

Dipartimento di
Ingegneria Gestionale, dell'Informazione e della produzione

Corso di laurea in
Ingegneria Informatica

Classe n. L/8

Progetto e caratterizzazione
di canali di lettura per SiPM
impiegati nella rivelazione di muoni
da radiazioni cosmiche

Relatore:

Candidato:
Giorgio Venezia

Chiar.mo Prof
Massimo Manghisoni

Matricola n. 1080030

Correlatore:

Luca Ghislotti, PhD

Anno Accademico
2023/2024

Indice

Elenco delle figure	iii
Elenco delle tabelle	vii
Introduzione	1
1 Caratterizzazione sperimentale di SiPM	3
1.1 Analisi e funzionamento di un SiPM	3
1.2 Descrizione del setup di misura	7
1.3 Risultati delle misure effettuate	8
2 Simulazione del preamplificatore	11
2.1 Punto di lavoro stazionario	13
2.2 Analisi di piccolo segnale	15
2.3 Analisi nel dominio del tempo	19
2.4 Progettazione della PCB	21
3 Rivelazione di muoni cosmici	25
3.1 I muoni	25
3.2 Descrizione del setup di misura	26
3.3 Raccolta e analisi dei dati	29
Conclusioni	39
Bibliografia	41
Ringraziamenti	45

INDICE

Elenco delle figure

1.1	Fotografia di un SiPM (sinistra) e di uno SPAD (destra) con il circuito equivalente (sotto) [3].	4
1.2	Schema strutturale di un SPAD, con a destra il grafico che descrive l'andamento del campo elettrico avvicinandosi al catodo [3].	4
1.3	Andamento nel dominio del tempo del ciclo breakdown-quench-reset (sinistra) e regioni di funzionamento nella caratteristica I-V (destra). In quest'ultima immagine il valore V_B è indicato dalla freccia tra Reset e Breakdown.	5
1.4	a) Schematico della SiPM board usata nel progetto MuonPi. b) Fotografia di un SiPM [4].	6
1.5	Setup utilizzato per determinare la caratteristica tensione corrente del SiPM. In primo piano il SiPM collegato attraverso un cavo di tipo BNC con connettore Lemo al DC Power Analyzer che si vede in secondo piano. Sul display di quest'ultimo si notano i valori di tensione e corrente erogati.	7
1.6	Caratteristica tensione-corrente del SiPM misurata tra 0 V e 1 V con il solo SiPM collegato al DC Power Analyzer	8
1.7	Caratteristica tensione-corrente del SiPM misurata tra 0.7 V e 1 V con il solo SiPM collegato al DC Power Analyzer, si apprezza l'andamento lineare e la corrispondenza tra modello lineare e risultati empirici oltre ai valori di coefficiente angolare e quota del modello.	9
1.8	Schematico di una microcella	10
2.1	Schema circuitale del BGA614. I pin 1 e 3 vanno collegati al circuito mentre il pin 2 va collegato a massa.	12
2.2	Schema circuitale della configurazione Darlington [6].	12
2.3	Schema circuitale del preamplificatore. Il generatore di corrente δ è il modello del sottosistema SiPM-scintillatore.	13
2.4	Schema circuitale del preamplificatore in DC.	14

2.5	In alto il modello in AC del BJT in cui vengono considerate le approssimazioni, sotto il modello usato dal simulatore senza approssimazioni, con la presenza delle due resistenze r_π e r_{ce}	16
2.6	Schema circuitale del preamplificatore in AC.	16
2.7	Schema circuitale del preamplificatore in AC considerando $\omega \rightarrow \infty$	17
2.8	Diagrammi di Bode della funzione di trasferimento $\frac{V_{out}}{\delta}$. In linea continua il diagramma del guadagno, in linea tratteggiata quello della fase.	19
2.9	Andamento in transitorio del nodo 3 del preamplificatore.	20
2.10	Caratteristica I-V del preamplificatore per valori di corrente compresi tra 0 A e 20 mA.	20
2.11	Caratteristica I-V del preamplificatore per valori di corrente compresi tra 0 A e 8 mA.	21
2.12	Schematico del preamplificatore in EAGLE.	22
2.13	Differenza visiva tra dispositivi SMD, a sinistra, e dispositivi PTH, a destra.	22
2.14	La PCB dell'amplificatore. Le dimensioni sono di 85.8 mm × 33.3 mm	23
3.1	Il processo di formazione dei muoni [10].	26
3.2	Il circuito utilizzato per l'alimentazione e per la lettura del segnale in uscita dal SiPM. Sono presenti tre connettori: quella a sinistra è per l'alimentazione, i due di destra sono usati per la lettura del segnale. Nel caso analizzato è stato utilizzato solo uno dei due connettori di lettura.	28
3.3	Il setup usato per la rivelazione dei muoni cosmici. A sinistra il DC Power Analyzer, in alto a destra l'oscilloscopio e in basso a destra lo scintillatore con i due SiPM. Lo scintillatore e i due SiPM sono circondati da un involucro per minimizzare le radiazioni luminose e non che possono colpirli.	29
3.4	Il display dell'oscilloscopio che mostra l'andamento della tensione di uscita del SiPM all'arrivo di un muone.	30
3.5	Grafico ottenuto a partire dai dati raccolti dall'oscilloscopio che mostra l'andamento della tensione di uscita del SiPM all'arrivo di un muone. In questo caso il grafico è stato trasformato nel suo simmetrico rispetto all'asse delle ascisse per avere una maggiore leggibilità.	30
3.6	Differenza nell'andamento del grafico di un filtro passa-bassa Butterworth con l'aumento o la diminuzione dell'ordine. L'aumento o la diminuzione della pulsazione di taglio sposta, rispettivamente, a destra o sinistra l'inizio della discesa [14].	31
3.7	Grafico ottenuto a partire dall'applicazione di un filtro passa-basso di Butterworth al grafico della Figura 3.5.	32
3.8	Istrogramma dei valori minimi delle misure	33

