

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI
BOLOGNA

SCUOLA DI SCIENZE
Corso di Laurea in Fisica

**Caratterizzazione dei
fotomoltiplicatori per il luminometro
LUCID dell'esperimento ATLAS
presso il Large Hadron Collider**

Relatore:
Chiar.mo Prof.
Antonio Zoccoli
Correlatore:
Dott.ssa
Carla Sbarra

Presentata da:
Marco Dalla

Sessione Estiva
Anno Accademico 2013 / 2014

Introduzione

Dal 2013 il Large Hadron Collider (*LHC*) e i suoi quattro esperimenti non prendono dati (fase di shut down) per effettuare operazioni di consolidamento e manutenzione. L'acceleratore riprenderà a funzionare nel 2015 con maggiore energia e luminosità di prima. Lo shut-down verrà anche sfruttato per migliorare le prestazioni dei sottorivelatori dei diversi esperimenti in modo da renderli più adatti alle condizioni di presa dati del 2015. Per il rivelatore LUCID che misura la luminosità dell'esperimento ATLAS, in particolare, saranno sostituiti i sensori principali (i fotomoltiplicatori) e l'elettronica. È necessario, prima dell'installazione, qualificare i nuovi sensori, e determinarne il punto di lavoro ottimale. Sono stati acquistati 50 nuovi fotomoltiplicatori modello Hamamatsu R760 dei quali 32 saranno montati in LUCID. La qualificazione e la determinazione del punto di lavoro sarà effettuata in base alle misure che saranno eseguite su questi sensori, tra cui la determinazione della Dark Current e della dipendenza del guadagno dalla tensione di alimentazione. Per effettuare tali misure presso il Dipartimento di Fisica dell'Università di Bologna è stato usato un alimentatore a quattro canali e un picoammperometro ad un solo ingresso. Con tale strumentazione il tempo necessario per effettuare manualmente le misure in programma sarebbe stato molto elevato. Per questo motivo è stato sviluppato, come obiettivo di questa tesi, un sistema che automatizza questa procedura e minimizza l'intervento umano. Il sistema è stato realizzato utilizzando il software LabView in modo da interfacciare gli strumenti disponibili a un personal computer. Grazie a questo apparato sono stati quindi qualificati i primi 18 fotomoltiplicatori del

rivelatore LUCID.

Indice

Introduzione	i
1 LHC	1
1.1 Il Large Hadron Collider (LHC)	1
1.2 L'esperimento ATLAS	3
2 LUCID e la misura della luminosità	5
2.1 Luminosità	5
2.2 LUCID	6
2.2.1 Prestazioni di LUCID 2010-2012	7
2.2.2 Invecchiamento dei fotomoltiplicatori	8
2.2.3 LUCID dopo il 2015	9
3 I Fotomoltiplicatori	11
3.1 Funzionamento	11
3.2 Struttura	11
3.3 Parametri Caratteristici	12
3.4 I nuovi fotomoltiplicatori di LUCID	15
4 Qualificazione dei fotomoltiplicatori	19
4.1 Scopo della Misura	19
4.2 Setup Sperimentale	20
4.2.1 Strumentazione	20
4.3 Software	22

4.3.1	Controllo dell'alimentatore	23
4.3.2	Controllo del picoamperometro	25
4.3.3	Programma per l'automatizzazione delle misure in funzione della tensione di alimentazione	26
5	Analisi dei dati	29
5.1	Dark Current	29
5.2	Guadagno Relativo	31
	Conclusioni	38
A	Appendice 1: Codice sorgente LabView	39
	Bibliografia	45

Capitolo 1

LHC

In questo primo capitolo verranno descritti brevemente la macchina LHC e l'esperimento ATLAS.

1.1 Il Large Hadron Collider (LHC)

Il Large Hadron Collider è il più grande acceleratore di particelle esistente al mondo. Ha una circonferenza di 27 km ed è situato nel sottosuolo al confine tra la Svizzera e la Francia. È stato costruito nel tunnel precedentemente usato dal LEP (*Large Electron-Positron Collider*), a circa 100 metri di profondità, e al suo interno sono accelerati protoni o ioni di piombo. Negli anni 2010-2012 LHC ha funzionato a energia ridotta, 7 o 8 TeV nel centro di massa per le collisioni tra protoni, ed è al momento in una fase di consolidamento che durerà fino al 2015, quando si raggiungerà l'energia di progetto di 14 TeV. Lo scopo di queste collisioni è ricreare condizioni di densità di energia simili a quelle dei primi istanti dell'universo, anche se per una ridottissima frazione di tempo e di spazio. In queste condizioni si possono materializzare tutte le particelle con massa non superiore all'energia disponibile, e quindi studiare i costituenti della materia e le particelle che esistevano in abbondanza all'inizio dell'universo, tra cui ad esempio il bosone di Higgs.

La formazione dei fasci di protoni comincia con l'inserimento di idrogeno

gassoso all'interno di un tubo cilindrico in cui è applicato un forte campo elettrico in grado di ionizzare il gas. I protoni così ottenuti vengono accelerati in più fasi: prima in un acceleratore lineare dove acquisiscono un'energia di 50 MeV, in seguito negli acceleratori circolari Proton Synchrotron (PS) e Super Proton Synchrotron (SPS), dove incrementano la loro energia fino a 450 GeV. Infine, sono immessi nell'anello di LHC dove raggiungono l'energia delle collisioni. Il sistema di accelerazione fa sì che i fasci non siano continui, bensì organizzati in pacchetti o *bunches* di particelle. Dentro LHC i fasci circolano in direzioni opposte, in condizioni vicinissime al vuoto (10^{-10} torr), e sono mantenuti su traiettorie circolari grazie a un campo magnetico di 8,3 T generato da 1232 magneti di dipolo, e focalizzati da 392 magneti di quadrupolo. I magneti funzionano in regime di superconduttività e vengono mantenuti ad una temperatura di 2 K grazie a elio superfluido. Una volta raggiunta l'energia desiderata i fasci vengono fatti collidere in quattro zone precise, attorno alle quali sono stati costruiti quattro grandi apparati sperimentali: ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus), CMS (Compact Muon Solenoid), ALICE (A Large Ion Collider Experiment) e LHCb.

- **ATLAS**: come CMS, è un rivelatore *multi-purpose*, atto a ricercare sia il Bosone di Higgs, sia altre particelle previste da modelli di nuova fisica, come quello supersimmetrico, o la materia oscura. Inoltre, è anche idoneo per misure di precisione dei parametri del modello standard.
- **CMS**: Simile ad Atlas ma utilizza tecnologie differenti.
- **ALICE**: principalemnte dedicato allo studio delle collisioni tra ioni pesanti, dove ci si aspetta la formazione dello stato della materia denominato quark-gluon plasma.
- **LHCb**: ha come scopi principali lo studio del quark b e la ricerca dell'origine dell'asimmetria materia-antimateria.

1.2 L'esperimento ATLAS

L'esperimento Atlas è situato presso uno dei punti di interazione di LHC. L'apparato avvolge quasi completamente il punto di interazione, è di struttura cilindrica con diametro di circa 22 metri e lunghezza di 44 metri, e ha una massa di 7000 tonnellate. È formato dalle seguenti componenti:

- **Rivelatore Interno o Inner Detector (ID):** è il rivelatore più vicino al tubo a vuoto (*beam pipe*) dove circolano i protoni. Il suo scopo è quello di ricostruire le tracce delle particelle cariche e misurarne le caratteristiche (momento, momento trasverso e vertice). È immerso in un campo magnetico solenoidale di 2 T necessario per la misura dell'impulso. Partendo dal centro e proseguendo verso l'esterno, l'ID è costituito da tre piani di rivelatori a pixel, quattro piani di rivelatori a strip e un rivelatore a radiazione di transizione. Le particelle cariche ionizzano questi rivelatori rilasciando segnali ben localizzati che permettono la ricostruzione della loro traiettoria; la curvatura della traiettoria permette inoltre di misurarne l'impulso. Le particelle neutre, come i fotoni e i neutroni, non vengono misurate direttamente.
- **Calorimetro elettromagnetico:** ideato per misurare l'energia di elettroni e fotoni, è costituito da argon liquido racchiuso fra strati successivi di elettrodi di Kapton disposti a fisarmonica e strati di piombo. I fotoni e gli elettroni sono completamente assorbiti: si tratta dunque un rivelatore distruttivo.
- **Calorimetro adronico:** sfrutta grandi masse metalliche per rivelare le particelle che interagiscono fortemente. La sezione centrale (*Barrel Hadronic Tile*) usa strati di ferro come materiale assorbitore e strati di scintillatore come materiale sensibile, i tappi laterali, (*Hadronic End Cap*) fanno uso di assorbitori di rame, e la sezione in avanti (*Hadronic Forward*) fa uso di moduli di rame e tungsteno. Anche questo rivelatore assorbe gli adroni per misurarne l'energia.

- **Spettrometro a Muoni:** i sottorivelatori più esterni di ATLAS sono dedicati al tracciamento dei muoni di alta energia ($E_\mu \geq 3$ GeV) che sono le uniche particelle prodotte dalle collisioni protone-protone (pp) a non essere assorbite negli strati precedenti. Le camere sono immerse in un campo magnetico toroidale, e disposte nello spazio in modo tale che un muone proveniente dal punto di interazione attraversi almeno tre strati.
- **Monitor di Luminosità:** sono due i principali strumenti dedicati a misurare la luminosità nell'esperimento ATLAS:
 - **LUCID:** Luminosity measurement Using Cherenkov Integrating Detector, è il luminometro dedicato di ATLAS. È composto da due moduli, posti attorno al tubo a vuoto a 17 metri dal punto di interazione dei fasci, ed è descritto nel paragrafo 2.2.
 - **BCM:** Beam Condition Monitor, è composto da due sezioni, ciascuna posta a 184 cm dal punto di interazione. Ciascuna sezione è composta da quattro sensori al diamante disposti a croce attorno alla beam pipe. Nonostante il suo scopo principale sia la protezione dell'ID che potrebbe essere danneggiato da una cattiva focalizzazione dei fasci, la sua elettronica veloce permette di sfruttarlo anche come monitor di luminosità.

