati dalla rete

### 4.f.iv.3 Modellizzazione: Previsioni

Inserendo nel set di dati in input alla rete anche informazioni sull'umidità ambientale e carica accumulata per via della radiazione di una sorgente irraggiante le camere, si sono potuti generare parecchi scenari. Una volta che la rete ha finito il processo di apprendimento è possibile modificare l'input generando nuove situazioni e combinazioni di fattori; se tutti gli input fanno parte dello stesso intervallo di valori che era stato fornito nella fase di apprendimento l'accordo con i dati sperimentali è garantito grazie alla minimizzazione dell'errore su tutti gli  $n$  parametri avvenuta nella fase di apprendimento.

In particolare si sono calcolate le uscite della rete incrementando la carica accumulata sulla camera, e per ogni distribuzione lineare di carica accumulata è stata variata l'umidità ambientale, come nelle figure da 4.61 a 4.63.



*Figura 4.61 – Curva di accumulazione di carica sulla camera*



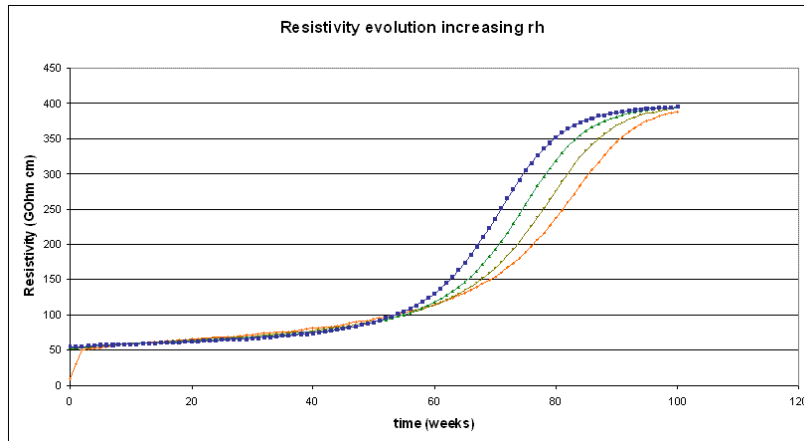


Figura 4.62 – Andamento della resistività al variare dell'umidità ambientale data la carica accumulata in figura 4.61

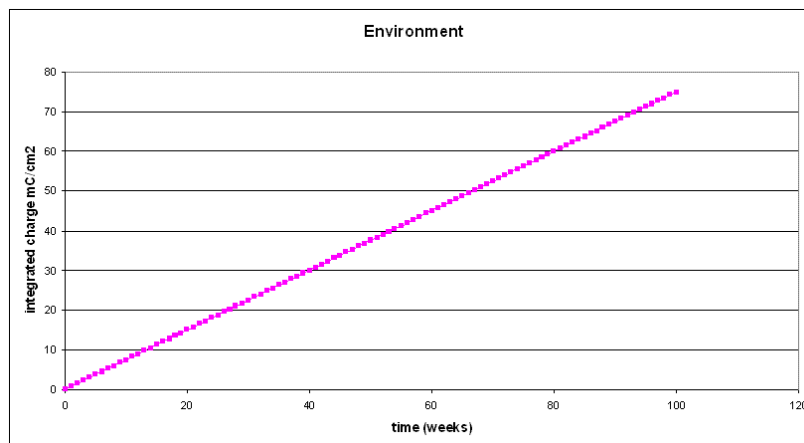


Figura 4.63 – Curva di accumulazione di carica sulla camera

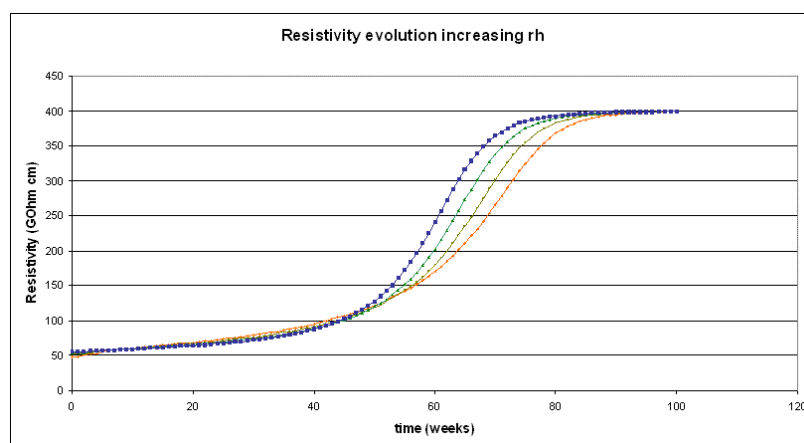


Figura 4.64 – Andamento della resistività al variare dell'umidità ambientale data la carica accumulata in figura 4.63

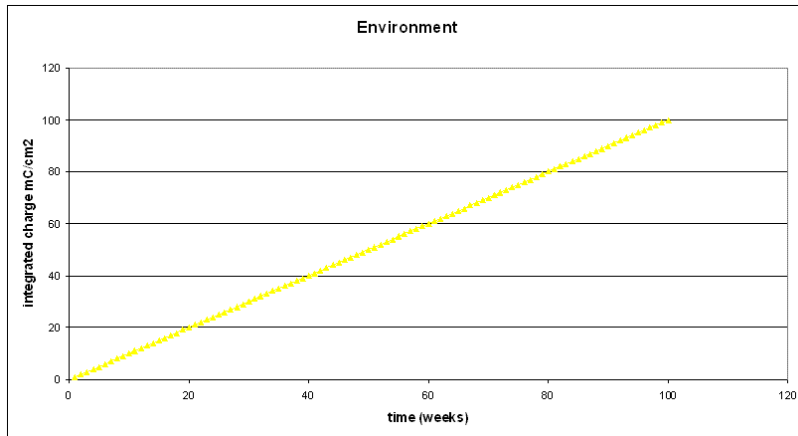


Figura 4.65 – Curva di accumulazione di carica sulla camera

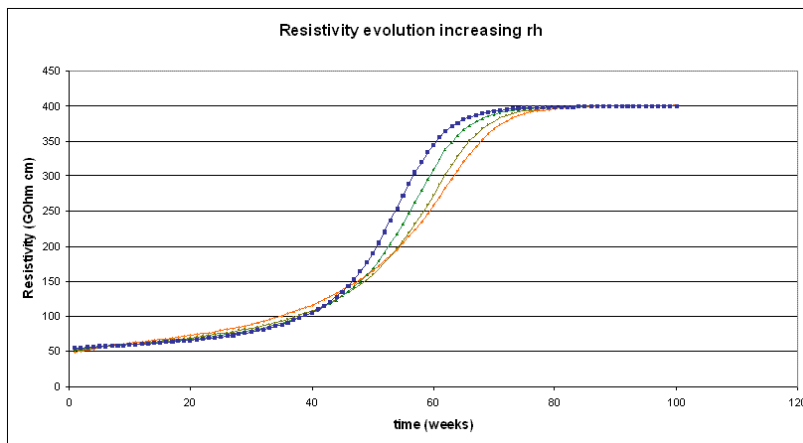


Figura 4.66 – Andamento della resistività al variare dell'umidità ambientale data la carica accumulata in figura 4.65

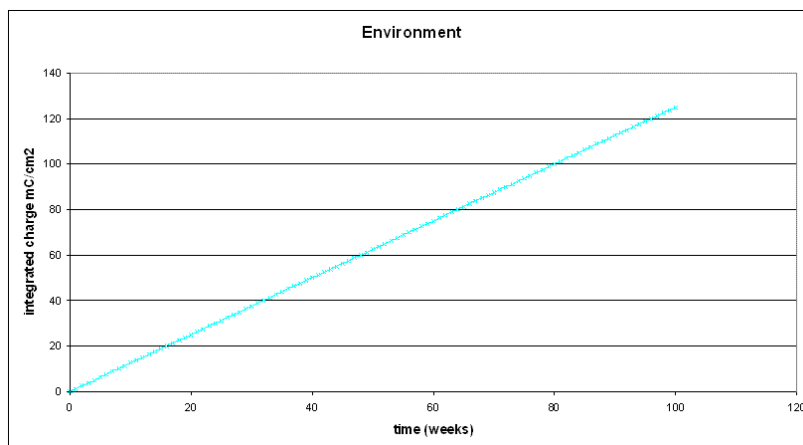


Figura 4.67 – Curva di accumulazione di carica sulla camera

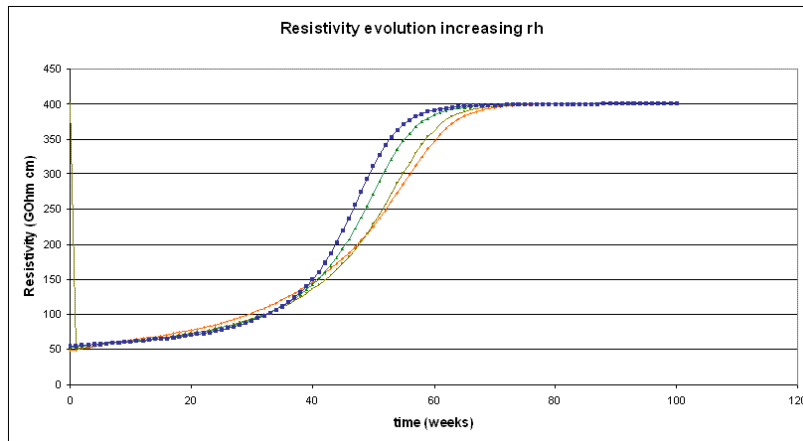


Figura 4.68 – Andamento della resistività al variare dell'umidità ambientale data la carica accumulata in figura 4.67

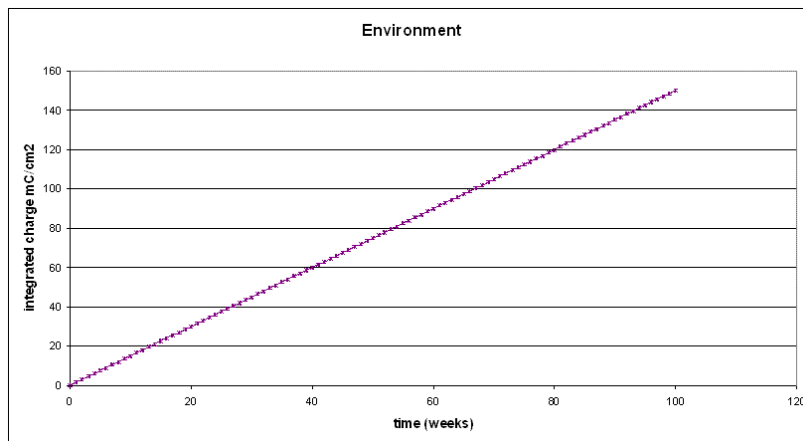


Figura 4.69 – Curva di accumulazione di carica sulla camera

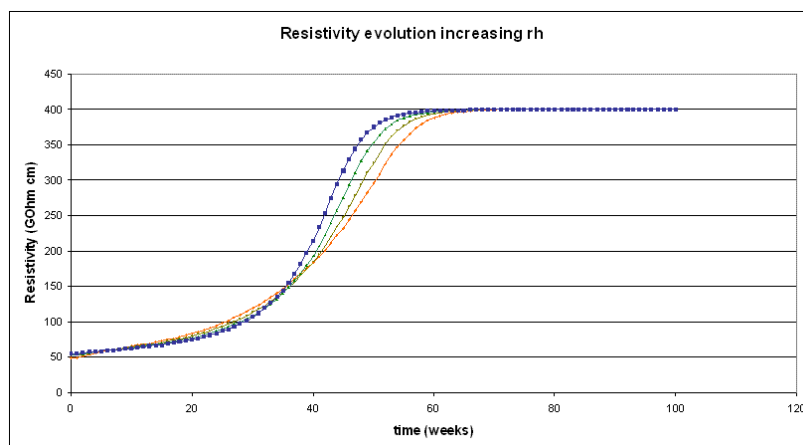


Figura 4.70 – Andamento della resistività al variare dell'umidità ambientale data la carica accumulata in figura 4.69

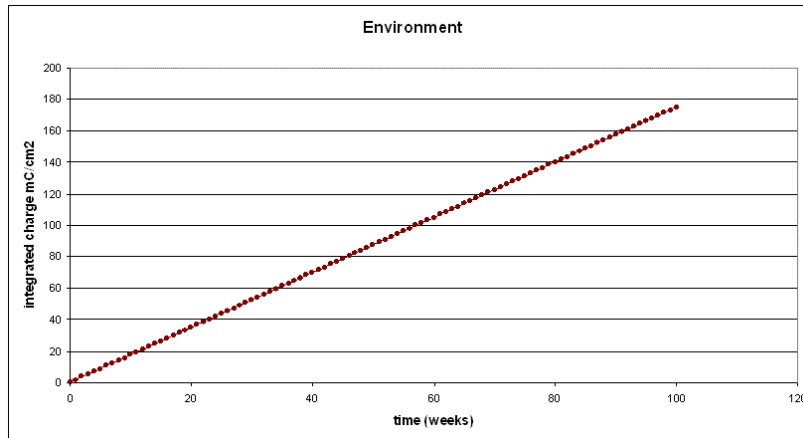


Figura 4.71 – Curva di accumulazione di carica sulla camera

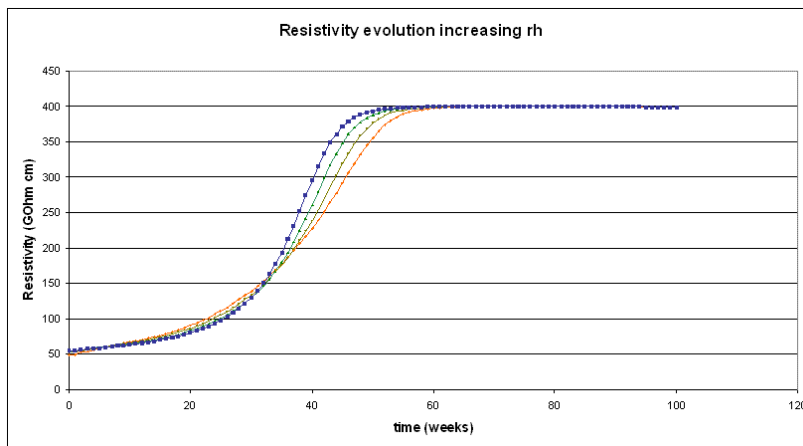


Figura 4.72 – Andamento della resistività al variare dell'umidità ambientale data la carica accumulata in figura 4.71