3.9 Andamento della distribuzione di Landau	34
3.10 Fit della distribuzione di Landau sui valori ottenuti dall'istogramma.	35
3.11 Due esempi di grafici scartati in cui vengono riportati la versione non filtrata e quella filtrata	36
3.12 Iстограмма della distribuzione dei depositi di energia dei muoni con escluse le misure rumorose.	37

ELENCO DELLE FIGURE

Elenco delle tabelle

2.1	Valori delle tensioni nel punto di lavoro stazionario.	14
2.2	Valori delle correnti, delle tensioni e delle transconduttanze dei due BJT. .	15
2.3	Confronto tra valori simulati e valori calcolati.	15

Introduzione

Il presente lavoro di tesi si focalizza sulla progettazione, realizzazione e caratterizzazione di un sistema per la rivelazione di muoni cosmici, particelle subatomiche generate nell'alta atmosfera terrestre a seguito dell'interazione dei raggi cosmici con i nuclei atomici. La rivelazione queste particelle avviene mediante l'impiego di due dispositivi principali: uno scintillatore, in grado di emettere luce quando attraversato dai muoni, e un Silicon Photomultipliers (SiPM), sensore a semiconduttore progettato per rivelare singoli fotoni emessi dallo scintillatore.

Per garantire un funzionamento accurato ed efficiente del sistema di rivelazione, è necessaria una caratterizzazione dettagliata dei SiPM, atta a determinare le finestre operative ottimali, il comportamento del dispositivo in diverse condizioni ambientali e i parametri di funzionamento ideali. Successivamente, i SiPM vengono integrati in un circuito di lettura progettato ad hoc, che viene simulato e realizzato su una scheda a circuito stampato (PCB).

Il sistema così sviluppato viene quindi impiegato per la rivelazione effettiva dei muoni cosmici, consentendo la raccolta e l'analisi dei dati. Il progetto prende ispirazione dall'iniziativa MuonPi, il cui obiettivo è lo studio dei muoni cosmici che raggiungono la superficie terrestre. A tal fine, MuonPi [1] ha sviluppato una rete internazionale di rivelatori di muoni a basso costo, distribuiti in diversi istituti e centri di ricerca in tutto il nord Europa al fine di costruire una rete in grado di monitorare, in tempo reale, il flusso di queste particelle subatomiche e di ricostruirne le tracce. Oltre allo scintillatore e ai SiPM, il sistema prevede l'utilizzo di una scheda Raspberry Pi per la gestione dell'acquisizione e dell'analisi dei dati provenienti dai rivelatori.

Questa tesi si propone di sviluppare un sistema di rivelazione economico ed efficace per lo studio dei muoni cosmici, sulla base delle tecnologie e dei principi ispirati dal progetto MuonPi.

INTRODUZIONE

Capitolo 1

Caratterizzazione sperimentale di SiPM

1.1 Analisi e funzionamento di un SiPM

Il Silicon Photo Multiplier (SiPM) è un dispositivo elettronico che permette di rilevare radiazioni luminose con diversi livelli di intensità e di convertire questa grandezza fisica in corrente elettrica con la possibilità di rivelare singoli fotoni. Il SiPM è un dispositivo allo stato solido, basato cioè sull'uso di semiconduttori come materiali di costruzione (in questo caso il silicio), gode perciò di ottime proprietà quali una bassa tensione di alimentazione, insensibilità ai campi magnetici, ottima robustezza meccanica e uniformità di risposta [2]. Come si può vedere dalla Figura 1.1, il SiPM è composto da una matrice di fotodiodi, chiamati Single-Photon Avalanche Diode (SPAD), che verranno analizzati a breve. I fotodiodi sono dispositivi a semiconduttore formati da una giunzione p-n (Figura 1.2).