Capitolo 2

LUCID e la misura della luminosità

2.1 Luminosità

La luminosità è una caratteristica di qualunque acceleratore, e non dipende dal tipo di processo che si verifica nella collisione, ma soltanto dal numero di particelle contenute nei fasci e dalla loro focalizzazione. Si possono definire una luminosità istantanea (L) e una integrata (\mathcal{L}) su una quantità di tempo. La luminosità istantanea è definita come rate (R) di eventi per unità di sezione d'urto σ , cioè:

$$L = \frac{R}{\sigma} \quad (2.1)$$

ed è esprimibile in $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

In un acceleratore ad anello si può definire L anche come:

$$L = \frac{f_r \cdot \mu \cdot n_b}{\sigma} \quad (2.2)$$

con f_r frequenza di rivoluzione del fascio, μ numero medio di interazioni per collisione tra pacchetti (*bunch crossing*), n_b numero di pacchetti e σ sezione d'urto totale. La luminosità integrata si ottiene dall'istantanea integrando

rispetto al tempo. È possibile esprimerla anche nel modo seguente:

$$\mathcal{L} = f_r n_b I_1 I_2 \int \rho_1(x, y) \rho_2(x, y) dx dy \quad (2.3)$$

dove I rappresenta l'intensità dei fasci, ρ le densità di particelle rispetto alla superficie perpendicolare ai fasci e dx , dy sono gli elementi infinitesimi di superficie. Questa definizione è usata nelle calibrazioni dei monitor di luminosità con il metodo di Van Der Mer.

Una misura accurata della luminosità è fondamentale per misurare sperimentalmente la sezione d'urto di ogni processo.

La misura della luminosità può essere bunch per bunch, oppure integrata sul fascio. Di norma si misura bunch per bunch, ma integrata su un Lumiblock (LB), cioè un intervallo di tempo (dell'ordine di un minuto a LHC) all'interno del quale si assume sia costante. Una misura della luminosità bunch per bunch è anche utile per la gestione e l'ottimizzazione del fascio. Ad LHC, vista la ridotta spaziatura fra i bunch stessi (25 o 50 ns) si richiede elettronica molto veloce.

2.2 LUCID

Il rivelatore utilizzato nella prima fase di funzionamento di LHC consisteva di due moduli, ciascuno composto da 20 tubi di alluminio immersi in un radiatore e accoppiati a dei fotomoltiplicatori (*PMT*). La disposizione dei tubi era a cono attorno alla beam pipe, in modo da puntare verso il centro d'interazione. Il radiatore era un gas ad alto indice di rifrazione (C_4F_{10}) in cui, in seguito al passaggio di particelle cariche, si producono fotoni per effetto Cherenkov. I fotoni erano riflessi dalle pareti dei tubi sino a raggiungere i *PMT* che li convertivano in segnali elettrici. Dal 2015 il LUCID sarà modificato eliminando i tubi e il gas in cui erano immersi. In effetti, già dal 2011 il gas era stato eliminato in modo che l'unico effetto Cherenkov fosse

prodotto dalle particelle cariche che attraversavano la finestra di quarzo dei fotomoltiplicatori.

Ad ogni collisione tra pacchetti, i segnali provenienti dai PMT sono discriminati e, se sopra soglia, sono definiti *hits*. Particolari configurazioni di hits sono poi utilizzate per definire diversi tipi di *eventi* (per esempio, almeno un hit in almeno uno dei moduli, o in entrambi i moduli, etc). Dal numero di hit o di eventi si possono ricavare quantità proporzionali alla luminosità utilizzando la statistica di Poisson. Lo strumento non fornisce comunque una misura di luminosità assoluta e deve quindi essere calibrato con un metodo esterno, come ad esempio il metodo di *Van Der Meer*.

2.2.1 Prestazioni di LUCID 2010-2012

Nell'anno 2010 LUCID è stato il luminometro di riferimento per ATLAS, in quanto il più sensibile alla luminosità relativamente bassa a cui operava LHC. La luminosità istantanea massima raggiunta in questa fase è stata di $2.1 \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Nel 2011, in seguito a un considerevole aumento della luminosità istantanea, alcuni effetti sistematici che prima erano trascurabili hanno cominciato a determinare conseguenze apprezzabili sulla luminosità misurata da LUCID. Le cause di errore sistematico sono state individuate in:

- Effetti di migrazione: aumentando il numero medio di interazioni per bunch crossing può avvenire che alcuni segnali sotto soglia si combinino creando un segnale sopra soglia, producendo un falso positivo.
- Perdita di linearità dei PMT: l'aumento eccessivo della corrente anodica può causare un accumulo di carica negativa sull'ultimo dinodo, creando un effetto di schermatura e rendendo il guadagno dei PMT non più lineare rispetto alla corrente del fotocatodo.
- Saturazione: gli algoritmi utilizzati per il conteggio degli eventi saturano se ad ogni bunch crossing le condizioni che definiscono l'evento sono soddisfatte (per esempio, la presenza di almeno una hit).

Dal 2011 il rivelatore BCM, meno influenzato dagli effetti sistematici discussi sopra, è stato preferito a LUCID per la determinazione del valore centrale della luminosità di ATLAS nelle interazioni pp . Inoltre sono state apportate alcune modifiche a LUCID in modo da limitare al massimo gli effetti sopra citati:

- I tubi sono stati vuotati dal gas. In questo modo l'unico materiale responsabile dell'effetto Cherenkov è la finestra di quarzo dei PMT. Questo ha contribuito a ridurre sia l'effetto di migrazione, che la corrente nella catena dinodica.
- Sono stati aggiunti dei *boosters*, cioè degli elementi che applicano una tensione opportuna dinodo per dinodo anziché tra anodo e catodo, in modo da ripristinare la linearità del dispositivo anche a correnti elevate.

Con tali accorgimenti la differenza tra la luminosità misurata dal LUCID e BCM non ha superato l'1%.

2.2.2 Invecchiamento dei fotomoltiplicatori

I fotomoltiplicatori usati nella prima fase di LHC hanno generato una corrente dello stesso ordine di grandezza di quella ritenuta massima. Anche se i PMT non hanno mostrato sostanziali segni di deterioramento, non è possibile prolungare il loro uso nel triennio 2015-2018.

Anche a parità di luminosità, la maggiore energia dei fasci prevista dal 2015 determinerà un aumento della sezione d'urto pp e, quindi, del numero di interazioni per bunch crossing, del numero di particelle che attraversano la finestra del PMT e, in definitiva, della corrente anodica degli stessi. In realtà sarà anche aumentato il numero dei bunches che circolano, il numero di protoni per bunch e il loro focheggiamento, da cui ci si aspetta un numero di interazioni per collisioni più elevato rispetto alla fase I, anche a parità di energia.

Tutti questi fattori amplificano i problemi di invecchiamento dei PMT e di saturazione degli algoritmi, a parità di accettazione e guadagno dei PMT stessi.

2.2.3 LUCID dopo il 2015

I problemi elencati nel paragrafo precedente hanno portato a un nuovo design per il LUCID da utilizzare dal 2015, sia per quanto riguarda la scelta dei sensori (PMT) che l'elettronica di lettura degli stessi. Le principali novità sono:

- Progettazione, realizzazione e installazione di nuove schede di elettronica per la digitalizzazione dei segnali dei PMT vicino ai PMT stessi. I segnali digitalizzati saranno immediatamente utilizzati per misurare la carica generata ogni 25 ns o, equivalentemente, ogni bunch crossing. In questo modo oltre ad utilizzare le hit e gli eventi, nuovi algoritmi basati sulla carica, e quindi non interessati dalla sistematica della migrazione, potranno essere implementati per il calcolo della luminosità di ogni bunch.
- Sostituzione dei PMT: Sono stati scelti dei fotomoltiplicatori più piccoli di quelli utilizzati precedentemente, in modo da ridurre l'accettazione e limitare la saturazione degli algoritmi standard. La tensione di lavoro, e dunque il guadagno, sarà notevolmente inferiore, anche grazie alla nuova elettronica, riducendo considerevolmente i problemi legati alla corrente totale generata e, quindi, all'invecchiamento.

Capitolo 3

I Fotomoltiplicatori

3.1 Funzionamento

Un fotomoltiplicatore è uno strumento di misura adatto a rivelare i fotoni appartenenti a uno spettro di poco più ampio di quello del visibile, convertendoli in impulsi elettrici. I fotoni che incidono su un'apposita finestra generano, per effetto fotoelettrico, dei cosiddetti fotoelettroni che sono poi convogliati su un elettrodo mediante un campo elettrico. Il segnale è amplificato dal dispositivo stesso grazie alla presenza di una catena di dinodi tra cui è presente una certa differenza di potenziale. La corrente generata è sufficiente per essere misurata con un picoamperometro.