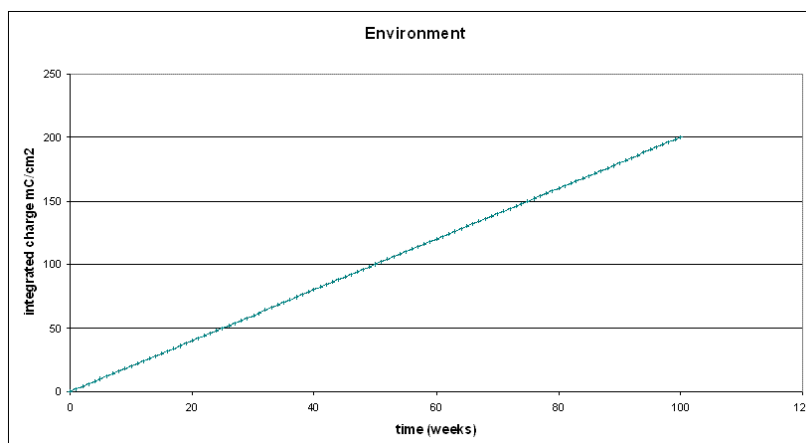


Figura 4.73 – Curva di accumulazione di carica sulla camera

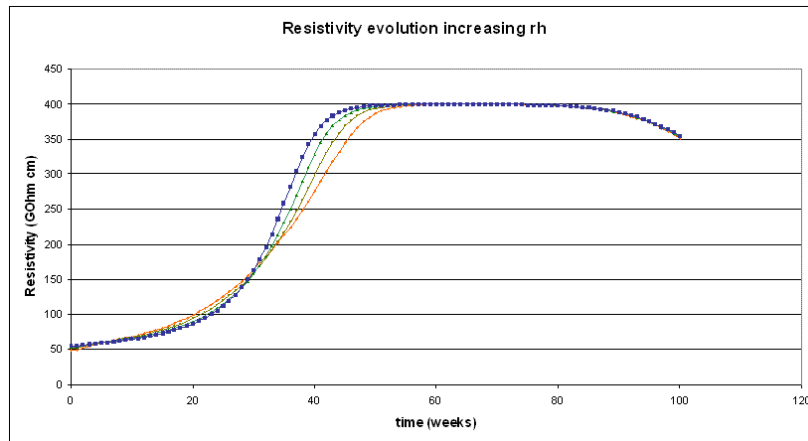


Figura 4.74 – Andamento della resistività al variare dell'umidità ambientale data la carica accumulata in figura 4.73

## 4.g Conclusioni

Il commissionamento del GGM, cioè la fase di installazione tecnica e verifica delle prestazioni dei rivelatori e di tutti gli apparati, è avvenuta nel setup dell'ISR. Questa fase è stata molto interessante perché ha permesso di seguire da vicino sin dall'inizio sia la parte prettamente hardware-elettronica che la parte di sviluppo software e interpretazione dei risultati.

Il contributo personale fornito ha riguardato in special modo lo sviluppo di strumenti per acquisizione e processamento dei dati e nello stesso tempo il sistema è stato seguito nelle varie fasi di vita, cioè nell'impianto iniziale e nella successiva gestione.

Lo sviluppo di un progetto di rete neurale è stato pensato per fare previsioni su larga scala circa il comportamento delle camere RPC; è stato applicato a piccoli casi riguardanti il GGM, questi casi sono serviti per validare il processo che per le sue capacità adattive sembra promettente per tenere conto dei molteplici aspetti che intervengono nell'invecchiamento degli RPC; in special modo a causa delle caratteristiche molto eterogenee di queste camere che le rendono particolarmente difficili da studiare teoricamente con gli attuali modelli.

# 5 SVILUPPO SENSORI LASER IN FIBRA OTTICA

## 5.a Introduzione

La tecnologia dei *sensori a fibra ottica* copre una grande varietà di apparecchiature che funzionano in modi molto differenti, l'uso più semplice di una fibra ottica come sensore è quello di individuare i cambiamenti della luce all'esterno della fibra.

In generale una fibra ottica può assorbire la luce proveniente da altri sensori o direttamente; per esempio, un prisma immerso in un serbatoio può retroriflettere la luce verso una fibra ottica se il livello del liquido scende al di sotto della superficie riflettente del prisma come in figura 5.1.

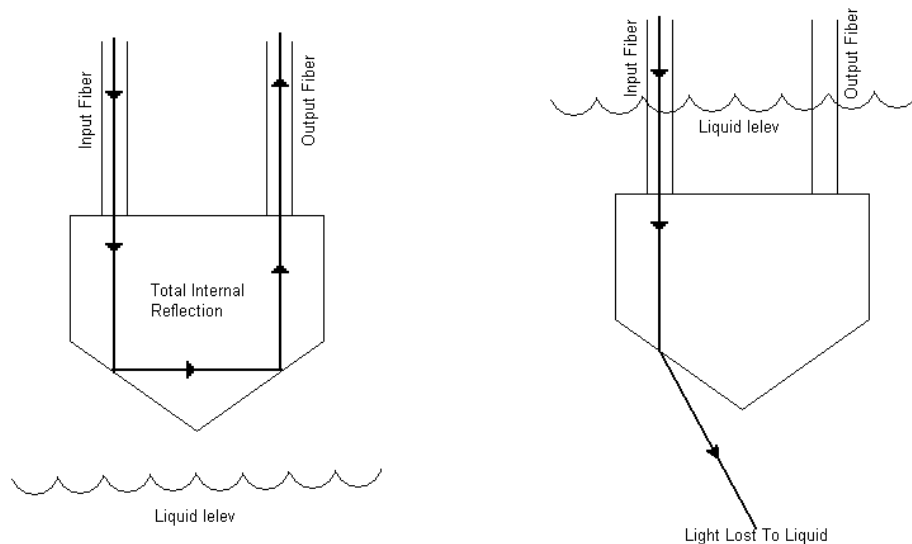


Figura 5.1 - Schema di un sensore che misura il livello di un liquido

Altri sensori a fibre ottiche individuano i cambiamenti della luce che passa attraverso la fibra dovuti a mutamenti dell'ambiente esterno, come ad esempio pressione o temperatura. Visto che generalmente le fibre ottiche usate nelle comunicazioni non rispondono significativamente agli stimoli esterni c'è la necessità di produrre fibre ottiche o strutture particolari all'interno delle fibre in modo da poter rispondere in maniera significativa agli stimoli esterni; si possono usare anche gli effetti ottici, come l'interferenza, per monitorare piccole variazioni che si accumulano lungo la fibra.



I fattori esterni possono influire sulla trasmissione della luce all'interno della fibra in molti modi, in base al tipo di fibra e a come la fibra è assemblata. Le fibre ottiche per le comunicazioni e i relativi cablaggi sono progettati per essere praticamente isolati dall'ambiente esterno. Per i sensori, invece, c'è bisogno che le fibre rispondano il più possibile agli stimoli esterni; per esempio, si può immaginare di drogare le fibre con materiali che cambiano il loro indice di rifrazione al variare della temperatura o della pressione, oppure si possono appoggiare delle fibre fra due piastre ruvide, in modo che l'aumentare della pressione fra le due piastre produca nelle fibre delle micro flessioni.

I sensori a fibra ottica maggiormente usati nelle applicazioni aerospaziali sono gli *strain gages ottici*, essi si basano sul fatto che, i materiali otticamente isotropi, come il vetro delle fibre ottiche, se deformati diventano birifrangenti; l'indice di rifrazione cambia e conseguentemente ad esso anche la velocità a cui viaggia la luce nella fibra stessa. Anche la lunghezza della fibra varia al variare della sollecitazione. Entrambi questi effetti modificano le proprietà della luce e questo può essere rilevato in diversi modi come ad esempio usando metodi interferometrici che risultano essere i più sensibili anche se meno adattabili ad applicazioni sul campo. In tali sistemi il segnale deformato viene unito con uno di riferimento e l'interferenza che si ottiene è usata per valutare la deformazione.

Acquisendo l'intensità del fascio luminoso con un fotodiodo ed analizzandolo con tecniche adatte, si riesce a rilevare la deformazione con un'elevata precisione.

Il fatto che le fibre ottiche siano immuni ai campi elettromagnetici le rende particolarmente adatte ad essere usate come sensori; lo sviluppo poi, di fibre in quarzo, materiale resistente alle alte temperature e compatibile con gli ambienti chimici corrosivi, ha fatto sì che al momento attuale i sensori in fibra ottica rappresentino l'alternativa più valida a tutti i sensori elettronici.

Oggi, i sensori in fibra ottica sono usati per rilevare la deformazione locale, la crescita delle cricche, la pressione dei fluidi, la temperatura e l'emissione acustica dei solidi.

I reali vantaggi delle fibre ottiche risiedono, inoltre, nelle caratteristiche che le rendono perfettamente compatibili con il progetto di una rete neurale che "senta"

ogni stato di microdeformazione all'interno dei materiali. I normali sensori elettrici hanno, infatti, il grande svantaggio di dover essere incollati sulla superficie del materiale, per cui le loro capacità sensoriali, così come la loro vita, dipendono strettamente dal tipo di collante utilizzato.

L'inserimento delle fibre ottiche all'interno di materiali metallici e non, significherebbe possibilità di un controllo totale all'interno del materiale non avendo tra l'altro alcun vincolo con lo spessore del pezzo da realizzare; con gli estensimetri tradizionali, invece, affinché essi sentano una micro-deformazione interna è necessario che essa si verifichi all'interno della zona senziente, per cui il rilevamento avviene solo se lo spessore del pezzo è molto limitato.

Tuttavia, quando non è possibile inserire i sensori in fibra ottica all'interno del materiale, è comunque possibile effettuare l'incollaggio sulla superficie esterna.

Per queste ragioni la loro applicazione è in crescita, in particolare nel campo della rilevazione delle deformazioni dove sono necessari misuratori facilmente installabili e maneggiabili, anche se i loro costi sono ancora elevati.

## 5.b Monitoraggio della posizione del rivelatore di silicio di CMS con FBG

Questa proposta di monitoring è stata avanzata a CMS dopo la fruttuosa esperienza avuta dal gruppo di ricerca di Frascati nell'applicazione di questa tecnologia ai rivelatori straw tube nell'esperimento BTeV e nel monitoring dei rivelatori a pixel sempre per BTeV. Per mezzo di una struttura sofisticata si era raggiunta la precisione di  $10\mu\text{m}$ , migliorabile fino a  $3\mu\text{m}$  nel posizionamento e movimentazione dei rivelatori a pixel.

Per la prima volta la tecnologia dei sensori di Bragg in fibra ottica è stata applicata ad un esperimento di fisica delle particelle ref[53].

## 5.c Sensori reticolo di Bragg

Il sensore in fibra ottica di Bragg o reticolo di Bragg consiste in una zona della fibra in cui si è prodotta una variazione periodica dell'indice di rifrazione: esso è classificato come sensore intrinseco perché la zona sensibile è interna alla fibra.

Tale deformazione del reticolo può essere causata da una qualsiasi azione sulla fibra e ne provoca una variazione del periodo del reticolo stesso che può essere messa in relazione con la grandezza che l'ha generata. La fibra ottica è costituita da due cilindri concentrici chiamati partendo dall'interno: core e cladding. All'esterno per proteggere la fibra sono applicati uno o più rivestimenti. Il core e il cladding sono vetri con una leggera differenza nell'indice di rifrazione che consente di far propagare il segnale luminoso all'interno del core per riflessione totale interna. I reticoli di Bragg possono essere impressi nel core della fibra a cui è stato tolto il rivestimento più esterno, ma non il cladding, visto che questo è trasparente alle radiazioni UV; la possibilità di realizzare reticoli permanenti si basa sul fenomeno della fotosensibilità. Nel momento in cui una luce ultravioletta colpisce una fibra ottica si genera in essa una variazione permanente dell'indice di rifrazione.

Le fibre ottiche più utilizzate per la realizzazione di questi sensori sono le fibre drogate con germanio, sebbene non siano le uniche fibre che rispondono al fenomeno della fotosensibilità. Uno dei primi metodi sviluppati per la realizzazione del reticolo di Bragg, fu quello che sfruttava l'interferenza di un raggio di luce blu (con una lunghezza d'onda di 488 nm) con il raggio riflesso dall'estremità della fibra per creare la variazione dell'indice di rifrazione.

Con tale metodo di scrittura del reticolo, però, il sensore era in grado di funzionare solo con luce nel visibile, cioè con lunghezze d'onda non troppo diverse da quelle usate per imprimere il reticolo stesso; per superare questa limitazione si è passati all'utilizzo del metodo dell'olografia trasversale.

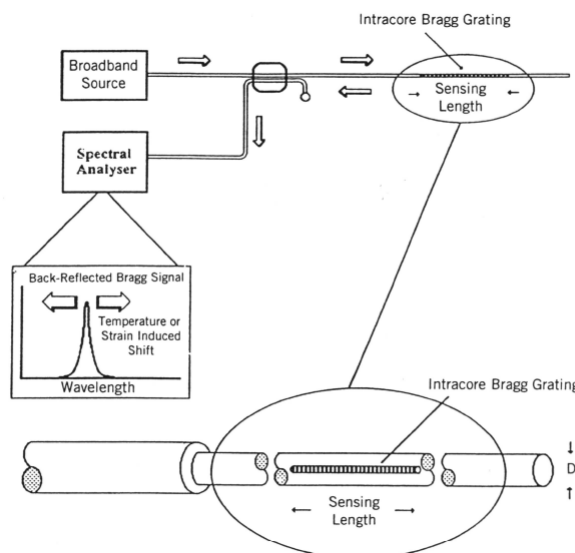


Figura 5.3 - Sensore interferometrico a reticolo di Bragg

Un'altra tecnica utilizzata per la fabbricazione del reticolo di Bragg è quella della maschera di fase (una lastra piana di silice trasparente ai raggi ultravioletti). Rispetto alla tecnologia olografica, questa tecnica garantisce una maggiore facilità nell'allineare la fibra per imprimere il reticolo, permettendo, quindi, una maggiore precisione nella posizione del reticolo stesso, insieme ad una semplificazione del manufacturing.

Con la tecnica della maschera di fase è anche possibile realizzare reticoli *chirped*, ovvero reticoli in cui il periodo di variazione dell'indice di rifrazione cambia lungo il reticolo; in questo modo la sua risposta spettrale è più ampia.

Infine c'è la tecnica punto per punto, che serve essenzialmente a realizzare microreticoli di Bragg, però questo metodo non è molto efficiente ed è sicuramente più dispendioso.

Se un fascio di luce proveniente da una sorgente a larga banda (come un diodo laser), viene inviato nella fibra, solo una parte di esso verrà riflesso dal reticolo, cioè, solo quella che soddisfa la condizione di Bragg.

Ogni perturbazione che interessa il sensore provoca una variazione del periodo  $\Lambda$  del reticolo e quindi della lunghezza d'onda di Bragg, che può essere rilevata e correlata alla grandezza in misura nel punto in cui è posto il sensore.

L'indipendenza del livello totale della luce, dei fattori di perdita dei connettori e della potenza luminosa inviata dalla sorgente rende molto vantaggiosa questa tecnologia. Lo stato dell'arte di tali sensori FBG, considerando fibre ottiche di vetro, è  $1 \mu\text{strain/nm}$ . Tale sensibilità è da considerare unidimensionale nella direzione delle fibre in quanto la risposta a componenti trasversali di deformazioni è circa 500 volte inferiore (come stimato da Dunphy Meltz e Morey).