La giunzione p-n che realizza il fotodiodo è responsabile della generazione della corrente elettrica. Quando un fotone colpisce il silicio drogato presente nel fotodiodo, trasferisce la sua energia agli elettroni che passano dalla banda di valenza a quella di conduzione creando una lacuna positiva. Applicando al dispositivo una tensione di polarizzazione inversa, con tensione al catodo maggiore di quella all'anodo, gli elettroni sono attratti verso il catodo e le lacune verso l'anodo creando così una corrente all'interno del fotodiodo. Il valore della corrente è proporzionale all'energia trasportata dal fotone, a sua volta inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda secondo l'equazione

$$E = \frac{h}{\lambda} \quad (1.1)$$

dove h è la costante di Planck e λ la lunghezza d'onda. Quando si ha una tensione tra anodo e catodo sufficientemente grande avviene un fenomeno chiamato ionizzazione a impatto, in cui una carica elettrica acquista sufficiente energia cinetica da creare coppie

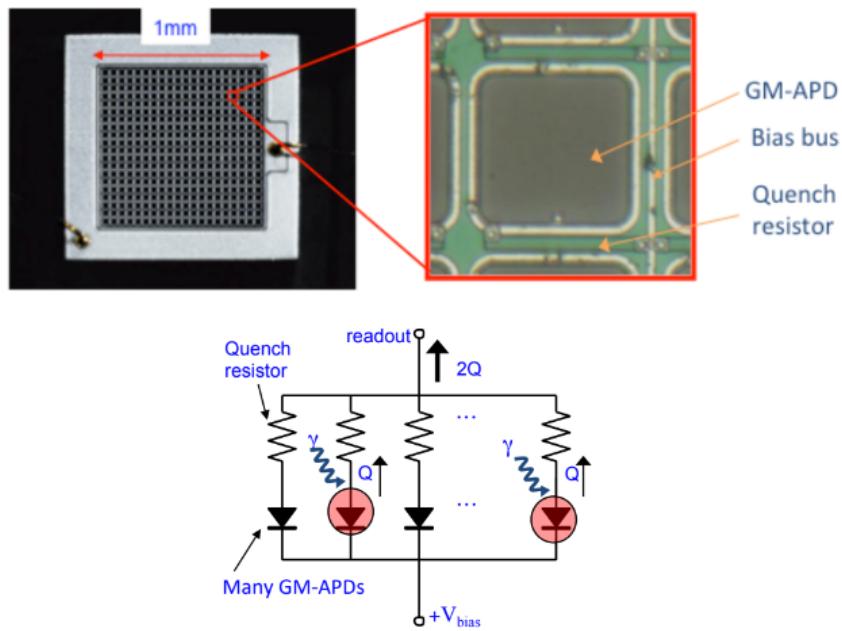


Figura 1.1: Fotografia di un SiPM (sinistra) e di uno SPAD (destra) con il circuito equivalente (sotto) [3].

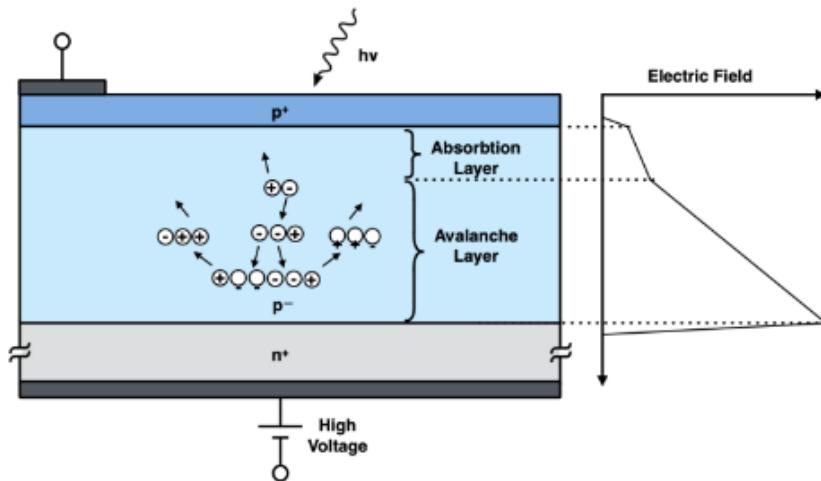


Figura 1.2: Schema strutturale di un SPAD, con a destra il grafico che descrive l'andamento del campo elettrico avvicinandosi al catodo [3].