3.2 Struttura

Un fotomoltiplicatore è composto da un tubo a vuoto con una finestra di ingresso trasparente, un fotocatodo, un elettrodo di raccolta, una catena di dinodi a cui è applicata una differenza di potenziale e un anodo da cui viene raccolta la corrente in uscita. Gli elettroni emessi dal fotocatodo collidono con la serie di dinodi posti all'interno del tubo estraendo via via una quantità maggiore di elettroni secondari e intensificando la corrente raccolta

all'anodo. In seguito vengono descritti in modo più approfondito i principali componenti:

- **Finestra d'ingresso:** è la prima componente del fotomoltiplicatore che viene incontrata dai fotoni incidenti. Poiché deve essere trasparente rispetto alla lunghezza d'onda dei fotoni incidenti, il materiale di cui è fatta determina il limite inferiore della lunghezza d'onda di luce rilevabile. Tra i materiali più utilizzati ci sono il vetro borosilicato, trasmettente fino a 300 nm, e il quarzo, che trasmette fino a 180 nm. Il primo tipo di materiale non è utilizzabile in ambiente altamente radioattivo, mentre il secondo è più resistente, motivo per cui è stato scelto per LUCID.
- **Fotocatodo:** è il componente responsabile dell'emissione di elettroni per effetto fotoelettrico. Deve avere una bassa energia di estrazione in modo da poter produrre cariche libere anche in presenza di fotoni poco energetici. Il materiale di cui è composto determina il limite superiore della lunghezza d'onda dei fotoni rilevabili. I materiali più diffusi sono bialcali con energie di estrazione di pochi eV e sensibili fino a circa 630 nm.
- **Dinodi:** I componenti necessari all'amplificazione della corrente di fotoelettroni emessa dal fotocatodo. Gli elettroni sono accelerati in modo che quando giungono sul dinodo successivo siano abbastanza energetici da estrarre dei secondari dal dinodo stesso. In questo modo si producono cascate di elettroni secondari progressivamente più numerose. All'interno di un fotomoltiplicatore ci sono normalmente tra gli 8 e 12 dinodi disposti in modo da massimizzare l'efficienza di raccolta.

3.3 Parametri Caratteristici

I parametri che maggiormente caratterizzano un fotomoltiplicatore sono i seguenti:

- **Guadagno:** è definito come il rapporto tra la corrente in uscita dall'anodo e la corrente fotoelettrica proveniente dal fotocatodo. Assumendo che la differenza di potenziale tra ciascuna coppia di dinodi sia costante, detto δ il numero medio di elettroni secondari prodotti da ogni elettrone nella collisione su un dinodo e n il numero di dinodi, si può scrivere il guadagno G come $G = \delta^n$. Il parametro δ dipende dalla tensione applicata al PMT come:

$$\delta = A \cdot \Delta V^\beta \quad (3.1)$$

con A costante, ΔV la tensione fra ciascuna coppia di dinodi e β un coefficiente che dipende dal materiale con cui sono costruiti e dalla loro geometria. Di solito β ha un valore compreso tra 0.7 e 0.8. Il numero di dinodi varia tra 8 e 12 e, a seconda della tensione applicata, si possono raggiungere guadagni fino a 10^8 . Se la differenza di potenziale ΔV tra ogni coppia di dinodi è costante, la tensione di lavoro V si esprime come $V = n \Delta V$ e il guadagno G può essere descritto come:

$$G = (A \cdot \Delta V^\beta)^n = \left[A \cdot \left(\frac{V}{n} \right)^\beta \right]^n = K \cdot V^{\beta n} = KV^\alpha \quad (3.2)$$

con K costante e α un parametro che chiameremo guadagno relativo, e che è importante conoscere per poter stimare la tensione di lavoro corrispondente al guadagno scelto.

- **Risposta spettrale:** è la dipendenza della corrente anodica dalla lunghezza d'onda dei fotoni incidenti.
- **Dark Current (DC):** è la quantità di corrente che attraversa il fotomoltiplicatore anche in assenza di luce incidente. È un parametro molto importante poiché determina la minima quantità di luce rilevabile da un PMT. Le sue cause principali sono:
 - Emissione termoionica: emissione di elettroni da parte del fotocatodo a temperatura ambiente, a causa della bassa energia di

estrazione. A parità di temperatura, l'effetto aumenta esponenzialmente con la tensione applicata.

- Perdite ohmiche: dovute ad un isolamento imperfetto della base del tubo a vuoto, sono rilevanti a bassa tensione e temperatura.
 - Scintillazione del vetro: è possibile che gli elettroni che sfuggono alla catena di moltiplicazione provochino scintillazione colpendo la parete di vetro del tubo a vuoto e, di conseguenza, producano rumore.
 - Attivazione del materiale: i materiali componenti il fototubo, in particolare l'alluminio, possono attivarsi producendo rumore.
 - Ionizzazione del gas residuo: se il tubo non è perfettamente a vuoto, parte del gas rimanente può essere ionizzato dal flusso di elettroni, producendo i cosiddetti *afterpulses*, cioè degli impulsi elettrici in ritardo rispetto al segnale principale.
- **Tempo di risposta:** Se la luce incidente è di tipo pulsato, il segnale in uscita dall'anodo dovrebbe essere in grado di riprodurre la forma d'onda del segnale entrante. Questa riproducibilità dipende dal tempo di risposta dell'impulso all'anodo, cioè il tempo di formazione del segnale prelevato dal fotocatodo. La risoluzione sul tempo di risposta determina la minima separazione temporale tra due segnali successivi affinché il PMT sia in grado di vederli separatamente.
 - **Linearità:** è necessario determinare le condizioni di lavoro entro le quali si può considerare lineare la corrente in uscita rispetto all'intensità della luce incidente. Deviazioni dalla linearità possono essere causate da eventuali cariche spaziali all'interno della catena di moltiplicazione.
 - **Stabilità a breve termine:** dipendenza dal guadagno dalla frequenza dei segnali pulsati.
 - **Stabilità a lungo termine:** con l'aumento delle ore di lavoro la maggior parte dei fotomoltiplicatori mostra un calo dell'ampiezza media

del segnale in uscita a parità di impulso di entrata. Ciò è dovuto a un calo degli elettroni secondari prodotti negli ultimi dinodi della catena, che sono i primi ad invecchiare.

3.4 I nuovi fotomoltiplicatori di LUCID

Il tipo di fotomoltiplicatori scelto per la sostituzione di quelli utilizzati fino ad oggi è l'Hamamatsu R760 mostrato in figura 3.1.



Figura 3.1: Fotomoltiplicatore Hamamatsu R760

Il nuovo modello ha una finestra di 10 mm di diametro, mentre i PMT impiegati prima del 2013, Hamamatsu R762, hanno una finestra di 15 mm di diametro. La riduzione dell'accettanza è quindi di un fattore 2.25. Le principali caratteristiche di questi dispositivi sono elencate nella tabella 3.1

Tipo	R760
Dimensioni (diametro)	13 mm
Area fotocatodo (diametro)	10 mm
Forma della finestra	piana
λ max	160 nm
λ min	650 nm
λ picco	420 nm
Materiale fotocatodo	Bialcali
Materiale finestra	Quarzo
Cathode Lumious sensistivity (tipica)	110 μA
Max Voltage	1250 V
Max Anodic Current	100 μA
Guadagno Tipico	10^6
DC dopo 30 min tipica	1 nA
DC dopo 30 min max	15 nA
Tempo di salita tipico	2.1 ns

Tabella 3.1: Caratteristiche del fotomoltiplicatore Hamamatsu modello R760

In particolare sono stati ordinati alla casa costruttrice 45 PMT di tipo R760, più altri 5 leggermente modificati in modo da ridurre ulteriormente l'area attiva del fotocatodo (5 mm di diametro). Tutti questi fotomoltiplicatori devono essere provati prima dell'installazione per determinarne la qualità e selezionare i migliori. Inoltre, sarà essenziale determinarne la dipendenza del guadagno dalla tensione applicata in modo da poter individuare per ciascuno la tensione di lavoro opportuna. Queste richieste si traducono, in pratica, nella necessità di effettuare misure di corrente di buio e di corrente in presenza di una sorgente luminosa per diversi valori della tensione applicata e per ciascuno dei dispositivi acquistati. Misure che, se fatte manualmente con un

picoamperometro, impiegherebbero a tempo pieno una persona per diversi mesi.

Capitolo 4

Qualificazione dei fotomoltiplicatori

In questo capitolo sono inizialmente descritte le misure necessarie alla qualificazione dei fotomoltiplicatori acquistati per il rivelatore LUCID e, successivamente, si descrivono gli strumenti a disposizione per le misure stesse ed il programma LabView messo a punto dal candidato per automatizzarle.

4.1 Scopo della Misura

Dei 50 PMT acquistati 32 saranno inizialmente installati nel rivelatore LUCID. La qualificazione e la determinazione del punto di lavoro dei PMT da installare si baserà sui risultati dei test di qualità da effettuarsi su tutto il campione, attraverso le misure, che vengono descritte in questa tesi, relative alla *Dark Current* e al *Guadagno Relativo*, ossia del parametro α della equazione (3.2). La conoscenza di tale parametro sarà essenziale per determinare la tensione di lavoro dei PMT prima dell'inizio della presa dati.

Uno dei metodi per determinare α si basa sulla misura della corrente anodica del PMT, (I), in presenza di una sorgente di luce costante, al variare della tensione. La corrente I è infatti proporzionale al guadagno G secondo la

relazione $I \propto G = K \cdot V^\alpha$. Poichè i nuovi PMT dovranno funzionare a un guadagno dell'ordine di 10^5 , si è deciso di misurare la corrente anodica da una tensione minima di 500 V ad una tensione massima di 1250 V con incrementi di 100 V . Il parametro α sarà poi ottenuto con un fit lineare all'equazione (4.2) di seguito riportata. Poiché ogni volta che si cambia l'alimentazione i PMT richiedono un certo tempo per stabilizzarsi dell'ordine di qualche minuto, per minimizzare questo effetto si è inoltre deciso di effettuare le misure sia aumentando che diminuendo la tensione. Dal confronto dei risultati ottenuti nei due scan si assegna l'eventuale errore sistematico alle misure. La sorgente di luce usata è costituita da un LED blu impulsato a 10 kHz . Il rapporto tra correnti corrispondenti a tensioni diverse si può scrivere, scegliendo 1000 V come tensione di riferimento:

$$\frac{I_V}{I_{1000}} = \frac{G_V}{G_{1000}} = \left(\frac{V}{1000} \right)^\alpha \quad (4.1)$$

dove I_V è la corrente misurata alla tensione V e G_V è il corrispondente guadagno. Passando ai logaritmi si ottiene la relazione lineare:

$$\log \left(\frac{I_V}{I_{1000}} \right) = \alpha \cdot \log \left(\frac{V}{1000} \right) \quad (4.2)$$

da cui si può ricavare facilmente il valore di α .