## 5.d.i Sensore Fabry-Perot per alte temperature

Le fibre ottiche sono in generale fragili e delicate, a causa di questo sorgono complessità tecniche nell'inserimento di queste fibre in matrici metalliche, specialmente se siamo in presenza di materiali con elevato punto di fusione.

Il tempo di raffreddamento della colata deve essere rapido al fine di non distruggere le proprietà ottiche delle fibre, inoltre per certe leghe come quelle base nickel o titanio, operando a temperature maggiori di 1000°C sono necessarie fibre particolari di quarzo o zaffiro.

Queste fibre sono già state utilizzate come rinforzo per i compositi e possono essere usate nei componenti realizzati per getto. Tuttavia presentano alcuni problemi in quanto non sono mai stati realizzati con esse sensori di Bragg. Anche se può essere realizzata una configurazione che presenti zone con diversi indici di rifrazione, i processi di diffusione ad alte temperature li farebbero sparire durante l'inserimento in lega fusa. Questi problemi sono oggetto di numerosi studi: una possibile soluzione si può ricercare nelle nanotecnologie di incisione.

Il limite quindi è rappresentato dall'opportunità di inserire la fibra senza danneggiarla meccanicamente a causa delle sollecitazioni che si generano durante il raffreddamento. Inoltre, ci possono anche essere interazioni chimiche tra la fibra e il metallo fuso. Infine, è necessario che si ottenga una buona interfaccia fibra/matrice affinché sia possibile un buon trasferimento degli sforzi dalla matrice alla fibra. A tal fine, sono state sviluppate diverse tecniche per proteggere la fibra durante le fasi di colata.

Una strada alternativa rispetto ai sensori FBG è rappresentata dallo sviluppo di sensori intrinseci realizzati per frattura in situ di fibre di zaffiro inserite nei materiali per applicazioni ad alte temperature. Sensori di questo tipo risulterebbero notevolmente più economici e di facile realizzazione.

L'interferometro di Fabry-Perot (*F.P.I., Fabry-Perot Interferometer*) è costituito da due specchi semiriflettenti che racchiudono una cavità all'interno della quale è posto un mezzo trasmittente (per esempio vuoto, aria, o silice del core di una fibra ottica) con coefficiente di assorbimento per unità di lunghezza  $\alpha$ .

Indicando con  $\beta$  l'angolo di propagazione all'interno dell'interferometro (angolo tra la normale alla superficie semiriflettente e la direzione di propagazione del raggio luminoso), e  $a$  la distanza tra gli specchi, ovvero la *cavità* dell'interferometro (figura 5.3), quindi la luce segue un cammino di lunghezza uguale ad  $a/\cos(\beta)$ .

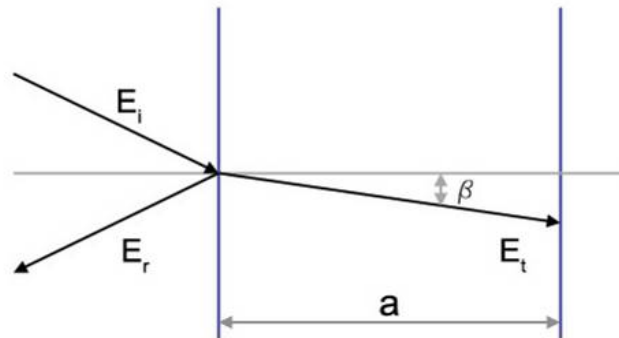


Figura 5.5 – Schema di rifrazione

Si può ipotizzare  $\beta = 0$  al fine di semplificare i calcoli, in quanto avere  $a/\cos(\beta)$  invece di  $a$  non altera le conclusioni ma rende meno agevole la trattazione delle formule.

Un generico campo elettrico può essere espresso come:

$$E = |Ae^{\alpha \cdot z}| \cos(kz - \omega t)$$

$$E = [Ae^{(-\alpha \cdot z)}] \Re[e^{i(kz - \omega t)}]$$

ovvero

$$E = \Re[Ae^{(i\theta \cdot z)} e^{-i\omega t}]$$

dove:

- $A$  è l'ampiezza del campo elettrico,
- $\alpha$  è il coefficiente di assorbimento del materiale in cui propaga la luce,
- $k$  è il *numero d'onda* legato alla lunghezza d'onda dalla relazione  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,
- $\theta$  è la fase del campo elettrico  $\theta = k + i\alpha$
- $z$  è l'impedenza caratteristica del mezzo di cui è costituita la cavità (ad esempio silice o aria).

Per studiare il fenomeno dell'*interferenza*, si può considerare solamente la struttura spaziale delle onde elettromagnetiche, dato che la relazione di fase tra due raggi in ogni punto dello spazio è costante al variare del tempo; si opera, quindi, solamente sull'*ampiezza complessa*  $E = A \cdot e^{i(\theta \cdot z)}$ .

Ipotizzando che i due specchi abbiano identica  $r$  (*coefficiente di riflessione*) e  $t$  (*coefficiente di trasmissione*), si ricava il campo trasmesso in seguito alle riflessioni multiple all'interno della cavità (Figura 5.4):

$$E_t = At^2 e^{i\theta\alpha} \sum_{n=0}^{n=h} |r|^{2n} e^{2ni\theta\alpha}$$

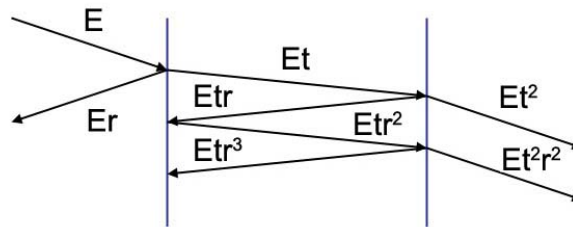


Figura 5.6 Andamento del campo all'interno della cavità di un sensore F.P.I.

Visto che nelle applicazioni si misura l'*intensità* della radiazione luminosa che attraversa l'F.P.I., si definisce questa grandezza come:

$$I = \frac{E_{eff}^2}{z}$$

dove  $E_{eff}$  è il *valore efficace* del campo da cui si ricava:

$$I = \frac{E^2}{2z}$$

Considerando l'*n*-esima riflessione tra le facce della cavità, indicando con  $I_{in}$  l'intensità del fascio incidente,  $I_{tn}$  l'intensità della radiazione trasmessa e  $I_{rn}$  l'intensità di quella riflessa, trascurando l'assorbimento delle superfici semiriflettenti, la relazione tra queste quantità vale:

$$I_{in} = I_{tn} + I_{rn}$$

Sostituendo l'espressione in funzione del campo si ricava



$$\frac{E_m^2 + E_r^2}{2z} = \frac{E_{in}^2}{2z}.$$

Sostituendo i termini:

$$E_m = t \cdot E_{in}$$

$$E_r = r \cdot E_{in}$$

si ricava

$$r^2 + t^2 = 1.$$

Che sostituita nell'espressione del campo trasmesso da

$$E_t = A(1 - r^2)e^{i\theta\alpha} \sum_{n=0}^{n=h} r^{2n} e^{2ni\theta\alpha}$$

Che può essere scritto come

$$E_t = \frac{A(1 - r^2)e^{i\theta\alpha}}{1 - r^2 e^{2i\theta\alpha}}.$$

L'intensità iniziale del campo prima che il fascio entri nel F.P.I. è espressa da

$$I_0 = \frac{A^2}{2z}$$

mentre l'intensità del campo trasmesso, in uscita dal F.P.I. è espressa come

$$I_t = \frac{E_t^2}{2z}.$$

Sostituendo e sviluppando i calcoli si ottiene:

$$I_t = \frac{I_0(1 - r^2)^2 e^{2\alpha a}}{(1 - r^2 e^{2\alpha a})^2 + 4r^2 e^{2\alpha a} \sin^2(ka)}.$$

Nel caso particolare in cui  $\alpha=1$  si ottiene:

$$I_t = \frac{I_0}{1 + C \sin^2(ka)}.$$

Avendo posto  $C = \frac{4r^2}{(1 - r^2)^2}$ .

Come si può notare, in questa espressione l'intensità luminosa in uscita dal F.P.I. è una funzione periodica delle variabili:

- *lunghezza d'onda*,  $\lambda$ , attraverso il numero d'onda  $k$ ;

- distanza tra le facce della cavità.

Nel caso la distanza tra le facce venga mantenuta costante, l'interferometro prende il nome di *Etalon*. In questa configurazione viene utilizzato come filtro passa-banda, in genere a banda molto stretta, per lasciare passare solo determinate lunghezze d'onda, corrispondenti ai massimi della funzione  $I_t$ .

Quindi, dimensionando opportunamente la cavità, si ottiene un dispositivo che lascia passare solo la radiazione in una banda intorno al valore desiderato di  $\lambda$ .

Nel caso in cui invece si fissi il valore di  $\lambda$  utilizzando una sorgente monocromatica (laser), mentre la cavità può variare la sua dimensione, si ha un sensore F.P.I. Gli F.P.I. vengono definiti intrinseci o estrinseci a seconda che il mezzo costituente la cavità fra i due specchi sia la stessa fibra ottica oppure aria (Figura 5.7).

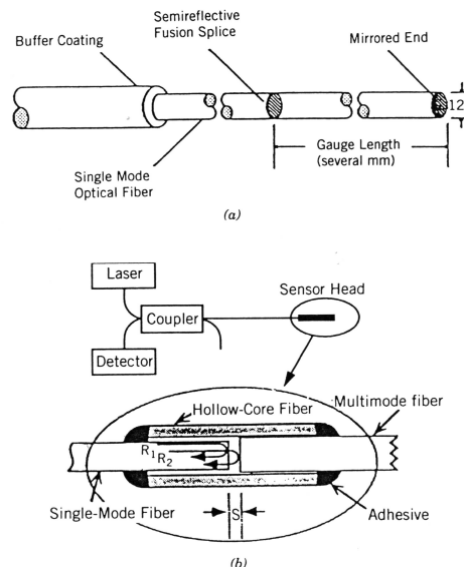


Figura 5.7 - Sensore di Fabry-Perot: (a) versione intrinseca, (b) versione estrinseca.

Per realizzare un sensore intrinseco, una fibra è tagliata in direzione perpendicolare al suo asse: le estremità così ottenute vengono pulite con metanolo e successivamente rivestite con un materiale dielettrico come il diossido di titanio,  $TiO_2$ , che è prodotto tramite deposizione di vapori e il cui spessore dello strato depositato è dell'ordine di  $0.1\mu m$ . Gli specchi interni realizzati con materiali dielettrici, infatti, hanno mostrato migliori proprietà meccaniche e perdite minori.

Successivamente le fibre vengono rifuse e lo specchio rimane all'interno della fibra; tutto il processo viene ripetuto per il secondo specchio, in modo da realizzare un etalon intrinseco. Il sensore estrinseco invece, viene realizzato inserendo due fibre, trattate come nel caso del sensore intrinseco all'interno di un tubo capillare in silice e fissandole a questo tramite resina epossidica.

In genere i sensori intrinseci vengono utilizzati per essere inseriti nelle strutture, mentre quelli estrinseci vengono prevalentemente applicati all'esterno.

## 5.d.ii Tecnica del Lost Foam

Il *lost foam* è una tecnica di fusione molto interessante che ha notevoli vantaggi rispetto ad altre tecniche e per questo è sempre più apprezzata specialmente nelle industrie.

Si è pensato di usare questa tecnica di fusione, per quanto riguarda la realizzazione del prototipo di sensore in fibra, perché questa tecnica permette di posizionare correttamente la fibra all'interno della matrice così da garantire un perfetto allineamento del sensore.

La caratteristica principale del processo di colata *lost foam* sta nell'uso di modelli in schiuma polimerica per la produzione del componente. Per poter fabbricare il getto metallico viene prodotto un modello in schiuma nella forma occorrente, mediante Injection Molding: il polimero maggiormente usato per questo processo è il polistirene espanso (EPS, Expandable PoliStyrene).

Negli anni recenti, altri polimeri come il polimetilmetacrilato (PMMA) e polialchilene carbonato (PAC) sono stati utilizzati per la produzione di colate ferrose.

Grazie a colle termo fusibili possono essere prodotte forme complesse combinando pezzi diversi del polimero.

Il modello in schiuma viene annegato in un pozzo di sabbia, dopo essere stato rivestito superficialmente da una melma refrattaria a base d'acqua, essenziale per una adeguata finitura superficiale. Il pozzo di sabbia viene compattato mediante vibrazioni meccaniche per garantire compattezza.

Il metallo fuso viene versato direttamente nel modello in schiuma per produrre il getto. Quando il metallo riempie lo stampo, il modello in schiuma subisce una degradazione termica (pirolisi), mediante una serie di reazioni complesse, ed i prodotti depolimerizzati vengono liberati nella sabbia, lasciando un perfetto duplicato in metallo nello stampo come si vede in figura 5.8.

I vantaggi forniti da questa tecnica sono molteplici in quanto risulta economicamente molto vantaggiosa e flessibile.

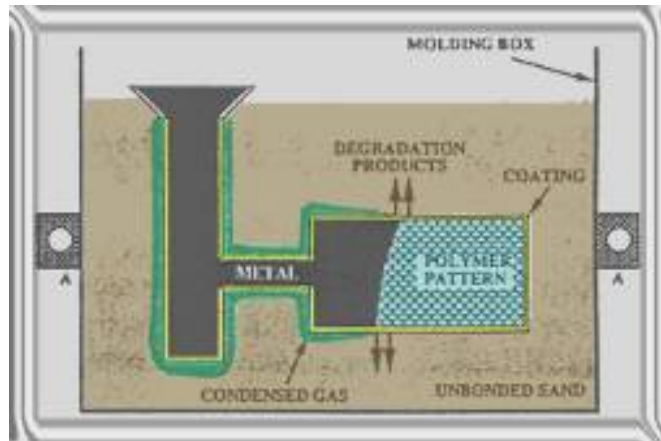


Figura 5.8 - Schema di una colata con il metodo Lost Foam

Durante il processo di fusione il fronte di metallo liquido avanza mentre il fronte del polimero che si ritira a causa del processo di pirolisi: in relazione alla velocità di evacuazione dei gas generatisi nello stampo, uno strato di gas può interporre fra i fronti del metallo e del polimero (Figura 5.9)

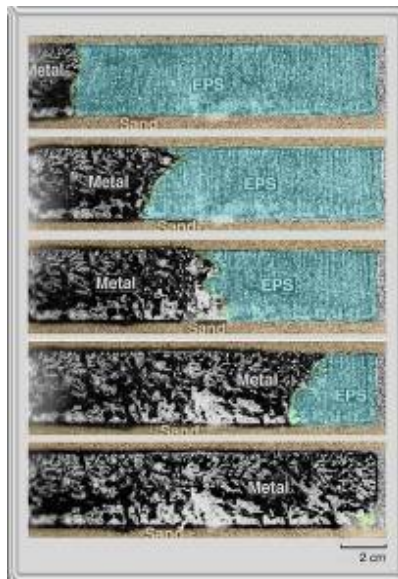


Figura 5.9 - Andamento degli stadi successivi di una colata con modello in EPS

Quando viene usato EPS per la produzione del getto si nota uno strato trascurabile di gas in fronte al metallo: a causa del movimento limitato, il metallo è pressoché in contatto diretto con il polimero. Di conseguenza, in questo caso, i gas che si formano sul fronte del metallo sono eliminati quasi istantaneamente nella sabbia.