di cariche secondarie, che a cascata innescano altre ionizzazioni a impatto, amplificando così la corrente generata da un singolo fotone. In questa condizione il fotodiodo si trova in regione di break down ed è estremamente conduttivo. Questo processo è chiamato scarica Geiger e un fotodiodo che opera in questa modalità è detto SPAD. Una volta che la corrente scorre in questi dispositivi può essere necessario fermarla, per farlo si collega una resistenza, chiamata resistenza di quenching (R_Q) in serie al fotodiodo, che limita la corrente assorbita dal diodo nella regione di break down, abbassando così la tensione

applicata ai capi del fotodiodo ad un valore inferiore a quello che permette il processo di polarizzazione a cascata, riportando il diodo nella condizione di rilevare altri fotoni. È importante notare che, nel SiPM, ogni sottocircuito SPAD- R_Q , chiamato microcella, è indipendente, quindi ogni volta che avviene la ionizzazione a cascata, questa è isolata al solo fotodiodo innescato [2]. Le altre microcelle, nel caso di arrivo di un singolo fotone, restano disponibili per l'attivazione. Questa configurazione consente di distinguere radiazioni luminose di intensità diverse. Infatti un'intensità maggiore comporta un numero di fotoni maggiore e quindi l'attivazione contemporanea di più microcelle, le cui correnti in uscita si sommano a formare una corrente d'uscita dal SiPM maggiore. Nella Figura 1.3 è possibile osservare l'andamento della corrente che scorre nel fotodiodo in funzione del tempo insieme alla caratteristica I-V in cui sono descritte le regioni di funzionamento. La corrente che scorre nel fotodiodo, quando questo viene attraversato dal fotone, raggiunge il suo valore massimo in un tempo inferiore a 1 ns per poi diminuire con una costante di tempo pari a $\tau_f = R_Q C_D$, dove C_D è la capacità del volume di valanga, propria di ogni SPAD. Il processo appena descritto avviene solo se viene applicata una tensione di polarizzazione inversa ai capi del fotodiodo $V_{bias} > V_B$ dove V_B è la tensione di soglia propria del fotodiodo, come viene mostrato nella figura a destra: a partire dal valore di $V_{bias} > V_B$ viene innescato il ciclo di funzionamento a cascata della microcella [3].

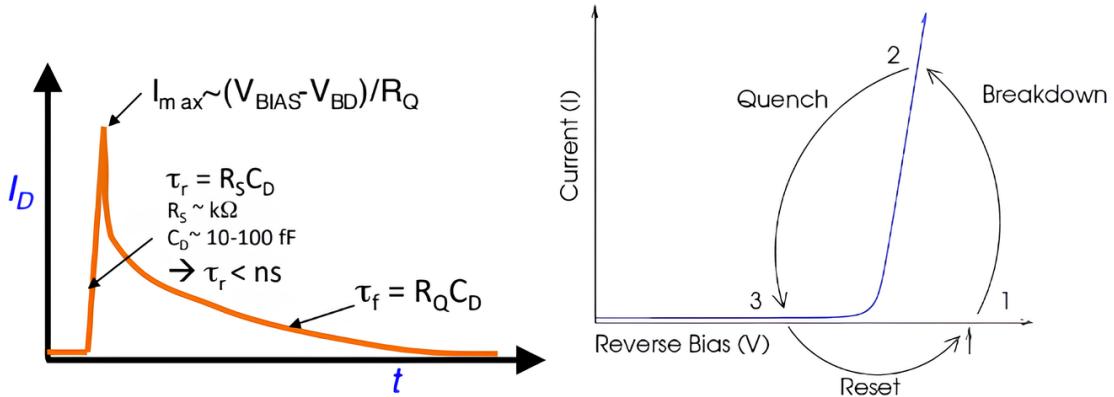


Figura 1.3: Andamento nel dominio del tempo del ciclo breakdown-quench-reset (sinistra) e regioni di funzionamento nella caratteristica I-V (destra). In quest'ultima immagine il valore V_B è indicato dalla freccia tra Reset e Breakdown.

Il SiPM viene utilizzato in molte applicazioni, come nel caso preso in esame in questo lavoro, in combinazione con un altro dispositivo chiamato scintillatore. Uno scintillatore è costituito da un materiale che emette impulsi di radiazione luminosa quando viene attraversato da particelle ad alta energia. Questa configurazione permette di avere, al passaggio di un muone attraverso lo scintillatore, una radiazione luminosa in uscita da quest'ultimo che viene poi rilevata dal SiPM e convertita in una grandezza elettrica. Il tipo di SiPM utilizzato e il suo schema circuitale sono mostrati nella Figura 1.4