4.2 Setup Sperimentale

4.2.1 Strumentazione

La strumentazione usata per effettuare le misure è la seguente:

- **PC:** Personal Computer con sistema operativo Windows 7 e software LabVIEW 2010.
- **Scheda Caen n1470:** è un alimentatore di alta tensione a 4 canali indipendenti, di tipo NIM. Ogni canale può funzionare a un massimo

di tensione di ± 8 kV, un massimo di corrente di 3 mA e un massimo di potenza di 9 W. Possiede un'interfaccia di controllo remoto di tipo USB. È mostrato in figura 4.1 b).

- **Keithley 6485:** un picoamperometro digitale con sensibilità minima 20 fA, corrente massima pari a 20 mA e caduta di tensione inferiore ai 200 V. La risoluzione varia da 10 fA a 100 nA a seconda dell'intervallo di corrente misurata. Presenta uno schermo con risoluzione di 5-12 cifre, una velocità di lettura fino a 1000 misurazioni per secondo e funzionalità di autorange. Possiede due interfacce di controllo da remoto, GPIB e RS-232. È mostrato in figura 4.1 a).
- **Tektronix AFG3000C:** è un generatore di forme d'onda utilizzato per impulsare il LED. Per le misure qui effettuate è stato programmato per generare onde quadre di 25 ns con frequenza 10 kHz. È mostrato in figura 4.2.
- **Scatola Nera:** una scatola a tenuta di luce con connettori di alta tensione e Lemo¹ per collegare fino a 4 PMT contemporaneamente. Nonostante sia possibile alimentare 4 PMT alla volta non è possibile eseguire le letture da questi PMT contemporaneamente in quanto si dispone di un solo picoamperometro. La scatola è mostrata in figura 4.3.
- **4 Fibre multimodali:** utilizzate per portare l'impulso di luce dal LED ai quattro PMT da misurare.
- **LED:** blu, di lunghezza d'onda $\lambda \simeq 470$ nm

¹Cavi con connettori di tipo push-pull.



Figura 4.1: a) Picoamperometro Keithley 6485 b) Alimentatore Caen n1470.



Figura 4.2: Generatore di onde Tektronix AFG3000C

4.3 Software

Attraverso il software LabVIEW 2010 [3] il candidato ha programmato del codice atte a controllare, attraverso il personal computer, sia il picoamperometro, che l'alimentatore. Inoltre, ha sviluppato un applicativo che automatizza il processo di scan in tensione eliminando la necessità di interventi manuali.

Il software LabVIEW è un software proprietario prodotto da National Instruments. Le interfacce principali sono un "Front Panel" e un "Block Diagram". Il "Front Panel" è l'interfaccia utente in cui sono presenti i parametri di input modificabili (chiamati "controlli") e le variabili di output (chiamati "indicatori"). Il "Block Diagram" è l'interfaccia per il programmatore, in cui si può scrivere il programma attraverso un linguaggio grafico.



Figura 4.3: Scatola nera con presenti all'interno i cavi di alimentazione dei PMT, i cavi per la lettura della corrente anodica, i PMT stessi, il contenitore del led e le fibre.

4.3.1 Controllo dell'alimentatore

L'alimentatore CAEN è controllato attraverso un'interfaccia USB e un driver proprietario. All'interno del codice sviluppata per controllarlo, lo strumento viene inizializzato impostando i parametri di input e abilitando l'erogazione dell'alimentazione. In seguito il programma entra in un ciclo infinito in cui vengono lette le variabili di output ad ogni iterazione del ciclo (circa ogni 30 s). La figura in appendice A.1 mostra il Block Diagram del programma. L'utente determina l'uscita dal ciclo e di conseguenza dal programma premendo un tasto di stop.

I parametri di configurazione presenti nel Front Panel mostrato in figura 4.4 sono:

- **Channel:** il canale prescelto dell'alimentatore su cui si vuole operare
- **Voltage Level:** il valore di tensione a cui impostare il canale dell'alimentatore selezionato precedentemente

- **Voltage Max:** il valore massimo di tensione erogabile dall'alimentatore sul canale scelto
- **Current Max:** il valore massimo di corrente erogabile dal canale selezionato.

Sono inoltre presenti due bottoni: uno per abilitare o disabilitare l'uscita dell'alimentatore, e l'altro per l'uscita dal ciclo di lettura delle variabili di output.

Queste ultime sono:

- **Actual Voltage Level:** Il valore di tensione effettivamente erogato,
- **Actual Current Level:** il valore di corrente effettivo,
- **Polarity:** la polarità della tensione.

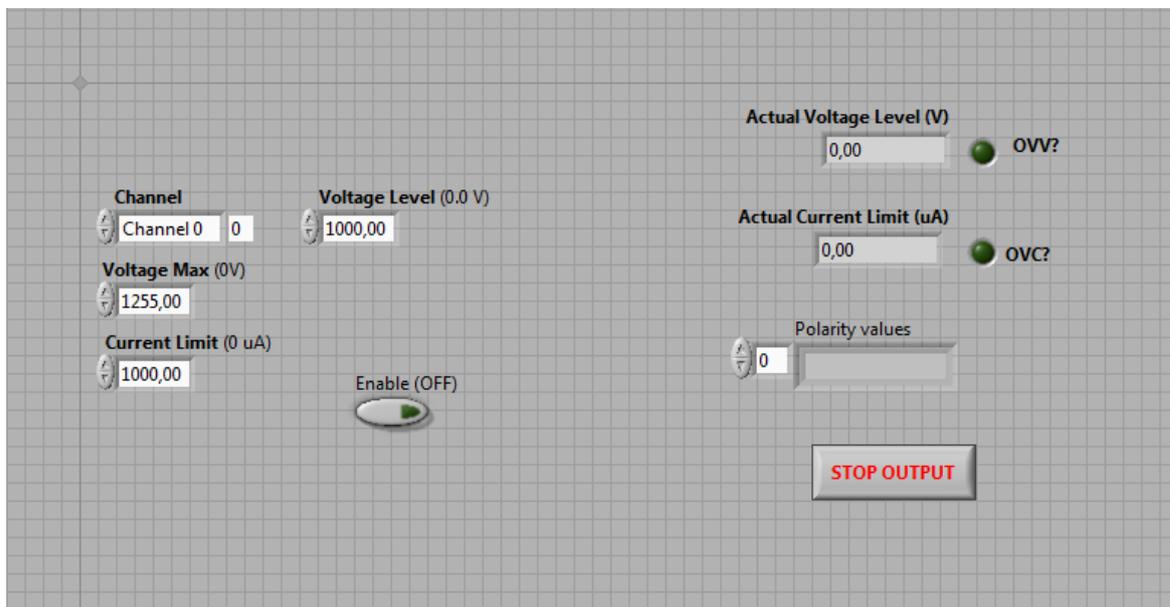


Figura 4.4: Front Panel del programma di controllo dell'alimentatore

4.3.2 Controllo del picoamperometro

Il picoamperometro è collegato al personal computer attraverso un'interfaccia USB/GPIB. Per controllarlo da LabView sono necessari due driver proprietari: uno della Keithley per il picoamperometro, e l'altro della Agilent per l'interfaccia.

Zero Check / Zero Correct

Prima di effettuare una misura è necessario controllare ed eventualmente correggere lo zero del picoamperometro, in modo da escludere un eventuale offset interno allo strumento. Questa funzionalità è svolta automaticamente dall'amperometro attraverso due funzioni dette *zero check* e *zero correct*. La funzione zero check serve a determinare l'eventuale offset dello strumento; lo zero correct abilita la sottrazione dell'offset a tutte le misure successive. In appendice A.2 è mostrato il Block Diagram del programma che implementa questa procedura.

Misure di corrente

Il codice che esegue le misurazioni di corrente in ingresso al picoamperometro è composto da una parte iniziale, in cui viene configurata la funzione di misurazione stessa, cioè un'acquisizione bufferizzata, e una parte finale in cui vengono eseguite delle operazioni statistiche quali media, deviazione standard, massimo, minimo e distanza picco-picco sui dati immagazzinati nel buffer. Sia le misure che i valori medi sono poi salvati su un file di testo. Il Block Diagram e il Front Panel relativi a questa funzione sono mostrati in appendice A.3 e in figura 4.5.

I parametri di input sono:

- **Array Size:** la dimensione del vettore, cioè il numero di letture da effettuare per ogni misura,

- **Path Misure:** il percorso del file ascii in cui si salvano le singole letture,
- **Path Statistica:** il percorso del file ascii in cui si salvano parametri statistici delle misure.

Le variabili di output sono:

- **Mean:** La media delle misure,
- **STD:** la deviazione standard,
- **Maximum:** il valore massimo,
- **Minimum:** il valore minimo,
- **P2P:** la distanza picco-picco, ossia la distanza tra il massimo e minimo.

Al fine di monitorare in tempo reale l'esito della misura, vengono inoltre visualizzati sia un'istogramma delle letture individuali che l'andamento delle stesse in funzione del tempo. Questo permette di individuare immediatamente eventuali malfunzionamenti del sistema.

4.3.3 Programma per l'automatizzazione delle misure in funzione della tensione di alimentazione

Le tre routine precedenti sono combinate nel programma finale, che permette di eseguire lo scan in tensione del PMT in modo automatizzato. Si parte da una tensione iniziale di 500 V che viene incrementata periodicamente di 100 V fino a un massimo di 1250 V, e in seguito decrementata nuovamente fino a 500 V. Per ogni valore di tensione il picoamperometro esegue le misure di corrente descritte in 4.3.2 e salva i risultati su due file di testo.