Nel caso di colate ferrose può accadere che sia presente uno strato di gas più esteso dovuto alla frammentazione delle molecole del polimero a causa dell'alta temperatura (tipicamente maggiore di 1000 °C). Tali gas possono restare sul fronte fuso del metallo per un certo tempo prima di diffondere nel pozzo di sabbia, questo fattore influisce sulla velocità del flusso del metallo liquido che varia da 10 cm/s a 100 cm/s. Nella maggior parte dei casi, il flusso di metallo nella colata *lost foam* è essenzialmente laminare e presenta numeri di Reynolds che vanno da 400 a 3000. Inoltre il riempimento dei modelli può essere modificato dalla presenza di cavità all'interno del polimero.

I sistemi di alimentazione sono generalmente costruiti in polistirene e possono essere anche cavi, per minimizzare perdite di temperatura nel metallo. Per assicurare una distribuzione uniforme del metallo si possono adottare cavità interne e sistemi di alimentazioni con più bocche di carico, ma le velocità di flusso non sono limitate dalle dimensioni delle bocche, ma da quelle del fronte del metallo, che, a loro volta, sono governate dal complesso fenomeno ablativo che avviene all'interfaccia polimero/metallo.

La degradazione del polimero sul fronte del metallo si presenta come una reazione altamente endotermica e richiede energie maggiori di 1 kJ/g; a causa di queste perdite endotermiche sul fronte di metallo, si generano all'interno del getto forti gradienti termici.

Durante la formazione del getto, possono essere prodotti diversi gas organici e inorganici. Con modelli in EPS, si generano idrocarburi organici volatili come lo stirene, toluene, benzene, etilbenzene e gas inorganici come CO, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>.

Considerevoli sostanze contaminanti nelle colate di alluminio comprendono stirene e toluene mentre il monossido di carbonio è spesso usato come indice di rischio durante la colata ed il raffreddamento dei getti; nel processo *lost foam* se ne producono concentrazioni relativamente basse rispetto altri processi di colata in sabbia. Le caratteristiche di emissione sono determinate da parametri di processo, come il tipo di schiuma, di adesivo, di rivestimento, la temperatura del metallo, la procedura del versamento, il tempo di raffreddamento, il rapporto sabbia/metallo ed il metodo di estrazione.

Nelle prime colate preliminari sono stati realizzati dapprima modelli in polistirolo come in figura 5.10 e poi sono stati impiegati questi stessi modelli con la tecnica di fusione *lost foam*, ottenendo buoni risultati dal punto di vista metallografico, in quanto le sezioni dei provini erano prive di cavità e con una buona granulometria, meno buoni dal punto di vista della finitura superficiale in quanto non abbiamo potuto usare vernici adeguate con cui ricoprire il modello in polistirolo prima delle colate.



*Figura 5.10 - Esempi di modelli in polistirolo*

In seguito si sono anche ottenuti getti con fibre ottiche in silicio annegate in una matrice di alluminio con buone caratteristiche, mentre nella realizzazione di provini con fibre di zaffiro non si sono ottenuti i risultati voluti a causa dell'estrema fragilità di tali fibre alle sollecitazioni di taglio dovuti principalmente all'andamento estremamente turbolento della colata. Vista l'impossibilità di realizzare modelli in polistirolo con caratteristiche tali da evitare tali sollecitazioni si è deciso di abbandonare tale tecnica che comunque, disponendo degli adeguati strumenti, resta una valida alternativa alle classiche tecniche di colata.



*Figura 5.11 – Getto di alluminio realizzato con la tecnica del Lost Foam e sezione del getto dove si nota la discreta qualità della colata*



a)



b)



c)



d)



e)

*Figura 5.12 - a) preparazione del modello in polistirolo; b) inserimento della fibra ottica nel modello; c) getto finale; d) prove di trasmissione ottica; e) micrografia della sezione*



### 5.d.iii Fusione a colata

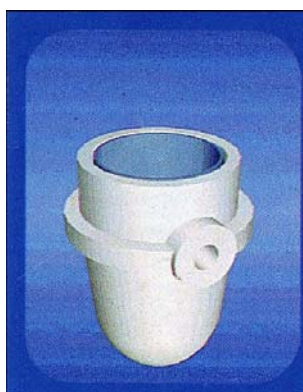
I provini in superlega sono stati ottenuti per colata centrifuga all'interno di uno stampo di grafite utilizzando, per la fusione, un forno ad induzione modello Manfredi "Neutor Digital".



*Figura 5.13 - Forno centrifugo ad induzione modello Manfredi "Neutor Digital" in dotazione nel laboratorio sperimentale del Dipartimento di Metallurgia dell'Università La Sapienza di Roma.*

In figura 5.13 si può osservare il pannello di controllo del forno, il pirometro ottico (disposto sul coperchio, a destra) ed il manometro (sul coperchio, a sinistra).

Il materiale solido è stato disposto all'interno di un crogiolo di grafite modello "Manfredi CG20" in figura 5.14; tale sistema di carico è inserito all'interno di un solenoide, che per effetto induttivo scalda la carica metallica e ne causa la fusione.



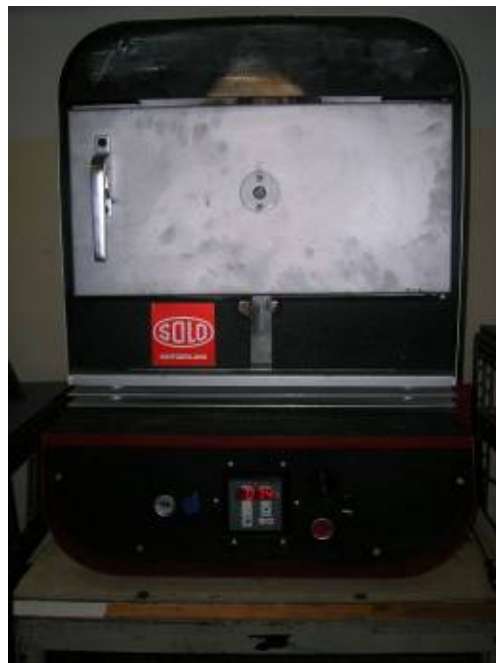
*Figura 5.14 - Crogiolo grafite modello "Manfredi CG20"*

Questo forno permetterebbe anche di lavorare in atmosfera controllata, priva di ossigeno ed umidità, tipicamente si usa gas inerte quale argon per evitare l'eventuale presenza di ossidi che possono peggiorare la qualità del processo di fusione.

Il dispositivo di colata si attiva una volta che la fusione è completa, il processo può essere seguito dall'esterno del forno, grazie alla presenza del pirometro ottico, che si attiva dagli 800 °C ai 2000 °C.

Svincolato il crogiolo dal solenoide si instaura un moto circolare uniforme e il metallo fuso risentendo di un'accelerazione centrifuga fuoriesce dal crogiolo per riempire lo stampo. Tale processo avviene tramite un foro passante sul crogiolo in comunicazione con lo stampo.

Per quanto riguarda i provini in alluminio e zinco, necessitando di una temperatura inferiore, si è potuto utilizzare la tecnica di fusione per colata diretta in uno stampo in grafite. Il forno usato, in figura 5.15, è il modello *Solo* che raggiunge una temperatura massima di 1200 °C



*Figura 5.15 - Forno induzione modello SOLO in dotazione nel laboratorio sperimentale del Dipartimento di Metallurgia dell'Università La Sapienza di Roma*

## 5.d.iv Caratterizzazione metallografica

La caratterizzazione metallografica consiste nell'analisi dei provini mediante osservazione ai microscopi ottico ed elettronico a scansione. Per effettuare queste osservazioni è necessario sezionare i provini ed osservarne le superfici tagliate, dopo che sono state perfettamente levigate e lucidate a specchio, in modo che la luce incidente nella radiazione del visibile possa essere appunto riflessa e mostrare in modo chiaro la microstruttura dei grani cristallini delle fasi costituenti; in particolare è stato fondamentale nell'ambito dei nostri provini caratterizzare l'interfaccia metallo/fibra.

Tutti i provini quindi sono stati soggetti quindi ad una prima fase di lucidatura metallografica: mediante carte abrasive di durezza adeguata al campione da trattare. E' necessaria una durezza abrasiva maggiore di quella del provino affinché venga impartita al provino stesso una deformazione.

Esistono tre metodi per rimuovere il materiale in eccesso: lappatura, prelevigatura e pulitura, elencati secondo la loro capacità di introdurre deformazioni.

La lappatura è un processo usato per materiali molto duri, quali i ceramici, in quanto il grado di rimozione del materiale è molto basso e le procedure sono lunghe. L'abrasivo è applicato tramite sospensione sulla superficie dura, i grani si muovono liberamente in tutte le direzioni e la scalfitura stacca dei frammenti dalla superficie del campione, inducendo deformazione.

Nella prelevigatura si usano carte di carburo di silicio (durezza 2500HV) che vengono supportate da un disco girevole di cui se ne controlla la velocità di rotazione al fine di produrre un effetto abrasivo con il provino a contatto con il disco in rotazione. Questo contatto genera una deformazione plastica che asporta materiale, allontanato da un fluido refrigerante, tipicamente acqua.

Per diminuire man mano la rugosità superficiale del provino ed ottenere un effetto levigante si usano sequenze standard di carte a granulometria decrescente.

L'ultimo stadio della lavorazione meccanica del provino prima delle osservazioni ai microscopi ottici ed elettronici consiste nella pulitura.

La pulitura, analogamente alla prelevigatura, sfrutta il potere abrasivo di un panno girevole di non elevata granulometria. I panni in genere sono carburo di silicio o allumina (2000HV) e alla fine di questo processo, adottando opportuni panni e fluidi lubrificanti, si ottiene una superficie a specchio.

I provini in esame sono stati prelevigati usando una serie di carte in carburo di silicio, con la seguente progressione: 180, 300, 500, 800, 1000, 1200, 2400. Successivamente la pulitura è stata effettuata con sospensioni acquose di allumina, aventi granulometria di 0,6  $\mu\text{m}$  e 0,05  $\mu\text{m}$ .

## 5.d.v Microscopia ottica

Questa tecnica di indagine permette di osservare la struttura dei materiali metallici e di evidenziarne la dimensione dei grani e la distribuzione delle varie fasi sulle sezioni del provino. Nel campo metallurgico la microscopia ottica viene detta microscopia metallografica e si pone come obiettivo la valutazione dell'eventuale presenza di difetti come inclusioni di ossidi, micro vuoti e cricche che possono sensibilmente alterare le caratteristiche meccaniche del metallo.

Questa tecnica di indagine è di tipo non distruttivo, anche se per eseguire l'osservazione è necessario sezionare il componente in esame (o parte di esso) e prepararne opportunamente la superficie con le tecniche descritte in precedenza.

I metalli per poter essere osservati al microscopio ottico, essendo opachi, necessitano di una particolare illuminazione tale per cui la luce che colpisce il campione sia riflessa dal campione stesso ed entri successivamente nell'obiettivo. Lo strumento descritto è appunto chiamato microscopio a riflessione. Come il microscopio standard anche questo microscopio dispone di un sistema di lenti, obiettivo ed oculare, che permettono di ottenere l'immagine con l'ingrandimento desiderato. Gli ingrandimenti usati variano da 50x per le strutture a grani molto fini e 1000x per grani grossolani, ma mediamente si usa un ingrandimento di 100-500x. Poiché i normali microscopi hanno un potere risolvante (cioè la minima distanza tra due punti distinguibili dell'oggetto) dell'ordine dei 1000Å e l'occhio umano riesce a distinguere due punti solo se distano più di 0.1 mm, non avrà senso salire oltre i 1000 ingrandimenti circa. Difatti in queste condizioni la minima distanza tra due punti distinguibili dal campione, cioè i 1000Å, diventerà pari a 0.1 mm. Inoltre la distanza massima tra due punti dell'oggetto misurata sul piano parallelo alla direzione di osservazione (profondità di campo) varia in modo inversamente proporzionale all'ingrandimento.

L'analisi dei campioni è avvenuta mediante lo stereomicroscopio Leica Wild M 10 in figura 5.16; questo è un microscopio a riflessione: presenta due oculari e quindi la possibilità di osservare campioni non planari e di apprezzare dettagli a varie

profondità. I campioni sono stati analizzati a vari ingrandimenti: 10x, 100x, 200x, 1000x.



*Figura 5.16 - Stereomicroscopio Leica Wild M 10 in dotazione presso il laboratorio sperimentale del Dipartimento di Metallurgia dell'Università "La Sapienza" di Roma*

## 5.d.vi Il sistema di interrogazione

Il sistema di interrogazione è formato da una stazione laser sorgente ed una ricevente. La sorgente laser è costituita da un diodo con lunghezza d'onda di 1550nm e il segnale viene inviato, attraverso la fibra, ad un fotodiodo che registra il segnale e ne fornisce una misura della perdita in dBmW.

Le connessioni, della stazione sorgente e di quella ricevente, al campione sono costituite da due bretelle ottiche monomodali (SMR 9/125 PC/PC-FC/PC).



Figura 5.18 - Sistema di connettorizzazione

Il sistema di interrogazione è stato messo a disposizione dai laboratori ENEA di Frascati. In figura 5.19 è riportato uno schema di tale sistema e in figura 5.20 una sua macrografia.

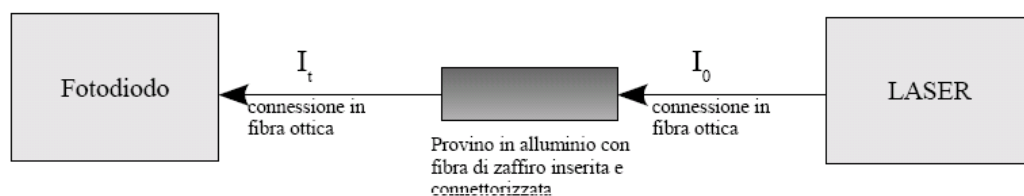


Figura 5.19 – Sistema di interrogazione



Figura 5.20 - Sistema di interrogazione: a destra il laser, a sinistra il fotodiodo (b).