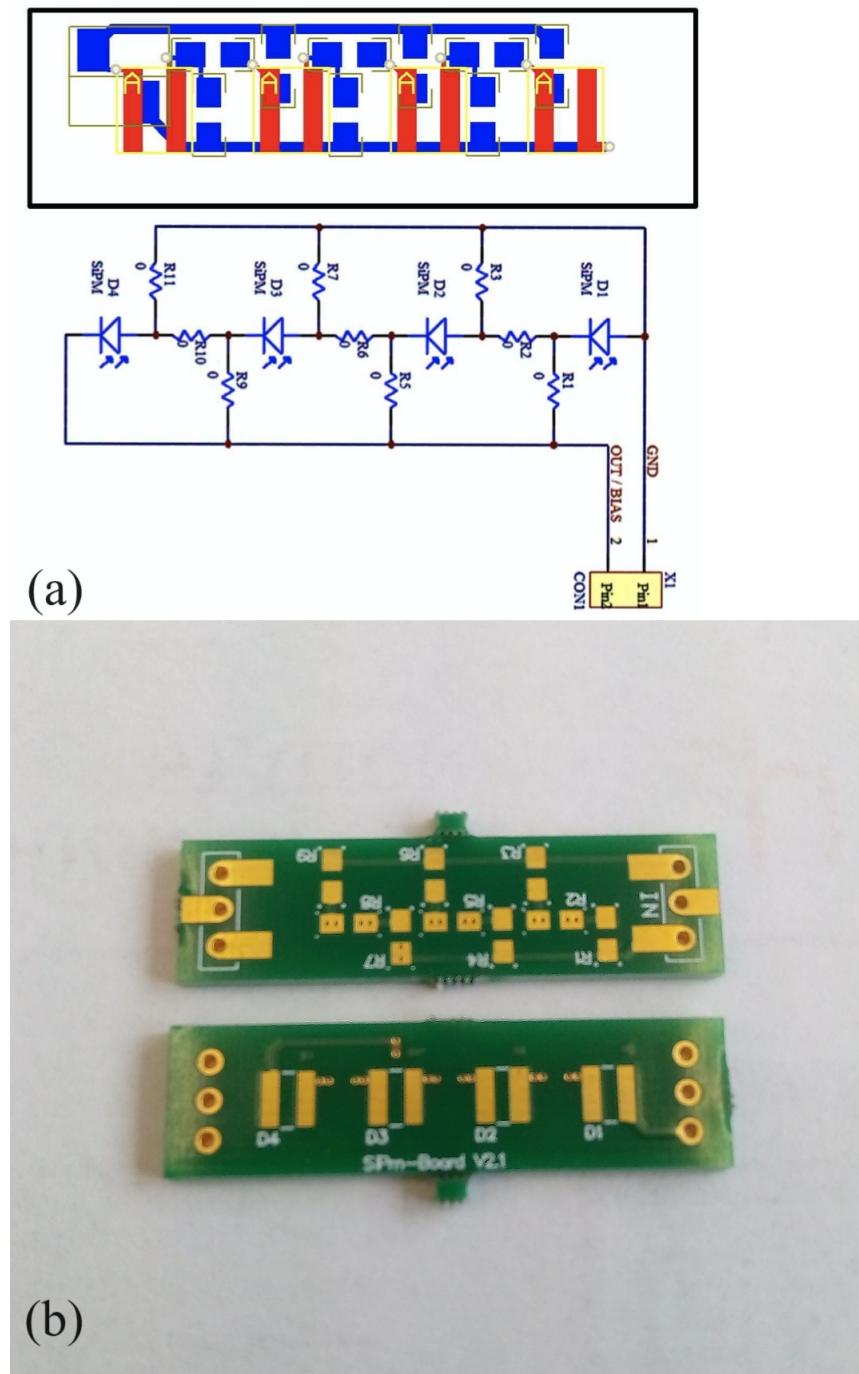


Figura 1.4: a) Schematico della SiPM board usata nel progetto MuonPi. b) Fotografia di un SiPM [4].

Il SiPM è un dispositivo che ha bisogno di alimentazione per poter funzionare, perciò il primo passo da seguire per allestire il circuito funzionante è caratterizzare il SiPM, stabilire cioè quale deve essere il valore di tensione da fornire affinché la giunzione p-n dei fotodiodi operi nella regione di funzionamento corretta. Il valore della tensione di alimentazione deve essere quindi maggiore del valore di soglia del fotodiodo.

1.2 Descrizione del setup di misura

Per determinare la tensione di alimentazione e la polarità del dispositivo, si utilizza un dispositivo che possa fornire una tensione controllabile, in questo caso è stato utilizzato un dispositivo chiamato DC Power Analyzer (Keysight N6705C DC Power Analyzer) che è in grado di fornire e misurare una tensione in corrente continua stabile ad un circuito cui è collegato. L'utilizzo di questo dispositivo permette anche il controllo da remoto con un calcolatore attraverso la comunicazione USB. Il power supply utilizzato è dotato di quattro canali utilizzabili sia in input che in output. In questo caso è stato utilizzato solo uno dei quattro canali in configurazione output. In questo modo è possibile impostare con precisione il valore di tensione e la corrente massima erogabile dal power supply. La configurazione completa è quella mostrata nella Figura 1.5. Per facilitare