Il programma è sostanzialmente un while loop diviso in due macro-blocchi principali, mostrati rispettivamente in appendice A.4 e A.5 . Nel primo viene incrementata la tensione dell'alimentatore, mentre nel secondo vengono eseguite le misure. Tra il primo e il secondo blocco c'è un tempo di attesa

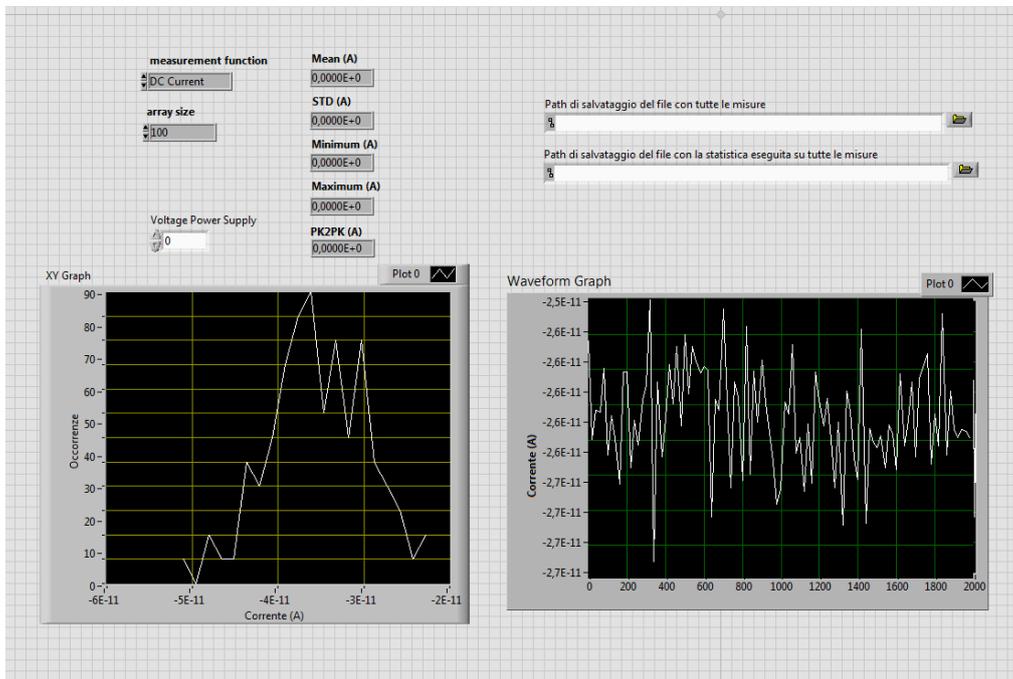


Figura 4.5: Front Panel della routine del programma di misura della corrente con il picoamperometro, descritto nel paragrafo precedente. In alto a sinistra si osservano le variabili di output del programma mentre a destra quelle di input. In basso a sinistra è mostrato l'istogramma delle letture individuali, a destra il grafico dell'andamento delle misure in funzione del tempo.

(impostato a 5 minuti) in modo da permettere la stabilizzazione del PMT dopo la modifica dell'alimentazione.

Il Front Panel è mostrato in figura 4.6 e comprende due controlli aggiuntivi:

- Un interruttore che permette di riprendere la scansione da un punto qualunque, sia nella fase di incremento che di decremento dell'alimentazione.
- una variabile che configura il tempo di attesa o condizionamento.

Anche in questo caso si è previsto un grafico per la visualizzazione globale dei risultati della scansione: in scala log log si mostrano i valori medi delle correnti misurate in funzione dell'alimentazione fornita al fotomoltiplicato-

re. Se non ci sono problemi quando il PMT è illuminato dal LED il grafico risultante è una retta la cui pendenza è il parametro da misurare. Comportamenti non lineari dovuti per esempio a saturazione del segnale alle tensioni più alte sono immediatamente identificabili e permettono di correggere immediatamente l'ampiezza del segnale del led.

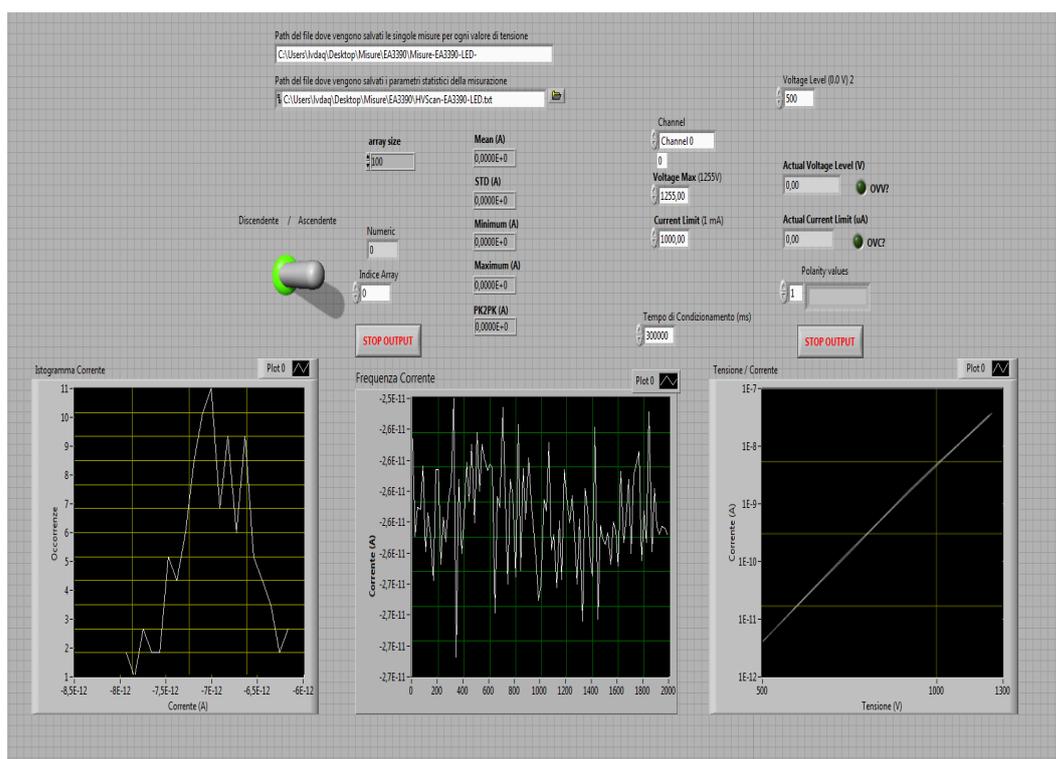


Figura 4.6: Front Panel di HVScan. In alto a sinistra sono presenti i controlli del picoamperometro, mentre in alto a destra si trovano quelli dell'alimentatore. I tre grafici sono rispettivamente, da sinistra a destra: l'istogramma delle letture individuali per ciascun valore di tensione e il loro andamento nel tempo (aggiornati al termine di ogni misura), e il grafico in scala log log dei valori medi delle correnti misurate in funzione della tensione fornita al fotomoltiplicatore. Questo grafico è aggiornato al termine dello scan.

Capitolo 5

Analisi dei dati

In questo capitolo sono presentate le misure di Dark Current e guadagno relativo corrispondenti ai primi 18 dei 50 fotomoltiplicatori R760 acquistati per LUCID. I dati acquisiti attraverso il programma LabView descritto precedentemente sono analizzati con un programma scritto in ROOT [3].

5.1 Dark Current

Per misurare la Dark Current si è utilizzato l'apparato descritto nel paragrafo 4.2, ma senza accendere il LED. Si è posta particolare attenzione a verificare la tenuta di luce della scatola che contiene i PMT e si è cercato di mantenere costante la temperatura della stanza mediante un condizionatore, in quanto i fotomoltiplicatori sono molto sensibili alla luce ambientale e alla temperatura a cui operano.

In figura 5.1 è mostrato il grafico di Dark Current del PMT EA3367. Ogni punto corrisponde alla media pesata dei valori corrispondenti alla stessa tensione negli scan up/down quando i risultati sono compatibili, altrimenti al loro valor medio. In questo caso la semidifferenza tra i valori misurati è stata assegnata come errore.

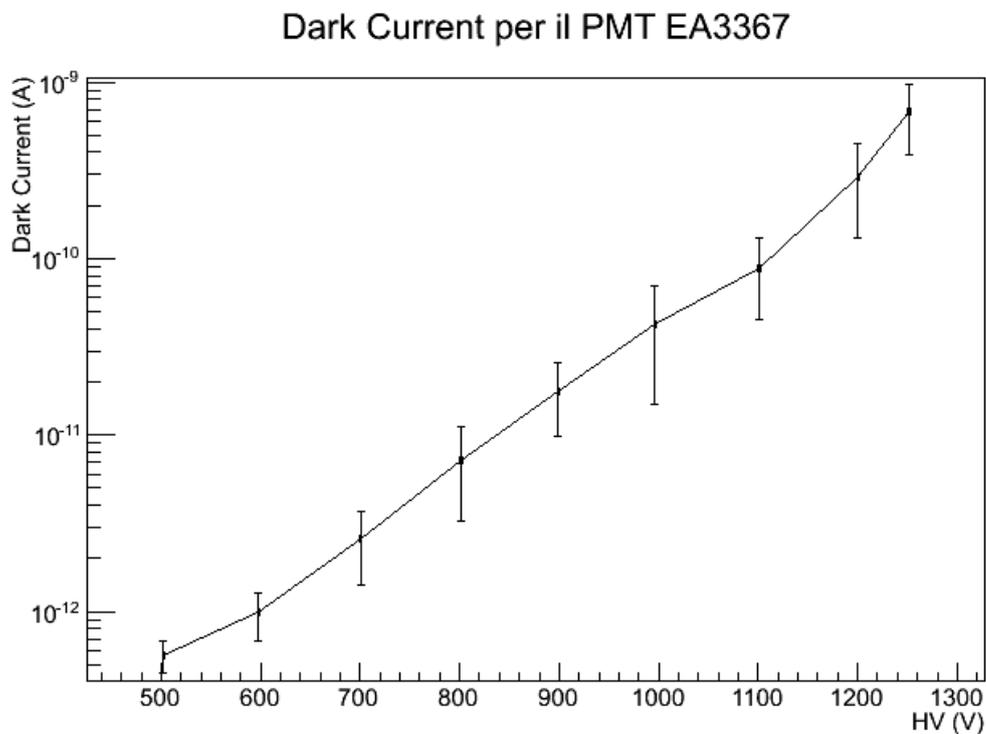


Figura 5.1: Dark Current misurata per il PMT EA3367 in funzione della tensione di alimentazione.