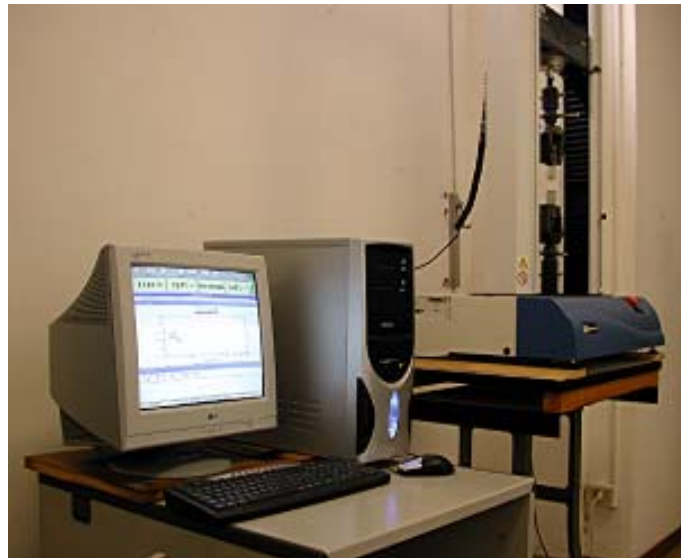


## 5.d.vii La macchina di trazione

I campioni sono stati sottoposti alla prova di trazione, usando la macchina INSTRON Serie IX 3360 mostrata in figura 5.21 in dotazione nel laboratorio sperimentale del Dipartimento di Metallurgia dell'Università La Sapienza di Roma. In figura 5.21b è raffigurato il setup sperimentale, costituito, oltre dalla macchina di trazione, dal sistema di acquisizione dati mediante software fornito dalla stessa casa costruttrice INSTRON. Il sistema di acquisizione fornisce dati sulla deformazione subita dal provino online: questi dati vengono confrontati con le misure ottiche fornite dal sistema di interrogazione.



(a)



(b)

*Figura 5.21 - (a) La macchina di trazione INSTRON, a sinistra; (b) Il setup sperimentale, a destra.*

## 5.d.ix.a Realizzazione Sensore: prime prove

In via preliminare è stato studiato l'inserimento di una fibra in matrice di una lega alluminio-magnesio. Il provino, in figura 5.22, è stato realizzato con la tecnica di fusione per colata diretta usando una fibra ottica di vetro.



*Figura 5.22 - Provino in alluminio all'interno della lingottiera*

La fibra utilizzata era del tipo ITU G.651 diametri nominali del core e del cladding rispettivamente di 50 e 125  $\mu\text{m}$ . Perfezionando la forma della lingottiera, con una opportuna scelta della geometria si è ottenuto un getto che ha reso possibile una ottima interfaccia matrice metallica-fibra e non ha intaccato le proprietà ottiche della fibra stessa; infatti la prova di trasmissione di luce ha dato esiti positivi.



*Figura 5.23 - Provini ottenuti dopo la lavorazione meccanica al tornio*

In figura 5.23 si vede la realizzazione di connettori per il sistema di interrogazione; mediante lavorazione meccanica al tornio.

Proprio a causa della complessità nella realizzazione del sistema di connettorizzazione, dopo il processo di fusione, si è deciso di abbandonare questo approccio.

È stata studiata, misurando l'attenuazione luminosa, la risposta di una fibra ottica multimodale ad una prova di trazione, al fine di evidenziare eventuali correlazioni fra deformazioni e attenuazione.

Per prima cosa si è connettorizzata alle due estremità la fibra ottica con delle ferule, in modo da poter collegare il tutto al sistema di interrogazione. In seguito, la fibra ottica è stata incollata sugli afferraggi della macchina di trazione, con una resina epossidica M-BOND AE-10 (figura 5.24a)

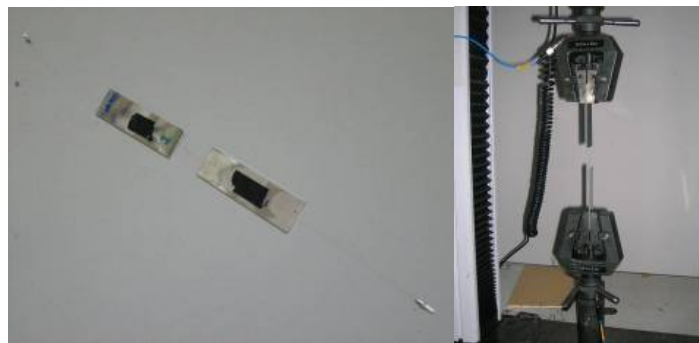


Figura 5.24 - a) fibra ottica connettorizzata e incollata sugli afferraggi; b) Prova di trazione

Come sorgente luminosa si è usato un laser infrarosso con una lunghezza d'onda  $\lambda = 1330$  nm: i risultati della prova di trazione si possono vedere nel seguente grafico (figura 5.25) dal quale si evince che la fibra ottica nuda risulta praticamente insensibile alle sollecitazioni meccaniche; si consideri che la prova di trazione è stata eseguita fino alla rottura della fibra.

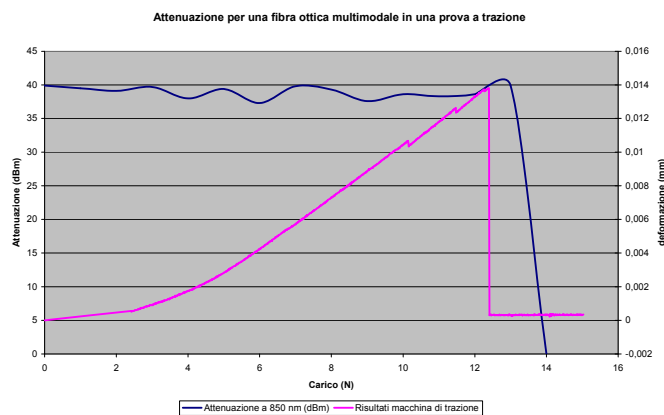


Figura 5.25 - Grafico della prova di trazione della fibra ottica multimodale

### 5.b.ix.b Realizzazione Sensore: fibra di zaffiro

Il sensore in fibra di zaffiro è stato realizzato con una colata in sorgente usando la lingottiera in grafite in figura 5.26. in quanto la tecnica *lost foam* generava stress meccanici all'interno della fibra con conseguenze rottura della fibra stessa.

Le dimensioni del provino sono una lunghezza di 10 cm e un diametro di 1 cm, adeguato alla misura degli afferraggi della macchina di trazione.



Figura 5.26 - Lingottiera in grafite

E' stata scelta una lega di zinco, ZAMAK3, che rispetto all'alluminio ha una migliore bagnabilità nei confronti delle fibre di zaffiro. Come si può notare nella figura 5.27 il provino risultante presenta una discreta finitura superficiale e la fibra ottica di zaffiro risulta correttamente annegata nella matrice metallica

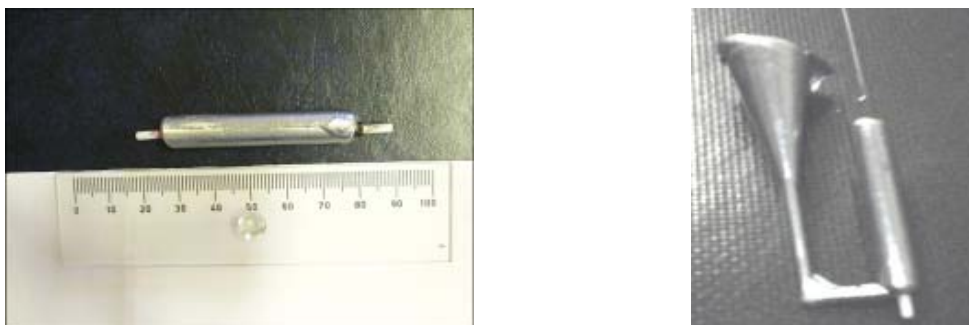


Figura 5.27 - Macrografia del provino subito dopo la colata.

Dopo aver correttamente lappato le superfici delle ferule per ottenere una connettorizzazione quanto più possibile efficace, sono state fatte delle prove di trasmissione della luce e prima di procedere con le prove di trazione è stata effettuata una misura dell'attenuazione con una sorgente laser infrarosso (lunghezza d'onda  $\lambda = 1330$  nm), dalla quale si è notato che l'attenuazione risultava essere pari a circa 52 dB/m.

### 5.d.ix.c Prova di trazione

Sono state effettuate diverse prove di trazione sul provino che hanno dato dei risultati abbastanza interessanti.



*Figura 5.28 - Particolare della prova di trazione*

La prova di trazione ha dimostrato che all'interno della matrice metallica la fibra ha subito alcuni stress in quanto la risposta alle sollecitazioni non era costante.

Dopo aver effettuato una prima prova di trazione si è evidenziato che all'interno del provino, la fibra di zaffiro, probabilmente a causa degli stress termici in fase di raffreddamento, ha subito una modificazione, e che la risposta alle sollecitazioni non era costante, come ci si aspettava, ma si aveva un andamento dell'attenuazione che seguiva quello del carico come si vede nella figura 5.29.

Prova di Trazione del provino in Zn con fibra ottica di Zaffiro

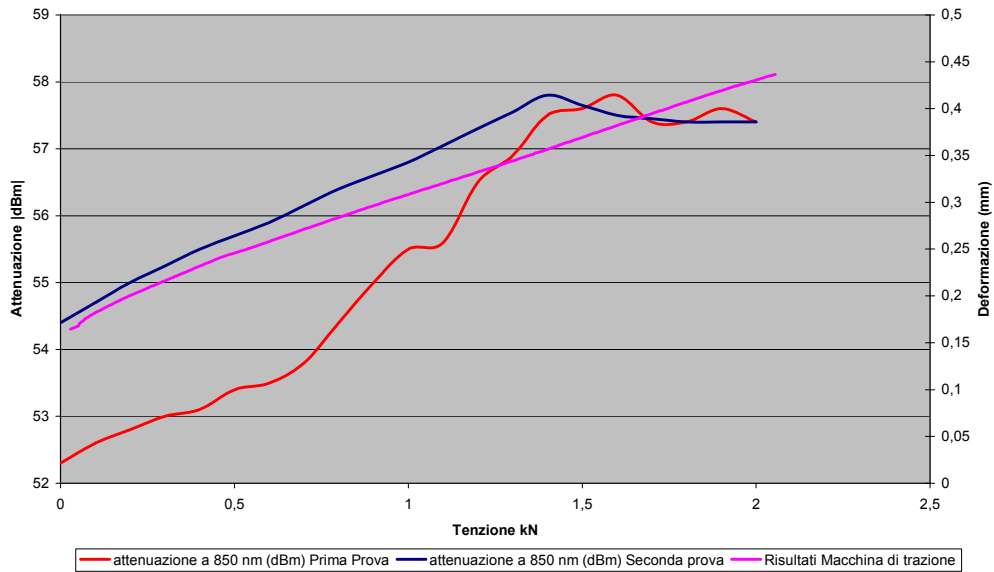
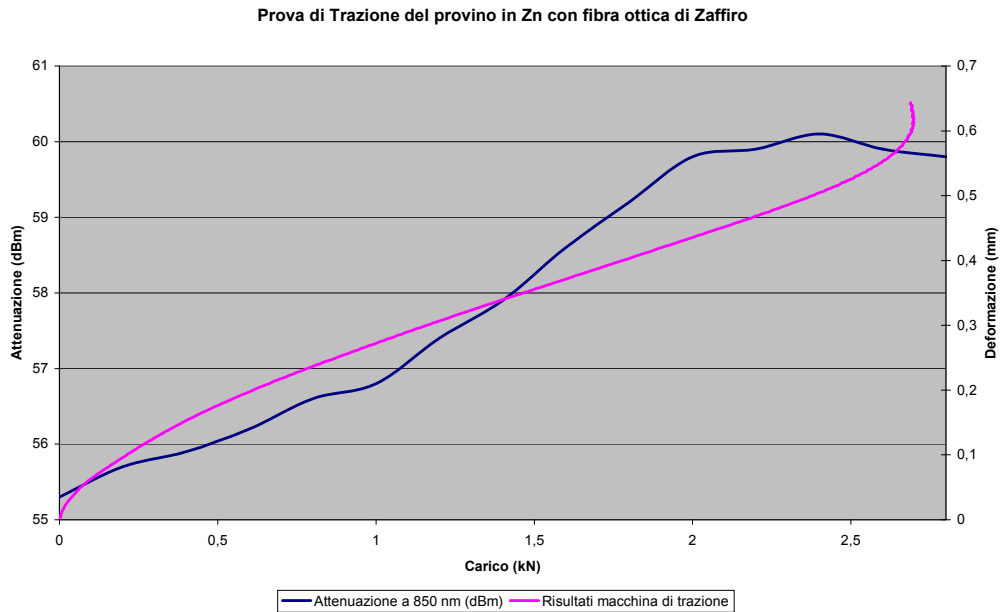


Figura 5.29 - Risultati della prima prova di trazione

La prova è stata poi ripetuta per verificare la replicabilità dei risultati: dal grafico si nota come per carichi superiori a 1,5KN l'attenuazione si stabilizza.

La spiegazione di ciò probabilmente consiste nel fatto che sulla fibra di zaffiro si sono create micro-cricche, nella fase di raffreddamento; in seguito la prova di trazione ha ulteriormente peggiorato lo stato delle cricche creando un interferometro di Fabry-Perot.

Una seconda serie di prove di trazione ha evidenziato uno strano comportamento del provino per tensioni superiori a 2 KN.



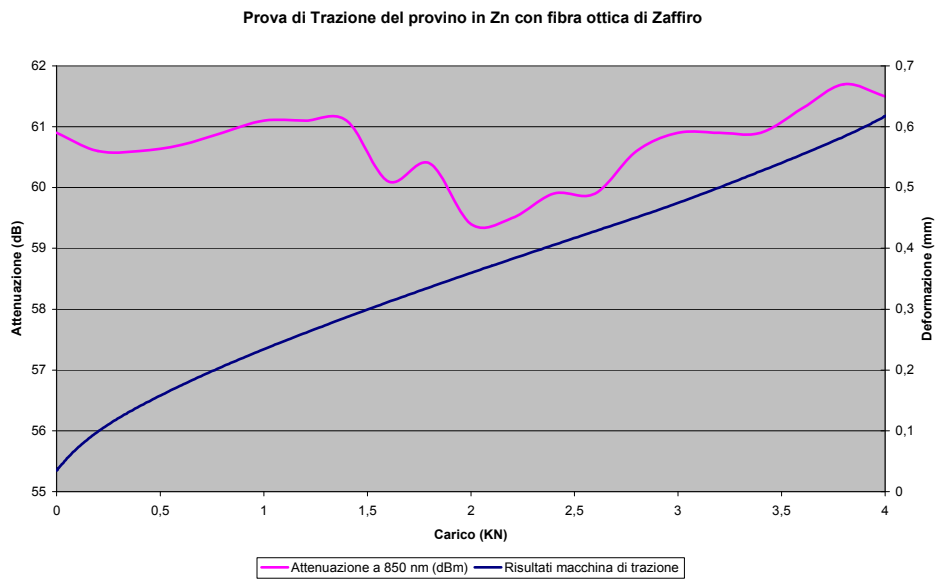
*Figura 5.30 - Prima prova di trazione con carichi superiori ai 2kN*

Durante la prima trazione, il provino, superati i 2,5kN, è stato soggetto ad uno scorrimento degli afferraggi che come si evidenzia nel grafico non ha permesso di continuare la misura, è stato comunque raggiunto un valore del carico pari a 31,83 MPa pari all'11,24 % del carico di rottura dello ZAMAK 3 (figura 5.30).