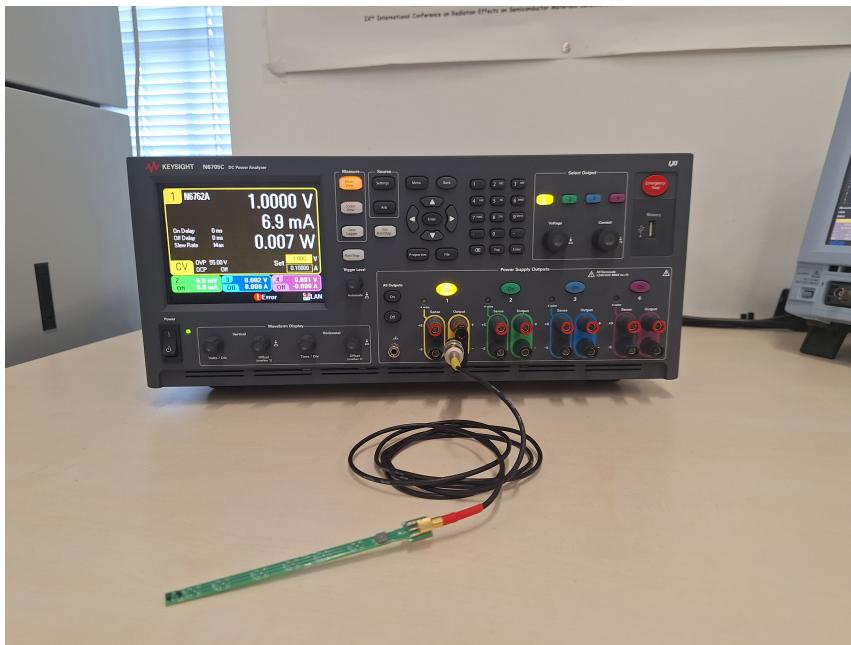


Figura 1.5: Setup utilizzato per determinare la caratteristica tensione corrente del SiPM. In primo piano il SiPM collegato attraverso un cavo di tipo BNC con connettore Lemo al DC Power Analyzer che si vede in secondo piano. Sul display di quest'ultimo si notano i valori di tensione e corrente erogati.

la comunicazione, si è deciso di realizzare un testbench software in linguaggio Python data la vasta disponibilità di librerie e codici. Usando il modulo `pyvisa`, è possibile conoscere e controllare tutti i dispositivi di misura connessi al calcolatore che esegue il codice indipendentemente dalla loro interfaccia di comunicazione. Utilizzando questo modulo è quindi possibile controllare il DC Power Analyzer accendendo o spegnendo un canale e leggendo o scrivendo il livello di tensione e di corrente in uscita dal canale. Sono state create quindi delle funzioni per facilitare questo processo. Con questi strumenti è possibile, sempre utilizzando un codice Python, procedere con la caratterizzazione del

SiPM. La caratterizzazione è un processo il cui obiettivo è stabilire le caratteristiche che descrivono il comportamento di un dispositivo elettronico. Nel caso del SiPM, si vuole stabilire l'andamento della caratteristica tensione-corrente (comunemente indicata come caratteristica I-V) da cui è possibile dedurre la soglia minima di funzionamento, la funzione di trasferimento, cioè la legge, che lega la tensione di alimentazione con la massima corrente erogata e la resistenza di quenching. Per ottenere questi dati, si varia la tensione erogata dal DC Voltage Analyzer partendo da 0 mV e con uno step di 10 mV ogni 2 s fino al valore di 1 V, oltre il quale il SiPM potrebbe non funzionare più correttamente. A questo punto, si misurano la corrente erogata dal SiPM e la tensione applicata dal power supply usando il modulo `pyvisa`. I dati ottenuti vengono salvati su un file `csv` grazie all'omonimo modulo di Python. Le misure vengono poi utilizzate per la costruzione del grafico I-V disegnato dall'interfaccia `Pyplot` presente nella libreria `Matplotlib`.

1.3 Risultati delle misure effettuate

Usando il setup descritto nella sezione 1.2 si ottiene l'andamento indicato nella Figura 1.6.