Nella figura 5.2 sono mostrati i valori di Dark Current per tutti i fotomoltiplicatori, i quali mostrano un comportamento sostanzialmente uniforme. Si è osservato inoltre che i due PMT che presentano il maggior valore di questo parametro sono EA3367 e EA3390.

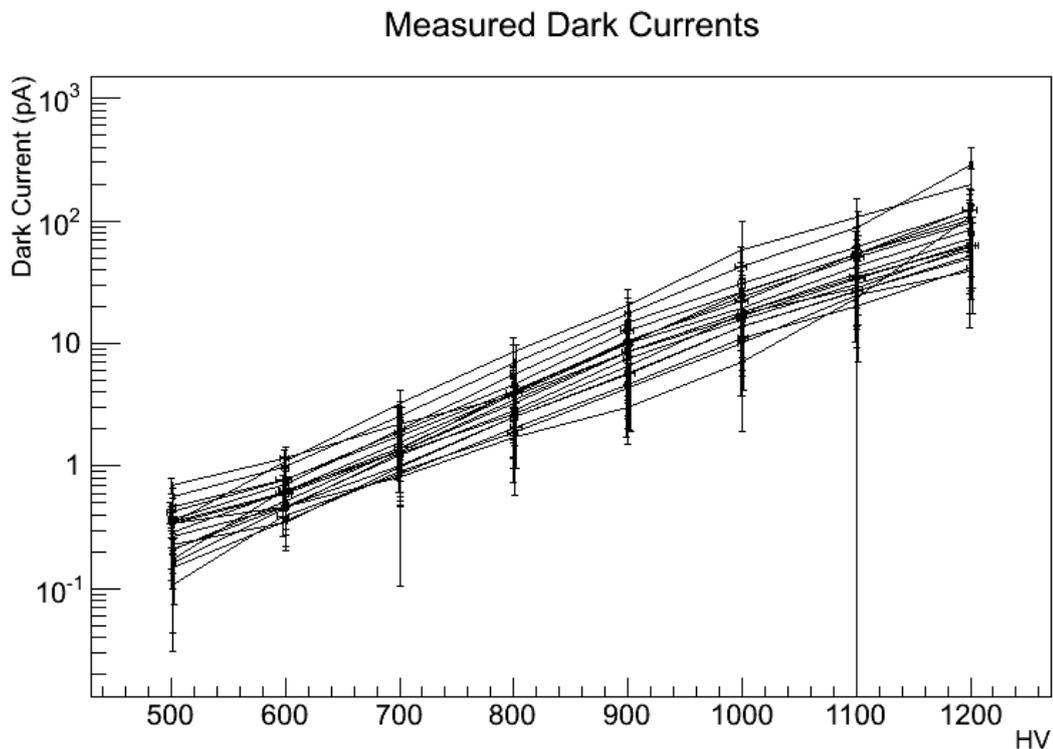


Figura 5.2: Dark Current misurata per i primi 18 PMT in funzione della tensione di alimentazione.

5.2 Guadagno Relativo

Per misurare il guadagno relativo (α) si è utilizzato l'apparato descritto nel paragrafo 4.2. Per calcolare α si è eseguito il fit ai dati sperimentali delle correnti in funzione della tensione di lavoro. Usando come errore sulla misura della corrente quello statistico fornito dal picoamperometro si ottengono valori di chi quadrato molto alti. Questo risultato è probabilmente dovuto a delle instabilità nell'ampiezza del segnale del LED, che deve essere costante affinché l'equazione (4.2) sia valida. Per risolvere questo problema si è proceduto imponendo la validità della relazione (4.2) e si è incrementato l'errore relativo delle misure delle correnti moltiplicandole per un fattore di scala ottenuto dal fit stesso: l'errore è stato scelto in modo tale da avere un chi

quadrato (χ^2) più vicino possibile al numero dei gradi di libertà. Come già detto, q uesta procedura è legittima se è valida la relazione $G = KV^\alpha$.

Il fit per estrarre il parametro α è stato eseguito sia su tutto l'intervallo di tensioni esplorato (500-1250 V), che nel sottoinsieme 500-1000 V. Questo è dovuto al fatto che tra 500 e 1250 V, il valore del guadagno cambia di circa tre ordini di grandezza e il punto di lavoro ottimale per l'esperimento ATLAS è stimato attorno ai 750 V come vedremo in seguito. Per questo motivo il secondo insieme di misure è stato effettuato in un intervallo ristretto vicino al punto di lavoro. I risultati sono mostrati in tabella 5.1 e 5.2. Come evidenziato nelle tabelle, valori tipici di α si aggirano attorno a 8. Nell'intervallo 500-1000 V i valori ottimali di α risultano leggermente superiori a quelli ottenuti fittando tutte le misure: a basse tensioni non si risente di eventuali effetti di saturazione causati dall'ampiezza del segnale LED alle tensioni più elevate. È mostrato il fit eseguito sul PMT EA3362 in figura 5.3. Per calcolare il valore di α finale si è deciso di eseguire una media sulle due misure corrispondenti agli scan in tensione in cui si aumenta e si diminuisce la tensione, rispettivamente. Per determinare l'errore è stata effettuata la somma in quadratura dell'errore statistico e dell'eventuale sistematico, per cui si è considerata la semidifferenza delle misure precedenti. In questo modo si cerca anche di considerare l'effetto di eventuali instabilità del LED, che ovviamente non influenzano le misure di dark current illustrate precedentemente.

Nella prossima presa dati di ATLAS il guadagno dei PMT dovrebbe essere pari a circa 10^5 , che corrisponde ad una tensione di alimentazione tra i 700 e gli 800 V. Dal momento che che gli R760 hanno un guadagno tipico di 10^6 a 1000 V (vedi tabella 3.1), ci si aspetta di dover operare i PMT a una tensione di circa 750 V per ottenere guadagni di 10^5 . Dall'equazione (4.1) si ricava:

$$\left(\frac{V}{1000}\right)^\alpha = \frac{G_V}{G_{1000}} = \frac{10^5}{10^6} = \frac{1}{10} \Rightarrow V = \frac{1000}{10^{1/\alpha}} \quad (5.1)$$

ponendo $\alpha \simeq 8$ allora si ottiene $V \simeq 749.9$ V, come quanto detto in precedenza.

Il valore della tensione di lavoro di ciascun PMT sarà determinato, basandosi sui risultati qui esposti per α , a partire da una misura di guadagno assoluto. Quest'ultimo si può determinare per esempio con il metodo del singolo fotoelettrone. Purtroppo, per separare il segnale di un solo fotoelettrone dal rumore, è necessario operare a guadagno ben al di sopra di 10^5 . In definitiva, il guadagno assoluto di ciascun PMT potrà essere determinato solo a tensioni tipiche di 1100 V, quando esso è dell'ordine di $2-4 \cdot 10^6$. Assumendo un guadagno di $2 \cdot 10^6$ a 1100 V per il PMT EA3375 di tabella 5.2, per esempio, possiamo determinare la tensione di lavoro corrispondente a un guadagno di 10^5 con una precisione di circa 5 V, corrispondente a un'incertezza sul guadagno stesso dell'ordine del 5%. Questo errore di estrapolazione va poi sommato in quadratura all'errore sulla calibrazione assoluta, che possiamo assumere dello stesso ordine di grandezza. In definitiva con questo metodo possiamo equalizzare i guadagni dei PMT con una precisione tipica del 7-8%. È quindi allo studio un metodo di calibrazione assoluta alternativo, da implementare direttamente alla tensione di lavoro, basato sugli elettroni monoenergetici emessi per conversione interna in seguito al decadimento del ^{207}Bi .

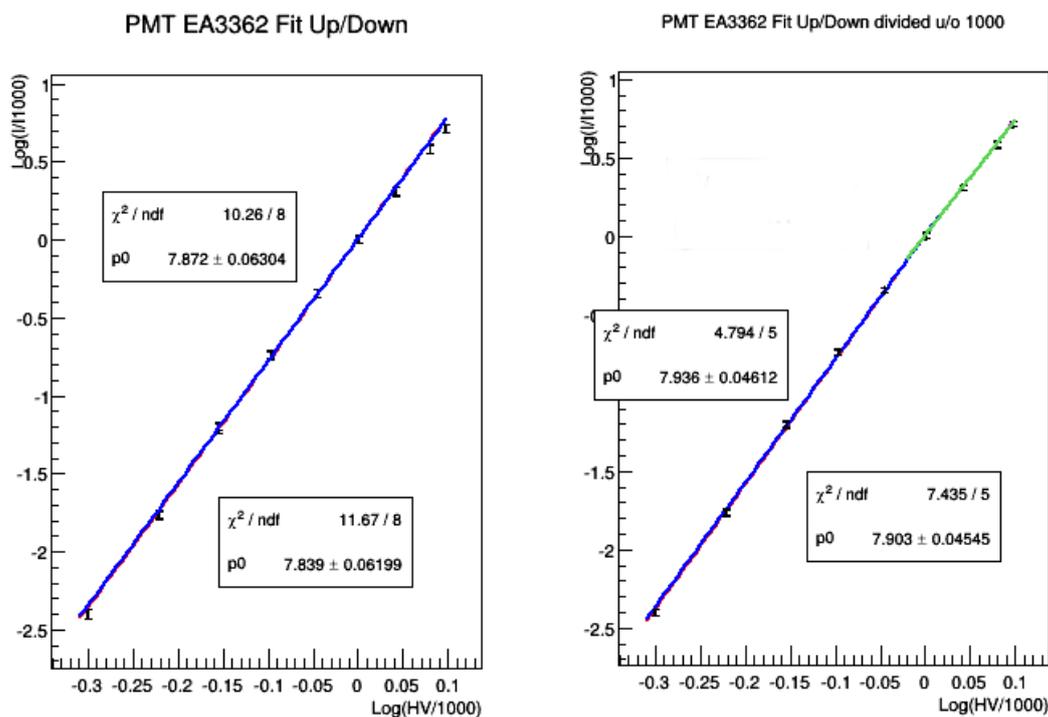


Figura 5.3: Fit delle misure effettuate sul PMT EA3373. A sinistra si osserva il fit eseguito su tutte le misure, rappresentato con una linea blu per HV up e con una linea rossa per HV down. A destra si osserva il fit eseguito sui due intervalli separati fino a, e oltre 1000 V. Il risultato del fit lineare è rappresentato con una linea blu per HV up sotto 1000 V, con una linea rossa HV down sotto 1000 V, con una linea verde per HV up sopra 1000 V e con una linea viola per HV down sopra 1000 V.