Nella seconda prova, l'attenuazione luminosa della fibra ottica rimaneva pressoché costante fino a circa 1,25 kN per poi riprendere a seguire l'andamento della curva Carico-Deformazione, questo sta ad indicare che il provino, sottoposto a carichi abbastanza elevati ha bisogno di un certo tempo prima di riportarsi nelle condizioni iniziali (figura 5.31). Dopo un periodo di riposo il provino riguadagnava i valori di attenuazione che aveva perso durante la prova: questo fenomeno è dovuto probabilmente al rilassamento dello zinco.

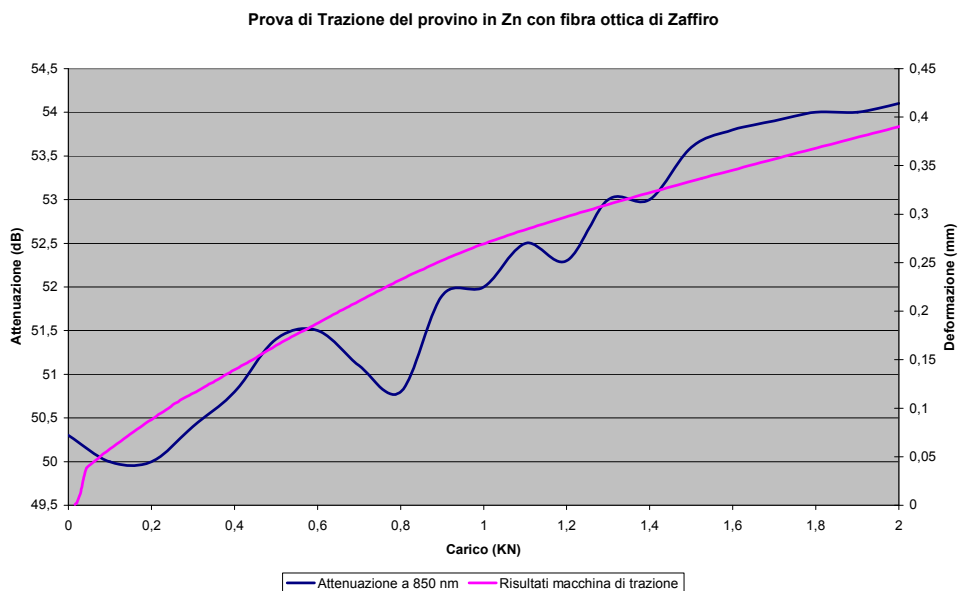
Sono state effettuate a distanza di tempo ulteriori prove che hanno permesso di verificare la possibilità di riutilizzare il provino.



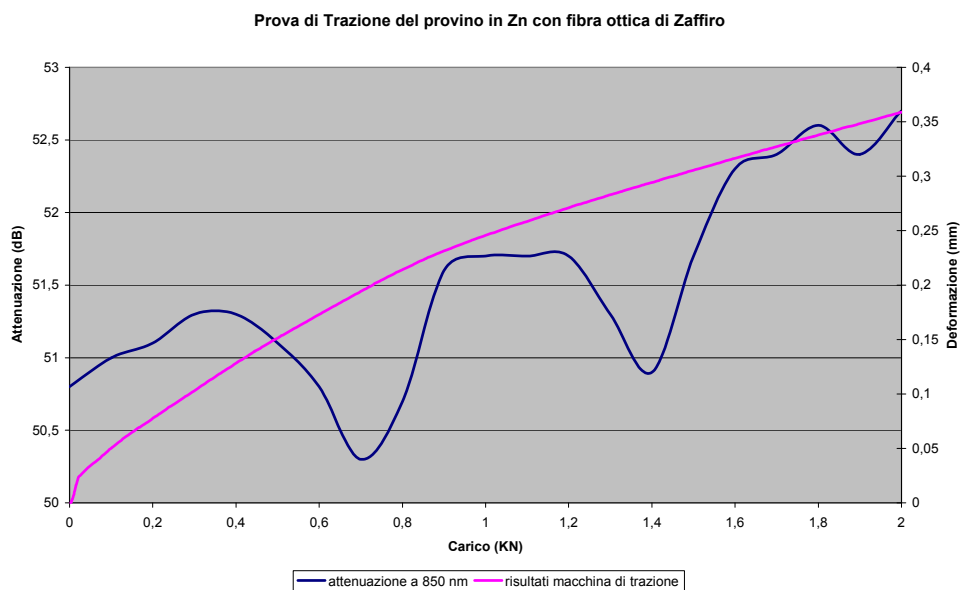


*Figura 5.31 - Seconda prova di trazione dove si evidenzia una perdita della corrispondenza fra deformazione ed attenuazione*

Nelle prove di trazione illustrate nelle figure 5.32 e 5.33 si nota come la misura dell'attenuazione luminosa presenta delle oscillazioni dovute probabilmente ai fenomeni di rilassamento descritti sopra e che l'apparato di misura risente dei disturbi ambientali, che purtroppo non è stato possibile filtrare.

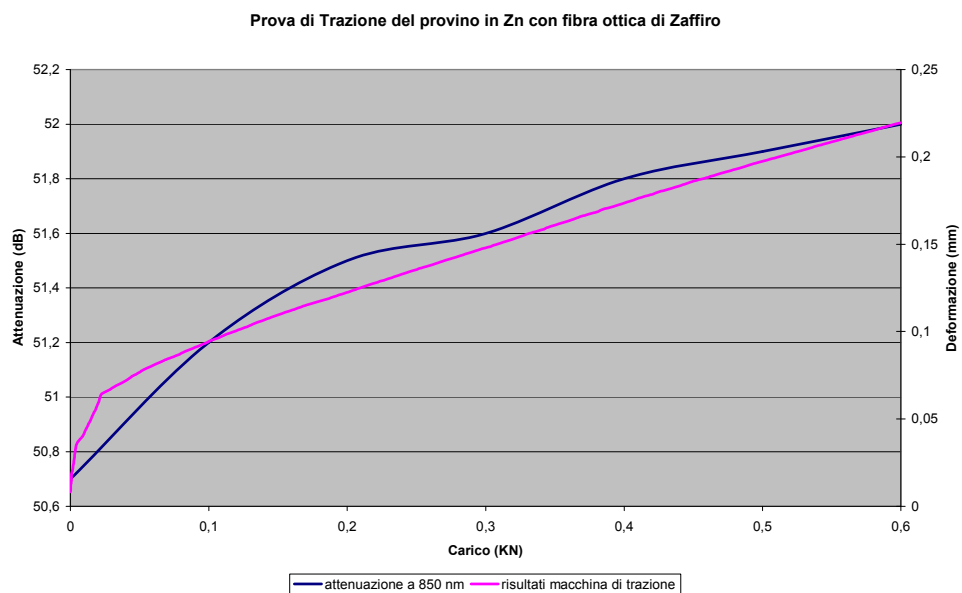


*Figura 5.32 - Prova di trazione nella quale si evidenziano delle oscillazioni nella misura dell'attenuazione luminosa*



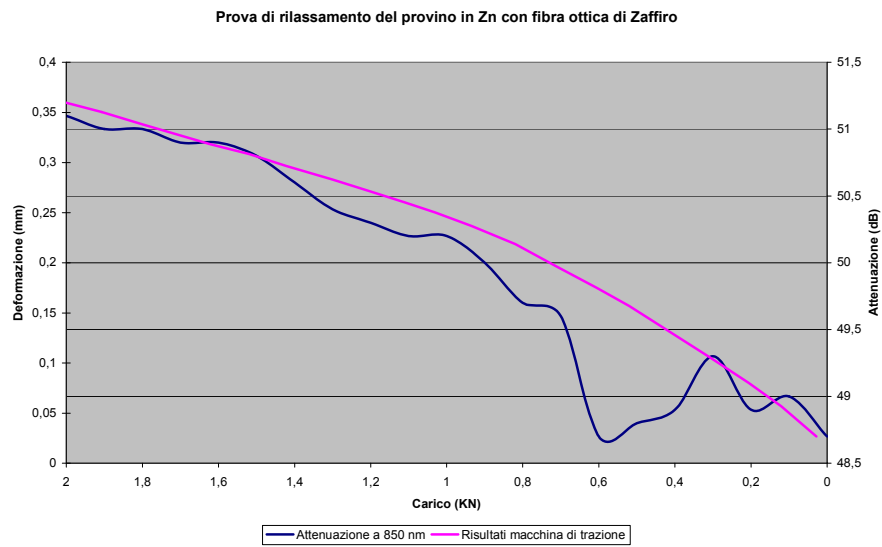
*Figura 5.33 - Prova di trazione affetta da notevoli disturbi nella misura dell'attenuazione luminosa*

Si è notato che il provino segue molto bene la curva Carico-Deformazione per carichi abbastanza contenuti (figura 5.34) e che nel range di tensioni comprese fra 0 e 0,6 kN l'attenuazione è praticamente insensibile ai disturbi sopra accennati.



*Figura 5.34 - Prova di trazione effettuata con carichi ridotti*

Per verificare se il provino era utilizzabile sia in trazione che in rilassamento è stata effettuata anche una prova di rilassamento (figura 5.35) che ha evidenziato come il provino fornisca una risposta accettabile anche in fase di rilassamento.



*Figura 5.35 - Prova di rilassamento del provino*

## 5.e Conclusioni

Lo sviluppo di un prototipo di sensore in fibra ottica è partito da precedenti lavori e tramite ulteriori sviluppi si è tentato di migliorare questa tecnologia facendo uso di fibre speciali, di zaffiro, per alte temperature. Sotto la spinta del fatto che tali sensori potrebbero rivoluzionare il monitoring di molte strutture, come palette statoriche di turbine o superfici esposte a rientro orbitale, si è appunto cercato con le tecnologie di cui dispone l'ambiente universitario di realizzare un provino dimostrativo del valore e della utilità di una tale applicazione.

Risolvendo i vari problemi che si presentavano nell'uso di tecniche innovative si è alla fine raggiunto lo scopo ed è stato interessante la caratterizzazione che abbiamo fatto sul provino al fine di testare il nostro processo di fabbricazione.

## Conclusioni

Il lavoro svolto in questa tesi ha esplorato alcuni case-studies che dimostrano come le innovazioni tecnologiche possano essere applicate alla ricerca di base avanzata, fornendo effettive soluzioni ad alcuni problemi aperti nell'esperimento CMS all'acceleratore LHC del CERN, uno dei maggiori esperimenti di fisica delle particelle elementari in operazione. Lo studio dei materiali ha consentito di sviluppare tecniche alternative per la caratterizzazione dei contaminanti nel rivelatore a gas per muoni a RPC. Lo sviluppo di sensori in fibra ottica è stato proposto come strumento per il moto posizionale del rivelatore di tracciamento a silicio.

Il candidato ha preso parte attivamente al programma di test sulla caratterizzazione dei filtri del gas dei rivelatori a RPC descritto nel capitolo 3, gestendo quotidianamente il sistema di test per un anno con permanenza al CERN grazie ad un contratto di Technical Student, raccogliendo e analizzando i risultati. Come prima e principale applicazione è stato realizzato un sistema di gas gain monitoring GGM, descritto nel capitolo 4, per il quale il candidato ha sviluppato strumenti e metodi, e analizzato risultati con originalità e autonomia.

I risultati ottenuti mostrano che il sistema di GGM è operativo, fornisce risultati sul monitoring del punto di lavoro con sensibilità progettuale, ed è impiegato attualmente al test sulla caratterizzazione dei filtri in corso all'ISR.

Tale monitoring viene seguito dal candidato sotto molteplici punti di vista, dalla manutenzione hardware all'integrazione software per l'esperimento CMS e come strumento di studio per il comportamento di camere RPC. Proprio a tal proposito è stato inoltre sviluppato, ed è in corso di applicazione, un software di modellizzazione basato su rete neurale che il candidato ha proposto e autonomamente sviluppato; intrinsecamente i rivelatori a muoni di CMS dipendono da svariate variabili in modo così complesso che modelli puramente teorici sono insufficienti a descrivere il comportamento di queste camere, un approccio euristico multivariato come è la rete neurale può semplificare la complessità della dipendenza dei parametri agenti sul sistema.

La seconda applicazione (descritta nel capitolo 5) ha riguardato lo sviluppo di sensori in fibra ottica per il monitoring posizionale del rivelatore tracker di CMS. Sono stati realizzati e caratterizzati prototipi di sensori proponendo ed applicando nuove soluzioni utilizzando la colata lost-foam e innovazioni di posizionamento della fibra all'interno della matrice metallica. Il monitoring sia posizionale che strutturale, in special modo se in ambienti ostili può fornire risposte molto importanti sullo stato di stress/deformazione di una struttura e può farlo in modo continuo e coerente. Data la rilevanza del lavoro svolto, una parte dei risultati originali prodotti sono stati dal candidato presentati a conferenze ref[39,40], ottenendo in qualche caso la pubblicazione ref[43,44] sulla rivista NIM e come preprint dei Laboratori Nazionali di fisica nucleari di Frascati.

## Bibliografia

### FIBRE OTTICHE

1. Gilberto Rinaldi, "*Materiali per l'ingegneria*", Ed. SIDEREA.
2. M. J. Donachie, S. J. Donachie, "*Superalloys: A Technical guide*" seconda edizione, Ed. ASM International.
3. J. R. Davis, Ed., "*Nickel, Cobalt, and Their Alloys*", ASM International, 2001.
4. M. Marchetti, F. Felli, "*Tecnologie aeronautiche*" Volume 1. materiali, Edizioni ESA.
5. William F. Smith, "*Scienza e tecnologia dei materiali*", Ed. McGraw-Hill.
6. R. Licheni, R. Orrù, G. Cao, J. De Wilde, I. Agote Beloki, D. J. Jarvis, L. Froyen, "*Sintesi autopropagante ad alta temperatura in condizioni di microgravità*", La Metallurgia Italiana, 7–8 (2003) pp.45-52.
7. Jeff Hecht, *Understanding Fiber Optics*, ed. PEARSON
8. Kapany, N. S. and Simms, R. J., "*Recent developments of infrared fiber optics*," Infrared Physics, vol. 5, pg. 69, 1965.
9. Harrington, J. A., "*Selected Papers on Infrared Fiber Optics, Milestone Series, Volume MS-9*," SPIE Press, Bellingham, WA, SPIE Press, Bellingham, WA, 1990.
10. Katsuyama, T. and Matsumura, H., "*Infrared Optical Fibers*", 1989.
11. Aggarwal, I. and Lu, G., "*Fluoride Glass Optical Fiber*", 1991.
12. France, P., Drexhage, M. G., Parker, J. M., Moore, M. W., Carter, S. F., and Wright, J. V., "*Fluoride Glass Optical Fibres*", 1990.
13. Sanghera, J. and Aggarwal, I., "*Infrared Fiber Optics*", 1998.
14. Kaiser, P., Hart, A. C. Jr., and Blyler, L. L., "*Low loss FEP-clad silica fibers*," Appl. Opt., vol. 14, pg. 156, 1975.
15. Nubling, R. and Harrington, J. A., "*Optical properties of single-crystal sapphire fibers*," Appl. Opt., vol. 36, pp. 5934-5940, 1997.