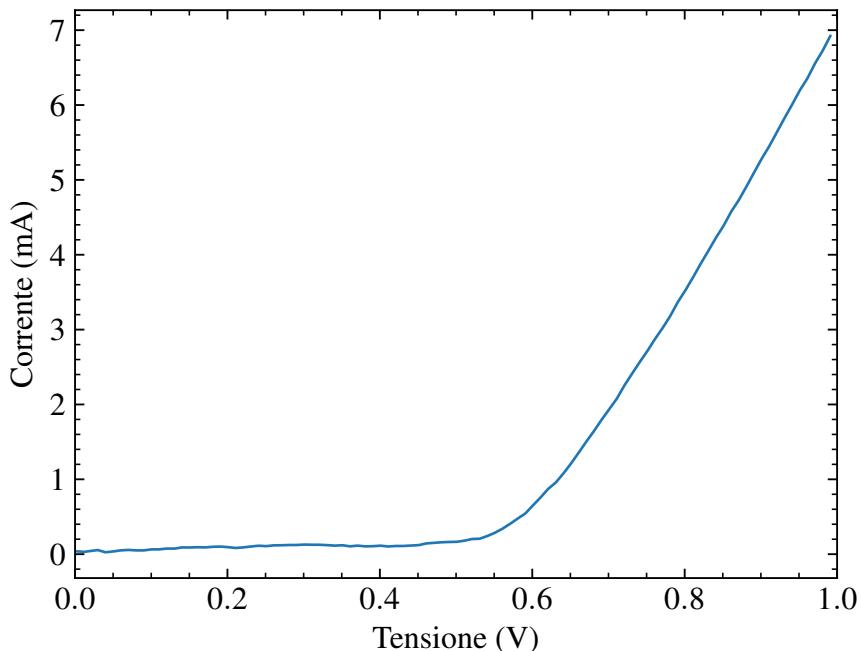


Figura 1.6: Caratteristica tensione-corrente del SiPM misurata tra 0 V e 1 V con il solo SiPM collegato al DC Power Analyzer

Osservando il grafico si nota un andamento lineare a partire da circa 0.7 V, mentre per valori più bassi si ha una corrente pari a circa 0 A, condizione che si verifica quando il SiPM è spento. Il valore 0.7 V è quindi la soglia della funzione di trasferimento, cioè il

minimo valore di tensione che si può fornire al SiPM per far sì che questo funzioni. Per ottenere la funzione di trasferimento nella regione in cui si ha andamento lineare, cioè la regione in cui il SiPM è attivo, da cui poi è possibile ricavare il valore della resistenza di quenching, si filtra il dataset includendo solo le misure a tensione maggiore di 0.7 V. È utile in questi casi snellire il dataset eliminando una misura su due per ottenere risultati più simili alla realtà. Il modulo di Python `scipy` permette di effettuare entrambe queste operazioni. A questo punto si effettua un'interpolazione lineare usando la funzione fornita sempre dal modulo `scipy` per ottenere il coefficiente angolare e la quota del modello lineare che descrive la caratteristica I-V. I valori sono indicati nella Figura 1.7 che mostra graficamente la parte lineare della caratteristica I-V. Uno strumento utile per stabilire la

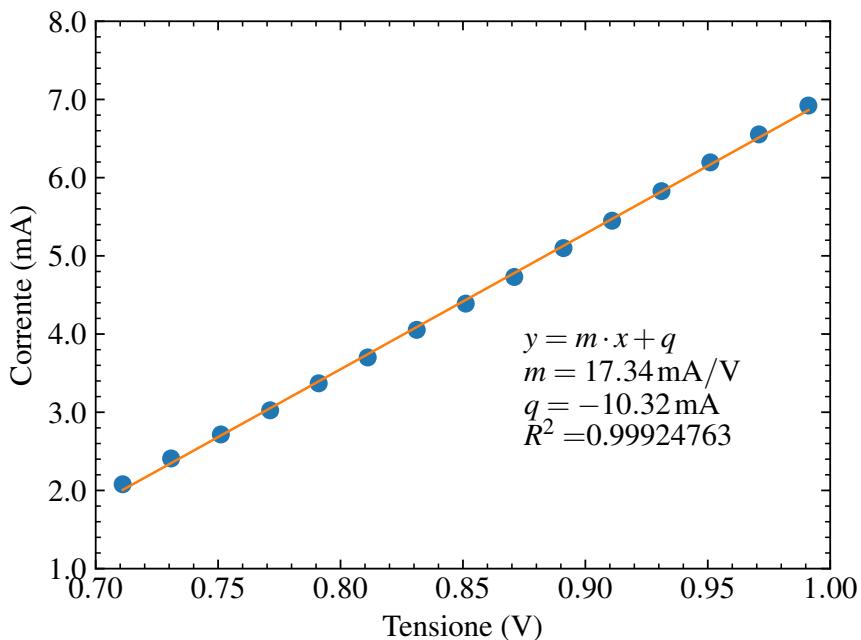


Figura 1.7: Caratteristica tensione-corrente del SiPM misurata tra 0.7 V e 1 V con il solo SiPM collegato al DC Power Analyzer, si apprezza l'andamento lineare e la corrispondenza tra modello lineare e risultati empirici oltre ai valori di coefficiente angolare e quota del modello.