PMT	α (HV up)	α (HV down)	α
EA3362	(7.87 ± 0.06)	(7.83 ± 0.06)	(7.86 ± 0.06)
EA3363	(8.06 ± 0.09)	(7.88 ± 0.06)	(7.97 ± 0.12)
EA3364	(8.13 ± 0.06)	(8.13 ± 0.07)	(8.13 ± 0.07)
EA3365	(8.36 ± 0.06)	(8.03 ± 0.07)	(8.20 ± 0.18)
EA3367	(8.25 ± 0.06)	(8.22 ± 0.09)	(8.23 ± 0.07)
EA3368	(8.22 ± 0.08)	(8.21 ± 0.06)	(8.22 ± 0.07)
EA3373	(8.33 ± 0.06)	(8.11 ± 0.06)	(8.22 ± 0.12)
EA3375	(8.39 ± 0.08)	(8.16 ± 0.07)	(8.27 ± 0.13)
EA3376	(8.29 ± 0.07)	(8.18 ± 0.07)	(8.23 ± 0.08)
EA3378	(7.92 ± 0.05)	(7.59 ± 0.05)	(7.76 ± 0.17)
EA3379	(8.12 ± 0.09)	(8.12 ± 0.08)	(8.12 ± 0.08)
EA3383	(8.25 ± 0.06)	(8.11 ± 0.07)	(8.18 ± 0.09)
EA3384	(8.17 ± 0.05)	(8.13 ± 0.05)	(8.15 ± 0.06)
EA3385	(8.22 ± 0.07)	(8.06 ± 0.06)	(8.14 ± 0.10)
EA3387	(8.10 ± 0.08)	(8.04 ± 0.08)	(8.06 ± 0.08)
EA3388	(8.28 ± 0.10)	(8.37 ± 0.08)	(8.32 ± 0.10)
EA3390	(8.24 ± 0.07)	(7.98 ± 0.07)	(8.11 ± 0.15)
EA3391	(8.37 ± 0.06)	(8.16 ± 0.06)	(8.26 ± 0.12)

Tabella 5.1: Misure del parametro α che compare nell'equazione (4.2), con il fit eseguito su tutte le misure. La prima colonna è il nome del PMT, la seconda e la terza si riferiscono ai risultati degli scan in tensione realizzati rispettivamente incrementando e decrementando la tensione di alimentazione. Gli errori sul parametro α sono quelli dati dal fit lineare. La quarta colonna contiene la misura finale, ottenuta combinando le altre due. L'errore è la somma in quadratura dell'errore statistico e dell'eventuale sistematico, per cui si è considerata la semidifferenza delle misure precedenti

PMT	α (HV up)	α (HV down)	α
EA3362	(7.93 ± 0.05)	(7.90 ± 0.05)	(7.92 ± 0.05)
EA3363	(8.14 ± 0.07)	(8.05 ± 0.06)	(8.09 ± 0.08)
EA3364	(8.19 ± 0.04)	(8.20 ± 0.05)	(8.19 ± 0.04)
EA3365	(8.38 ± 0.08)	(8.09 ± 0.06)	(8.23 ± 0.15)
EA3367	(8.37 ± 0.07)	(8.30 ± 0.05)	(8.33 ± 0.07)
EA3368	(8.21 ± 0.05)	(8.33 ± 0.05)	(8.27 ± 0.08)
EA3373	(8.43 ± 0.07)	(8.19 ± 0.04)	(8.31 ± 0.13)
EA3375	(8.33 ± 0.06)	(8.17 ± 0.05)	(8.25 ± 0.10)
EA3376	(8.36 ± 0.05)	(8.25 ± 0.05)	(8.30 ± 0.07)
EA3378	(7.95 ± 0.05)	(7.58 ± 0.05)	(7.76 ± 0.19)
EA3379	(8.18 ± 0.06)	(8.19 ± 0.05)	(8.19 ± 0.06)
EA3383	(8.26 ± 0.06)	(8.17 ± 0.05)	(8.21 ± 0.07)
EA3384	(8.27 ± 0.04)	(8.23 ± 0.05)	(8.25 ± 0.04)
EA3385	(8.23 ± 0.07)	(8.13 ± 0.04)	(8.18 ± 0.06)
EA3387	(8.20 ± 0.05)	(8.12 ± 0.04)	(8.17 ± 0.07)
EA3388	(8.36 ± 0.07)	(8.45 ± 0.07)	(8.40 ± 0.08)
EA3390	(8.32 ± 0.05)	(7.93 ± 0.05)	(8.1 ± 0.2)
EA3391	(8.43 ± 0.06)	(8.25 ± 0.04)	(8.34 ± 0.10)

Tabella 5.2: Misure del parametro α che compare nell'equazione (4.2), con il fit eseguito solo nel sottoinsieme 500-1000V. La prima colonna è il nome del PMT, la seconda e la terza si riferiscono ai risultati degli scan in tensione realizzati rispettivamente incrementando e decrementando la tensione di alimentazione. Gli errori sul parametro α sono quelli dati dal fit lineare. La quarta colonna contiene la misura finale, ottenuta combinando le altre due. L'errore è la somma in quadratura dell'errore statistico e dell'eventuale sistematico, per cui si è considerata la semidifferenza delle misure precedenti

Conclusioni

Un primo e rilevante obiettivo raggiunto con il presente lavoro di tesi riguarda la messa a punto e la verifica del software per misure di qualificazione dei fotomoltiplicatori che verranno montati sul rivelatore LUCID durante l'attuale upgrade. Questo permette, con un minimo intervento umano, la determinazione dei parametri caratteristici dei fotomoltiplicatori, quali la Dark Current e il parametro (α) che caratterizza la dipendenza del guadagno relativo dalla tensione applicata.

Il sistema sviluppato è stato in seguito utilizzato per misurare i parametri di 18 dei 50 PMT acquistati. Durante queste misure si è osservato che, nonostante ci siano ancora alcune procedure che necessariamente devono essere eseguite manualmente, come ad esempio il cambio del cavo di lettura del picoamperometro per effettuare le misure su ciascun fotomoltiplicatore, il processo è diventato decisamente più veloce e meno dispendioso di risorse.

Un secondo importante obiettivo riguarda le misure eseguite sui PMT. Il parametro di Dark Current, che fornisce un limite inferiore alla corrente passante attraverso il dispositivo, ha un comportamento uniforme per il campione di sensori esaminato. Per il parametro α , si può notare che i valori misurati sono tendenzialmente più alti nel caso di un fit effettuato in un intervallo di tensione più limitato, in quanto non risentono dell'effetto di saturazione del segnale causato dall'ampiezza del segnale LED per le alte tensioni. Il parametro α sarà fondamentale per determinare la tensione corrispondente ad un guadagno pari a 10^5 , che è quello richiesto dalle specifiche di funzionamento del rivelatore. Il guadagno assoluto, infatti, si può misurare con il metodo

del singolo fotoelettrone ma solo a guadagni ben superiori. Il parametro α permetterà di estrapolare le calibrazioni assolute ad alto guadagno a valori di tensione inferiori e quindi, in definitiva, di fissare la tensione di lavoro di ciascun PMT prima dell'inizio della prossima presa dati.

Appendice A

Appendice 1: Codice sorgente LabView

In questa appendice vengono mostrate il codice sorgente in LabView delle varie routine messe a punto. Queste routine sono descritte nel paragrafo 4.3.