16. Artjushenko, V. G., Butvina, L. N., Vojtsekhovskiy, V. V., Dianov, E. M., and Kolesnikov, J.G., "*Mechanisms of optical losses in polycrystalline KRS-5 fibers*," J. Lightwave Tech., vol. LT-4, pp. 461-465, 1986.
17. Sa'ar, A., Moser, F., Akselrod, S., and Katzir, A., "*Infrared optical properties of polycrystalline silver halide fibers*," Appl. Phys. Lett., vol. 49, pp. 305-307, 1986.
18. Pinnow, D. A., Gentile, A. L., Standlee, A. G., Timper, A. J., and Hobrock, L. M., "*Polycrystalline fiber optical waveguides for infrared transmission*," Appl. Phys. Lett., vol. 33, pp. 28-29, 1978.
19. Artjushenko, V., Ionov, V., Kalaidjian, K. I., Kryukov, A. P., Kuzin, E. F., Lerman, A. A., Prokhorov, A. S., Stepanov, E. V., Bakhshpour, K., Moran, K. B., and Neuberger, W., "*Infrared fibers: power delivery and medical applications*," Proc. SPIE, vol. 2396, pp. 25-36, 1995.
20. Takahashi, K., Yoshida, N., and Yokota, M., "*Optical fibers for transmitting high-power CO<sub>2</sub> laser beam*," Sumitomo Electric Tech. Rev., vol. 23, pp. 203-210, 1984.
21. Jundt, D. H., Fejer, M. M., and Byer, R. L., "Characterization of single-crystal sapphire fibers for optical power delivery systems," Appl. Phys. Lett., vol. 55, pp. 2170-2172, 1989.
22. Chang, R. S. F., Phomsakha, V., and Djeu, N., "*Recent advances in sapphire fibers*," Proc. SPIE, vol. 2396, pp. 48-53, 1995.
23. D. J. Roth, "*Fabricating Sapphire Optical Fibers for High-Temperature Use*", [www.nasatech.com/tsp](http://www.nasatech.com/tsp).
24. P. C. Clark, J. Boriniski, M. Gunther e Steve Poland, '*Modern fibre optic sensor*', Smart Materials Bulletin, Giugno 2001
25. K. O. Hill e G. Meltz, '*Fiber Bragg Grating technology Fundamentals and Overview*', Journal of lightwave technology, vol. 15 , n. 8, pp.1263-1276.
26. R. Kashyap, BT Laboratories, Maetlesham Heath Isswich, United Kingdom '*Fiber Bragg Gratings*'
27. Y. Liu, "*Advanced fibre gratings and their application*," Ph.D. Thesis, Photonics Research Group, Aston University, Birmingham, 2001.



28. D. Grobnic, S. J. Mihailov, C. W. Smelser e H. Ding, "*Sapphire Fiber Bragg Grating Sensor Made Using Femtosecond Laser Radiation for Ultrahigh Temperature Applications*", IEEE photonic technology letters, vol. 16, n. 11, 2004, pp. 2505-2507
29. A. Wang, S. Gollapudi, R. G. May, K. A. Murphy e R. O. Claus, "*Sapphire optical fiberbased interferometer for high temperature environmental applications*", Smart Mater. Struct. 4 (1995), pp. 147-151
30. D. Grobnic, S. J. Mihailov, H. Ding, F. Bilodeau e C. W. Smelser, "*Single mode interrogation of a multimode sapphire fiber Bragg grating sensor with tapered fibers*", 17<sup>th</sup> International Conference on Optical Fibre Sensors, SPIE Vol. 5855, Bellingham, WA, 2005
31. A. D. Kersey, '*Distributed and multiplexed Fiber Optic Sensors*' in Fiber Optic Sensors : An introduction for Engineers and Scientist ( E. Udd ed.) Wiley ( Interscience )
32. F. Felli, L. Ippoliti, C. Lupi, A. Paolozzi, "*A proposal for using embedded sensors for health monitoring in thermal protection systems*", Atti del XVII Congresso Nazionale AIDAA, Roma, 15-18 Settembre 2003, pp. 845-853
33. M. Tatti, G. Sala e P. Mantegazza, "*Production and Use of an Interferometric Optical Strain Gauge with Comparison to Conventional Techniques*", Optics and Lasers in Engineering 27, 1997, pp. 269-284
34. X. C. Li, F. Prinz e J. Seim, "*Thermal behavior of a metal embedded fiber Bragg grating Sensor*", Smart Mater. Struct. 10 (2001), pp. 575-579
35. H. Asanuma, "*Formation of Sensitive Phases in Metal and Polymer Based Structural Materials for Health Monitoring*", Structural health monitoring, vol. 2(2), 2003, pp. 169-177
36. A. Paolozzi, F. Felli, T. Valente, M.A. Caponero, M. Tului, "*Preliminary tests for an intelligent thermal protection system for space vehicles*", SPIE's 2000 Symposium on Smart Materials and MEMS, Melbourne, 13-15 December 2000

37. Claudio Paris *“Test preliminari per la realizzazione di un sensore in fibra ottica per alte temperature e prove dinamiche con sensori FBG”* Tesi di Laurea A.A. 2004-2005, pp.86-89.
38. H. Asanuma, K. Kimura, H. Kurihara, J. Ohira e O. Haga, *‘Formation of Sensors by Breaking Optical Fibers in Structural Materials’*, JSME/ASME International Conference on Materials and Processing, Ottobre 2002

## TALKS CMS

39. S.Colafranceschi for the CMS RPC Collaboration IEEE 2008 Dresden – *“Gas monitoring system for CMS Experiment at LHC”*
40. S.Colafranceschi for the CMS RPC Collaboration SIF 2008 - XCIV National Congress of Italian society of physics: *“Gas purification studies and a gas gain monitoring system for the RPC muon detector of the CMS experiment at the CERN Large Hadron Collider”*
41. S.Colafranceschi (Gas Task Force May 2008) *“Work at ISR - Status Report”*
42. S.Colafranceschi (RPC Italia Nov 2007) *“Status report on Gas Gain Monitoring System”*

## PUBBLICAZIONI CMS

43. S. Colafranceschi, User Manual CAEN DAQ System: “DAQ for Gas Gain Monitoring System and postprocessing tools” preprint LNF – 08 / 21 (IR)
44. L.Benussi, S.Bianco , S.Colafranceschi , D.Colonna, L.Daniello, F.L.Fabbri, M.Giardoni, B.Ortenzi, A.Paolozzi, L.Passamonti, D.Pierluigi, B.Ponzio, C.Pucci, A.Russo, G.Roselli, A.Colaleo, F.Loddo, M.Maggi, A.Ranieri, M.Abbrescia, G.Iaselli , B.Marangelli, S.Natali, S.Nuzzo, G.Pugliese, F.Romano, R.Trentadue, S.Tupputi, R.Guida, G.Polese, N.Cavallo, A.Cimmino, D.Lomidze, P.Noli, P.Paolucci, D.Piccolo, C.Sciacca, P.Baesso, M.Necchi, D.Pagano, S.P.Ratti, P.Vitulo, C.Viviani, “The CMS RPC Gas Gain Monitoring System: an Overview and Preliminary Results” accepted by Nucl. Instr. And Methods (2008)
45. L. Benussi, S. Bianco, A. Brotzu, S. Colafranceschi, F.L. Fabbri, A.Paolozzi, C. Pucci, G. Saviano, M. Abbrescia, R. Guida. (2007). Materials studies for the CMS RPC Detector at the CERN Closed Loop. Frascati preprint LNF - 07 /22(P). October 23rd, 2007. (vol.LNF - 07 /22(P),pp 1-22
46. M. Abbrescia, A. Colaleo, R. Guida, G. Iaselli, R. Liuzzia, F. Loddo, M.Maggi, B. Marangelli, S. Natali, S. Nuzzo, G. Pugliese, A. Ranieri, F.Romano, R. Trentadue, L. Benussi, M. Bertani, S. Bianco, M.A.Caponero, D. Colonna, D. Donisi, F.L. Fabbri, F. Felli, M. Giardoni, B. Ortenzi, M.Pallotta, A. Paolozzi, L. Passamonti, B. Ponzio, C. Pucci, G. Saviano, G.Polese, I. Segoni, N. Cavallo, F. Fabozzi, P. Paolucci, D. Piccolo, C.Sciacca, G. Belli, A. Grelli, M. Necchi, S.P. Ratti, C. Riccardi, P. Torre, P.Vitulo. (2006). Proposal for a systematic study of the CERN Closed Loop gas system used by the RPC muon detector in CMS. (vol. LNF-06/27(IR),pp.1-12)
47. S.Bianco et al. Material studies for the cms rpc detector at the cern closed loop , CMS note in preparation, Frascati preprint LNF - 07 / 22(P)S.Bianco on behalf of the CMS RPC Collaboration, “The gas gain monitoring system

for the CMS RPC detector”, IEEE06, San Diego (USA)  
<http://arxiv.org/pdf/physics/0701014>.

48. C.Pucci “CMS RPC gas gain system”, Annual Congress of Italian Physical Society, Torino 2006
49. D.Colonna “Use of FBG sensors for high precision silicon detectors”, Annual Congress of Italian Physical Society, Torino 2006
50. M.Abbrescia et al., Proposal for a detailed study of Closed Loop... Frascati Preprint LNF 06/27 (IR) available at <http://www.lnf.infn.it/sis/preprint/>
51. M.Caponero et al., “On the use of FBG sensors in CMS” Siena conference on adv. Detectors Nov 2006 (to appear on NIM)
52. A.Paolozzi et al., “Performances of FBG sensors for application at LHC experiments”, Vienna conference Feb 2007 (to appear on NIM)
53. S.Bianco et al., Omega-Like Fiber Bragg Grating Sensors as Position Monitoring Device: A Possible Pixel Position Detector in CMS? Frascati preprint LNF- 06/13(NT)
54. L. Benussi et al. Primi Risultati DI Fluidodinamica (CFD) Gassosa in Rivelatori RPC Dell’ Esperimento CMS e Studio Sem-Eds dei Materiali in Presenza di Acido Fluoridrico

## BIBLIOGRAFIA RPC

55. Gas analysis and monitoring systems for the RPC detector of CMS at LHC. M. Abbrescia et al. LNF-06-34-P, LNF-04-25-P, Jan 2007. 9pp. Presented at 2006 IEEE Nuclear Science Symposium (NSS), Medical Imaging Conference (MIC) and 15th International Room Temperature Semiconductor Detector Workshop, San Diego, California, 29 Oct - 4 Nov 2006. e-Print: physics/0701014
56. SF6 quenched gas mixtures for streamer mode operation of RPCs at very low voltages. G. Aielli, P. Camarri, R. Cardarelli, A. Di Ciaccio, L. Di Stante, B. Liberti, A. Paoloni, E. Pastori, R. Santonico. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 493 (2002) 137–145
57. Production and quality control of the barrel RPC chambers of the CMS experiment. M. Abbrescia et al. 2006. 5pp. Prepared for 9th Topical Seminar on Innovative Particle and Radiation Detectors (Siena 2004), Siena, Italy, 23-26 May 2004. Published in Nucl.Phys.Proc.Suppl.150:290-294,2006. Also in Siena 2004, Innovative particle and radiation detectors 290-294
58. Study of long-term performance of CMS RPC under irradiation at the CERN GIF. M. Abbrescia et al. 2004. 5pp. Prepared for 7th Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors (RPC2003), Clermont-Ferrand, France, 20-22 Oct 2003. Published in Nucl.Instrum.Meth.A533:102-106,2004
59. First results on RB2 muon barrel RPC detector for CMS. M. Abbrescia et al. 2003. 5pp. Prepared for 6th Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors (RPC 2001), Coimbra, Portugal, 26-27 Nov 2001. Published in Nucl.Instrum.Meth.A508:142-146,2003.
60. The RPC system for the CMS experiment at the LHC. M. Abbrescia et al. 2003. 5pp. Prepared for 6th Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors (RPC 2001), Coimbra, Portugal, 26-27 Nov 2001. Published in Nucl.Instrum.Meth.A508:137-141,2003.

61. Resistive plate chamber neutron and gamma sensitivity measurement with a Cf-252 source. M. Abbrescia et al. 2003. 9pp. Published in Nucl.Instrum.Meth.A506:101-109,2003.
62. Neutron-induced single event upset on the RPC front-end chips for the CMS experiment. M. Abbrescia et al. 2002. Published in Nucl.Instrum.Meth.A484:494-502,2002.
63. RPC sensitivity to low energy neutrons and gamma-rays: Preliminary results. S.P. Ratti et al. Jul 2001. 5pp. Prepared for International Europhysics Conference on High-Energy Physics (HEP 2001), Budapest, Hungary, 12-18 Jul 2001. Published in Budapest 2001, High energy physics hep2001/268
64. Results from a complete simulation study of the RPC based muon trigger system for the CMS experiment. S. Altieri et al. 2001. Prepared for 8th Pisa Meeting on Advanced Detector: Frontier Detectors for Frontier Physics, La Biodola, Isola d'Elba, Italy, 21-25 May 2000. Published in Nucl.Instrum.Meth.A461:483-485,2001.
65. Simulation of Resistive Plate Chamber sensitivity to neutrons. S. Altieri et al. 2001. Prepared for 8th Pisa Meeting on Advanced Detector: Frontier Detectors for Frontier Physics, La Biodola, Isola d'Elba, Italy, 21-25 May 2000 Published in Nucl.Instrum.Meth.A461:57-59,2001.
66. New developments on front-end electronics for the CMS Resistive Plate Chambers. M. Abbrescia et al. 2000. Prepared for 5th Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors (RPC 99), Bari, Italy, 28-29 Oct 1999. Published in Nucl.Instrum.Meth.A456:143-149,2000.
67. Performance of the first RPC station prototype for the CMS barrel detector. M. Abbrescia et al. 2000. Prepared for 5th Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors (RPC 99), Bari, Italy, 28-29 Oct 1999. Published in Nucl.Instrum.Meth.A456:103-108,2000.
68. RPC gamma sensitivity simulation. S. Altieri et al. 2000. Prepared for 5th Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors (RPC 99),

- Bari, Italy, 28-29 Oct 1999. Published in Nucl.Instrum.Meth.A456:99-102,2000.
69. Resistive plate chamber performances at great altitudes. M. Abbrescia, E. Bisceglie, G. Iaselli, S. Natali, F. Romano (Bari U. & INFN, Bari) . 1995. Prepared for 3rd International Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors (RPC 95), Pavia, Italy, 11-12 Oct 1995. In Pavia 1995, Resistive plate chambers and related detectors 245-255
  70. Track resolution in the RPC chamber. R. Cardarelli, G. Aielli, P. Camarri, A. Di Ciaccio, B. Liberti, R. Santonico (INFN, Rome2 & Rome U.,Tor Vergata) . 2007. 3pp. Prepared for 10th Pisa Meeting on Advanced Detectors: Frontier Detectors for Frontier Physics, La Biodola, Elba, Italy, 21-27 May 2006. Published in Nucl.Instrum.Meth.A572:170-172,2007.
  71. Improving track resolution in the RPC chamber. R. Cardarelli, G. Aielli, P. Camarri, A. Di Ciaccio, B. Liberti, R. Santonico (Rome U.,Tor Vergata & INFN, Rome2) . 2006. 5pp. Prepared for 8th Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors, Seoul, Korea, 10-12 Oct 2005. Published in Nucl.Phys.Proc.Suppl.158:25-29,2006. Also in Seoul 2005, Resistive plate chambers and related detectors 25-29
  72. The RPC first level muon trigger in the barrel of the ATLAS experiment.G. Aielli et al. 2006. 5pp. Prepared for 8th Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors, Seoul, Korea, 10-12 Oct 2005. Published in Nucl.Phys.Proc.Suppl.158:11-15,2006. Also in Seoul 2005, Resistive plate chambers and related detectors 11-15
  73. RPC present status and perspectives in imaging. R. Santonico (Rome U.,Tor Vergata & INFN, Rome2) . 2006. 4pp. Prepared for 8th Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors, Seoul, Korea, 10-12 Oct 2005. Published in Nucl.Phys.Proc.Suppl.158:5-8,2006. Also in Seoul 2005, Resistive plate chambers and related detectors 5-8
  74. The RPC LVL1 trigger system of the muon spectrometer of the ATLAS experiment at LHC. G. Aielli et al. 2004. 9pp. Prepared for 13th IEEE -

- NPSS Real Time Conference (RT 2003), Montreal, Canada, 18-23 May 2003. Published in IEEE Trans.Nucl.Sci.51:1581-1589,2004.
75. High-voltage test for the ATLAS RPC qualification. G. Aielli, P. Camarri, R. Cardarelli, A. Di Ciaccio, A. Di Simone, B. Liberti, R. Santonico (INFN, Rome & Rome U.,Tor Vergata) . 2004. 4pp. Prepared for 7th Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors (RPC2003), Clermont-Ferrand, France, 20-22 Oct 2003. Published in Nucl.Instrum.Meth.A533:199-202,2004.
  76. Test and performances of the RPC trigger chambers of the ATLAS experiment at LHC. G. Aielli et al. 2004. 6pp. Prepared for 7th Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors (RPC2003), Clermont-Ferrand, France, 20-22 Oct 2003. Published in Nucl.Instrum.Meth.A533:193-198,2004.
  77. RPC understanding and future perspectives. R. Santonico (INFN, Rome & Rome U.,Tor Vergata) . 2004. 6pp. Prepared for 7th Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors (RPC2003), Clermont-Ferrand, France, 20-22 Oct 2003. Published in Nucl.Instrum.Meth.A533:1-6,2004.
  78. Resistive plate chambers. Proceedings, 7th International Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors, RPC 2003, Clermont-Ferrand, France, October 20-22, 2003. P. Dupieux, (ed.) (Clermont-Ferrand U.) , R. Santonico, (ed.) (Rome U.,Tor Vergata & INFN, Rome) , E. Vercellin, (ed.) (Turin U. & INFN, Turin) . 2004. 238pp. Prepared for 7th Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors (RPC2003), Clermont-Ferrand, France, 20-22 Oct 2003. Published in Nucl. Instrum. Methods A533 (2004) 1-238
  79. Resistive plate chambers and related detectors. Proceedings, 6<sup>th</sup> International Workshop, RPC 2001, Coimbra, Portugal, November 26-27, 2001. P. Fonte, (ed.) (LIP, Coimbra) , M. Fraga, (ed.) (Coimbra Inst. Sup. Eng. & Coimbra U.) , S.P. Ratti, (ed.) (Bari U.) , R. Santonico, (ed.) (Rome U.,Tor Vergata & INFN, Rome) . 2003. 209pp. Prepared for 6th Workshop



- on Resistive Plate Chambers and Related Detectors (RPC 2001), Coimbra, Portugal, 26-27 Nov 2001. Published in Nucl. Instrum. Methods A508 (2003) 1-209
80. RPC operation at high temperature. G. Aielli, P. Camarri, R. Cardarelli, A. Di Ciaccio, L. Di Stante, B. Liberti, A. Paoloni, E. Pastori, R. Santonico (Rome U., Tor Vergata & INFN, Rome) . 2003. 6pp. Prepared for 6th Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors (RPC 2001), Coimbra, Portugal, 26-27 Nov 2001. Published in Nucl.Instrum.Meth.A508:44-49,2003.
  81. RPC ageing studies. G. Aielli, P. Camarri, R. Cardarelli, R. de Asmundis, A. Di Ciaccio, L. Di Stante, B. Liberti, A. Paoloni, E. Pastori, R. Santonico (Rome U., Tor Vergata & INFN, Rome) . 2002. Prepared for Vienna Conference on Instrumentation, Vienna, Austria, 19-23 Feb 2001. Published in Nucl.Instrum.Meth.A478:271-276,2002.
  82. Results from the analysis of data collected with a 50-m\*\*2 RPC carpet at YangBaJing. C. Bacci et al. 2000. Prepared for 5th Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors (RPC 99), Bari, Italy, 28-29 Oct 1999. Published in Nucl.Instrum.Meth.A456:121-125,2000.
  83. An RPC gamma irradiation test. G. Aielli, P. Camarri, R. Cardarelli, A. Di Ciaccio, L. Di Stante, B. Liberti, A. Paoloni, R. Santonico (INFN, Rome & Rome U., Tor Vergata) . 2000. Prepared for 5th Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors (RPC 99), Bari, Italy, 28-29 Oct 1999. Published in Nucl.Instrum.Meth.A456:82-86,2000.
  84. Performance of a large-size RPC equipped with the final ATLAS front end electronics at X5-GIF irradiation facility. G. Aielli et al. 2000. Prepared for 5th Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors (RPC 99), Bari, Italy, 28-29 Oct 1999. Published in Nucl.Instrum.Meth.A456:77-81,2000.
  85. Response uniformity of a large size RPC. G. Aielli, P. Camarri, R. Cardarelli, A. Di Ciaccio, L. Di Stante, B. Liberti, A. Paoloni, R. Santonico (Rome U., Tor Vergata & INFN, Rome) . 2000. Prepared for 5th Workshop

- on Resistive Plate Chambers and Related Detectors (RPC 99), Bari, Italy, 28-29 Oct 1999. Published in Nucl.Instrum.Meth.A456:40-45,2000.
86. RPC: Where we are and where we are going. R. Santonico (Rome U.,Tor Vergata & INFN, Rome) . 2000. Prepared for 5th Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors (RPC 99), Bari, Italy, 28-29 Oct 1999. Published in Nucl.Instrum.Meth.A456:1-5,2000.
  87. The use of RPC in the ARGO-YBJ project. By ARGO Collaboration (C. Bacci et al.). 1999. Prepared for 6th International Conference on Advanced Technology and Particle Physics, Villa Olmo, Italy, 5-9 Oct 1998. Published in Nucl.Phys.Proc.Suppl.78:38-43,1999.
  88. High altitude test of RPCs for the Argo-YBJ experiment. By ARGO-YBJ Collaboration (C. Bacci et al.). Sep 1999. 17pp. Published in Nucl.Instrum.Meth.A443:351-363,2000. e-Print: hep-ex/9909034
  89. Detector Physics of Resistive Plate Chambers. Christian Lippmann (CERN, Geneva), Werner Riegler (CERN, Geneva)
  90. RPC front end electronics for the ATLAS LVL1 trigger detector. G. Aielli (INFN, Rome & Rome U.) , P. Camarri, R. Cardarelli, V. Chiostrri, A. Di Ciaccio, L. Di Stante, G. Orengo, R. Santonico (Rome U.,Tor Vergata) . 1998. Prepared for 7th Pisa Meeting on Advanced Detectors: Frontier Detectors for Frontier Physics, La Biodola, Isola d'Elba, Italy, 25-31 May 1997. Published in Nucl.Instrum.Meth.A409:291-293,1998.
  91. Rejection power of a horizontal RPC telescope for left and right coming cosmic muons. By MINI Collaboration (M. Iacovacci et al.). 1992. Prepared for 4th International Symposium on Neutrino Telescopes, Venice, Italy, 10-13 Mar 1992. In Venice 1992, Neutrino telescopes 337-347.
  92. Study of the efficiency and time resolution of an RPC irradiated with photons and neutrons. L. Acitelli et al. 1995. Prepared for 6th Pisa Meeting on Advanced Detectors: Frontier Detectors for Frontier Physics, La Biodola, Elba, Italy, 22-28 May 1994. Published in Nucl.Instrum.Meth.A360:42-47,1995.

93. Test of a resistive plate chamber under irradiation of photons and neutrons.  
M. Angelone, M. Pillon (Frascati) , F. Lacava, L. Pontecorvo, S. Veneziano (Rome U. & INFN, Rome) , L. Acitelli, A. Di Ciaccio, R. Cardarelli, R. Santonico (Rome U.,Tor Vergata) , F. Ceradini (Rome III U.) . 1995.  
Published in Nucl.Instrum.Meth.A355:399-405,1995.
94. RPC: Status and perspectives. R. Santonico (Rome U.,Tor Vergata) .  
1994. In Pavia 1993, Proceedings, The resistive plate chambers in particle physics and astrophysics 1-11
95. Performance of a resistive plate chamber operating with pure CF-3 - Br. R. Cardarelli, A. Di Ciaccio, R. Santonico (Rome U.,Tor Vergata) . 1993.  
Published in Nucl.Instrum.Meth.A333:399-403,1993.
96. Rejection power of a horizontal RPC telescope for left and right coming cosmic muons. By MINI Collaboration (F. D'Aquino et al.). INFN-AE-92-18,  
Jun 1992. 13pp. Published in Nucl.Instrum.Meth.A324:330-336,1993.
97. Scienza per tutti: <http://scienzaper tutti.inf.infn.it>
98. CERN: [www.cern.ch](http://www.cern.ch)
99. CMS Experiment <http://cms.cern.ch/>

## Ringraziamenti

Desidero ringraziare tutte le persone che mi hanno aiutato prima durante e dopo questo lavoro. A partire dall'ambiente universitario dove il professor Paolozzi ed il professor Felli mi hanno dato modo di iniziare questo lavoro in un ambiente proficuo e molto stimolante; in seguito al professor Iaselli e al dott. Bianco che mi ha seguito costantemente e aiutato in molti momenti critici e per la passione trasmessa nella ricerca, insieme a tutto il gruppo di lavoro di Frascati: Franco Fabbri, Luigi Benussi, Daniele Pierluigi, Alessandro Russo, Luciano Passamonti, Bruno Ponzio, Bruno Ortenzi, Giovanna Saviano e Mauro Ferrini. Grazie agli insegnamenti preziosi di tutto il gruppo sono riuscito ad integrarmi nel complesso ambiente del CERN dove ho trovato un gruppo ugualmente stimolante e una supervisor che mi ha dato massima fiducia e molti incoraggiamenti sin dall'inizio: Archana Sharma, che ringrazio anche per tutte le grandi opportunità che mi ha dato e mi sta dando. Nel gruppo di lavoro CERN ringrazio inoltre Nadeesha Mahnohari, Tamhoor, Ahzad, Ian, Marcello, Giovanni ed Anna per l'ottimo feeling e reciproca stima.

Inoltre devo ringraziare la mia famiglia dove ho ricevuto gran parte dell'insegnamento che mi ha permesso di imparare e andare avanti.

Da ultimo ma forse più importante di tutti sono stati i miei amici che nonostante la distanza dopo anni di vita insieme mi sono sempre stati vicini, un ringraziamento e un ricordo speciale iniziando da tutti i miei compagni del liceo ma in modo particolare, Valentina quasi una sorella maggiore, Laura la mia storica compagna di banco, Valerio, Francesco, Benedetto per le speculazioni filosofiche fine a loro stesse complice il professor Antonio Rainone che ringrazio per l'apertura mentale, la fantasia e l'originalità che ci ha lasciato, Giammarco Patrizio, Ciccio per la loro simpatia, Emanuele per il reciproco aiuto se pur in campi della conoscenza molto diversi e per la comune passione per la musica e Matteo per tutti gli anni di infanzia trascorsi insieme; al coro di Santa Maria della Visitazione: Valeria sempre vicina nei momenti belli e brutti, Nando e Michela per tutti gli anni e le esperienze di vita insieme, Massimiliano e Isabella appena sposi ma non ancora mentre

scrivo, Carmela, Adele, Adriana, Claudia, Francesca, Daniela, Lidia, Arianna e Federica, Alessandro, Simone e Catia, Francesco, Maddalena, Mariarosa, Simone, Annalisa, Mariacleofe, Nicola, Piera, Maddalena, Emilio e Raffaele (per le tantissime serate particolari), e tra le tante persone con cui ho suonato conservo un'indimenticabile ricordo di Fabrizio, Gianni e Cristina Francesca, insieme ai quali abbiamo fatto grandi cose di cui porto un ricordo eccezionale, e Don Don per l'insegnamento di vita che ci ha dato; Benedetta, Sara e Roberta e i nostri bambini che per anni abbiamo fatto cantare; al gruppo del lunedì, ed ai collaboratori di Energia per i diritti umani Futuro Aperto: Federica, Mara, Alessandra, Francesca dove abbiamo creduto e crediamo ancora di costruire un mondo migliore.

Ringrazio tantissimo tutta la famiglia Caruso: Assunta, Patrizia, Vito, Maria e Leonardo e tutti i cugini e gli zii per il supporto che mi hanno dato a Ginevra e per l'affetto con cui mi hanno accolto, indubbiamente senza l'apporto di questa famiglia speciale la vita in svizzera sarebbe stata molto dura, invece grazie a loro ho potuto trovare un'atmosfera casalinga accogliente.

Un ringraziamento lontano fino in Slovacchia a Sefka e Joseph con i quali ho condiviso momenti di preghiera speciali e nonostante la lontananza restiamo molto vicini con i nostri spiriti.

Un ringraziamento simpatico a Vale, Giammarco e Carmen, che sono stati miei alunni fino al mio trasferimento in Svizzera, li ringrazio perché grazie a loro ho imparato ad insegnare, e auguro loro di concludere presto gli studi.

E per finire un abbraccio ai miei compagni di università più cari dove è incominciato tutto quanto, Rosalba, Lorenzo, Mario, Roberto, Michela e Francesca perché avendo iniziato questa avventura insieme e avendo preso strade molto diverse siamo rimasti tutti vicini come i primi anni di università.. che già stiamo rimpiangendo...