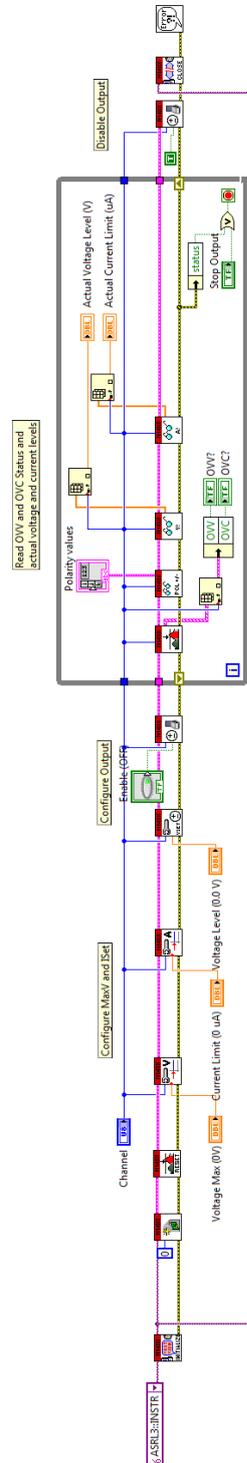


Figura A.1: Block Diagram del programma di controllo dell'alimentatore, descritto nel paragrafo 4.3.1

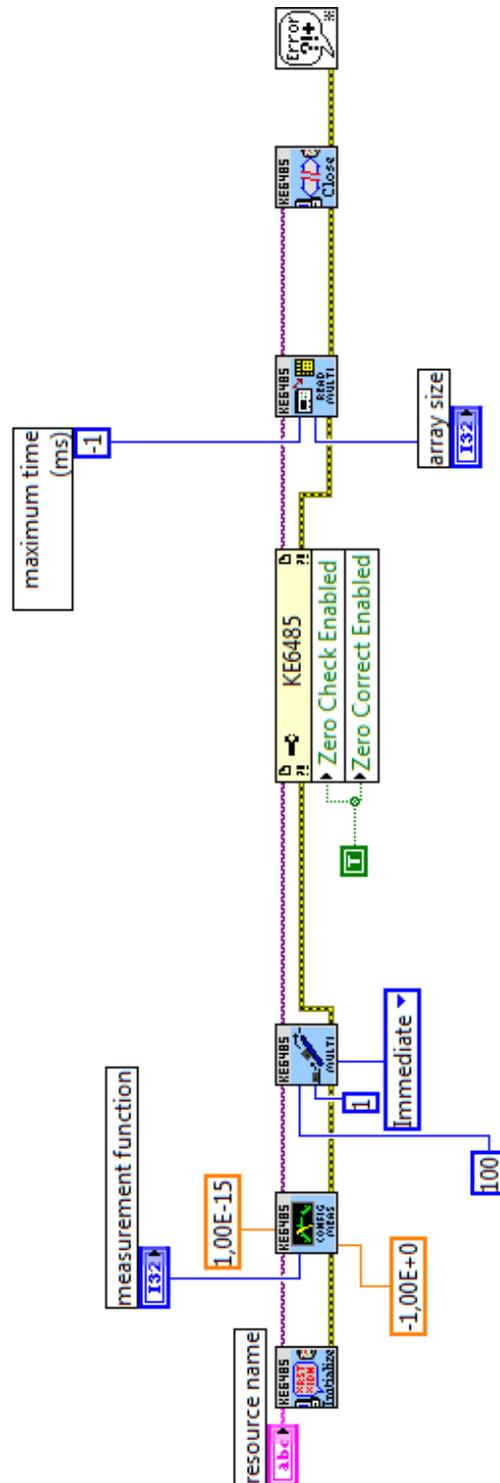


Figura A.2: Block Diagram Zero Check / Zero Correct, descritto nel paragrafo 4.3.2

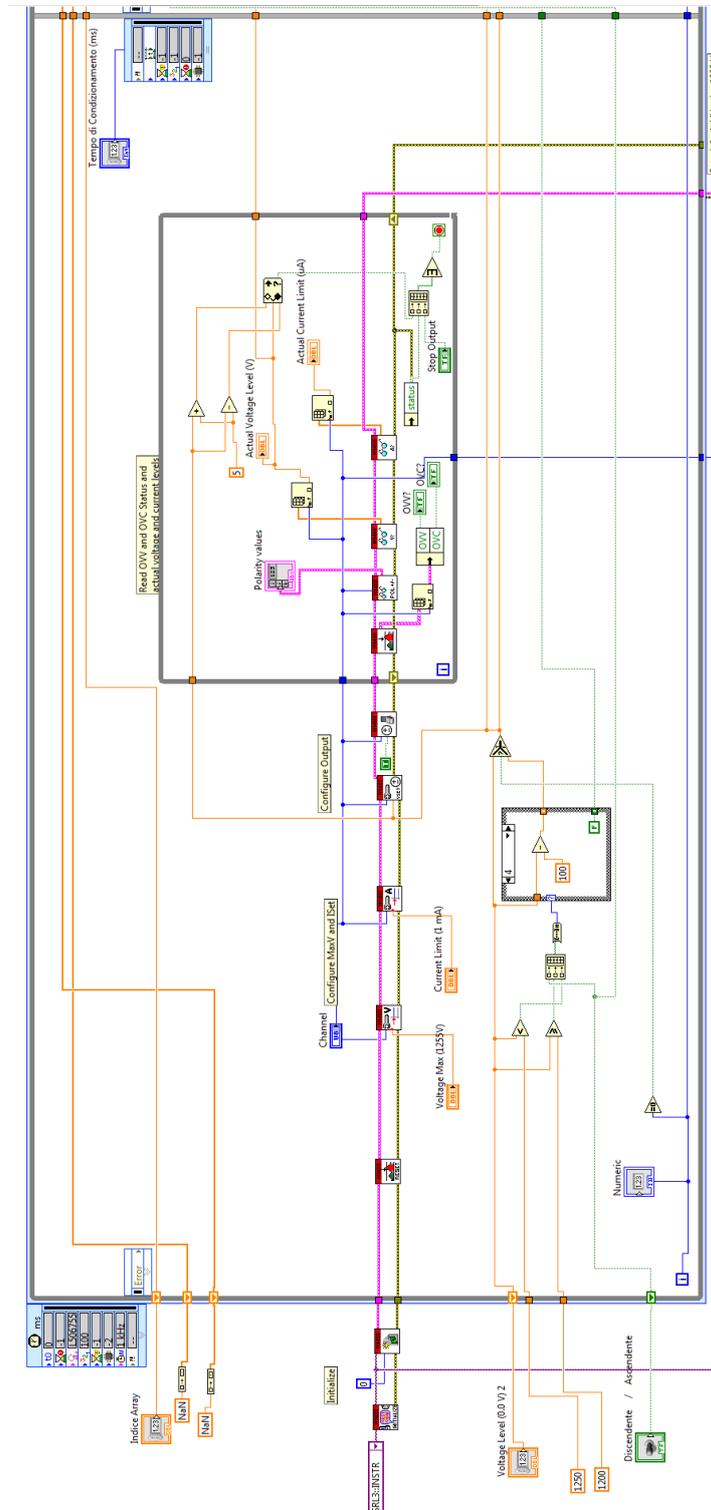


Figura A.4: Block Diagram Primo Macroblocco HVScan, descritto nel paragrafo 4.3.3

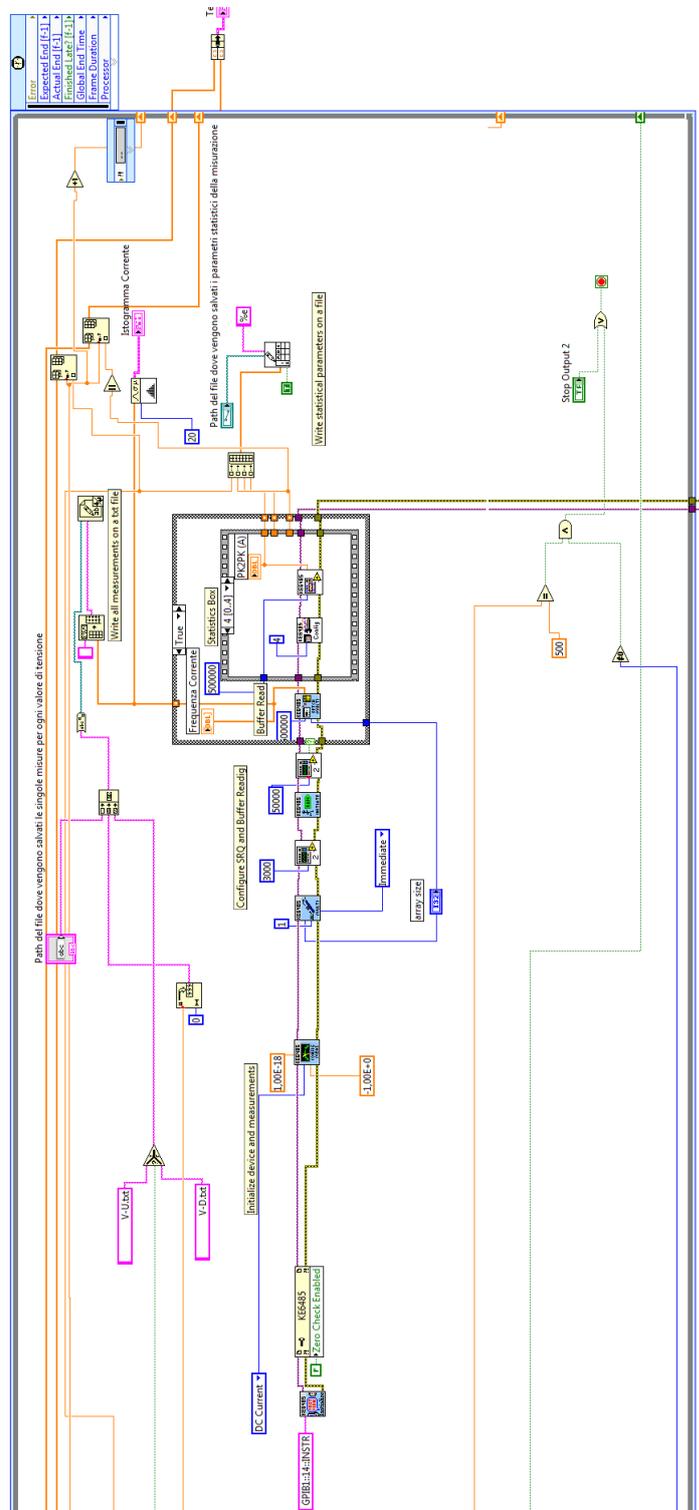


Figura A.5: Block Diagram Secondo Macroblocco HVScan, descritto nel paragrafo 4.3.3

Bibliografia

- [1] <http://http://home.web.cern.ch/topics/large-hadron-collider>
- [2] <http://www.ni.com/labview/why/i/>
- [3] <http://http://root.cern.ch/drupal/>
- [4] William R. Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: A How-To Approach
- [5] S. BRAibant, G. Giacomelli, M.Spurio, Particelle e interazioni fondamentali