bontà del modello statistico utilizzato è il coefficiente di determinazione R^2 , che si ottiene direttamente usando la funzione fornita dal modulo `scipy`. In questo caso, il valore di $R^2 = 0.999$ ci permette di affermare che il modello lineare utilizzato rappresenta in modo ottimo il reale andamento dei dati. Per ricavare la resistenza di quenching (R_Q), è sufficiente osservare che il grafico nella Figura 1.7 si riferisce ad una regione in cui si ha una proporzionalità diretta tra tensione e corrente. Dalla Figura 1.3 si vede che la regione in cui ciò avviene è la regione di quench. Essendo tensione e corrente proporzionali, seguono quindi la prima legge di Ohm:

$$V = R \cdot I \quad (1.2)$$

L'equazione ottenuta attraverso l'interpolazione lineare ci permette di esprimere la corrente in funzione della tensione, è cioè l'inverso della legge di Ohm. Ne deriva che

$$m = \frac{dI}{dV} \quad (1.3)$$

mentre la resistenza di quenching si può calcolare come

$$R_Q = \frac{dV}{dI} = \frac{1}{m} = \frac{1}{17.34 \text{ mA/V}} = 57.67 \Omega \quad (1.4)$$

L'equazione Equazione 1.4 per calcolare la R_Q poteva essere dedotta anche analizzando il circuito mostrato in Figura 1.8. Effettuando un bilanciamento di correnti al nodo *OUT* si ottiene l'Equazione 1.5, da cui si ricava la Equazione 1.6, che è equivalente a quanto ottenuto nell'Equazione 1.4

$$I_D = \frac{V_{\text{bias}}}{R_Q} \quad (1.5)$$

$$R_Q = \frac{V_{\text{bias}}}{I_D} \quad (1.6)$$

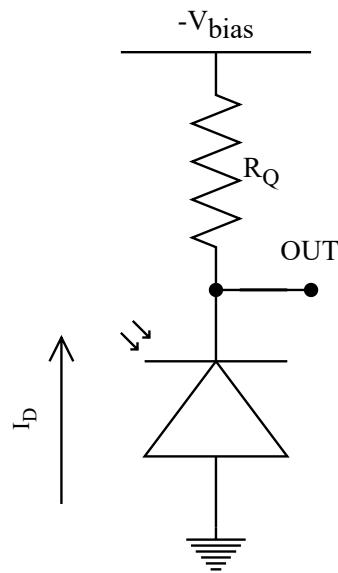


Figura 1.8: Schematico di una microcella

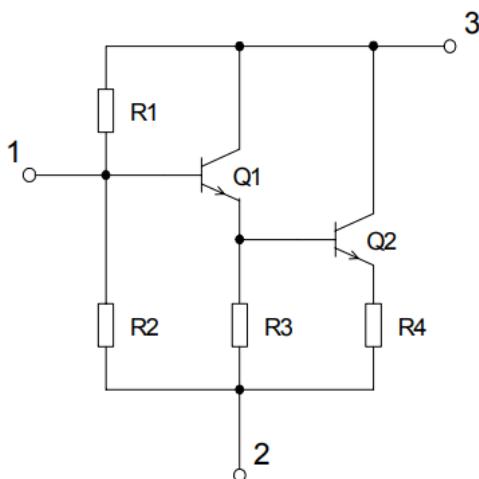
Capitolo 2

Simulazione di reti di condizionamento per la lettura di SiPM

I segnali in uscita dal SiPM non hanno un’ampiezza tale da essere apprezzati dalla MuonPi Board. È quindi necessario utilizzare un circuito detto preamplificatore il più vicino possibile al SiPM per evitare di amplificare rumore. Il preamplificatore deve avere le seguenti caratteristiche:

- amplificare il segnale in uscita dal SiPM di circa 20 dB;
- fornire la tensione di polarizzazione al SiPM;
- AC-coupling dell’input del preamplificatore.
- avere una tensione di alimentazione di circa 5 V.

[4] Una possibile soluzione per la realizzazione di un circuito che rispetti i vincoli appena elencati si basa su un dispositivo di tipo commerciale chiamato BGA614. Quest’ultimo è prodotto dall’azienda Infineon Technologies e rientra nella tipologia di ciruciti integrati detti MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit), che operano cioè a frequenze dell’ordine delle microonde (da 300 MHz a 300 GHz). Il BGA614 è l’elemento circuitale che garantisce al circuito un guadagno di circa 20 dB a frequenze pari a 1 GHz ed è ottimizzato per corrente di ingresso tipiche di 40 mA [5]. Dal punto di vista circuitale si compone, come mostrato nella Figura 2.1, di due transistor BJT, di cui il Q_1 della figura in configurazione emitter follower. Si osserva che i due transistor BJT sono in una configurazione simile a quella di Darlington (Figura 2.2) eccezion fatta per la resistenza R_3 , facendo intuire quindi un comportamento simile. In questo tipo di circuiti, la corrente $I_C = \beta_{EQ} * I_B$, dove $\beta_{EQ} = \beta_1 \cdot \beta_2 + \beta_1 + \beta_2$. Si tratta quindi di un amplificatore. Uno svantaggio di questa configurazione è quello di avere una tensione $V_{BE} = V_{BE_1} + V_{BE_2}$,



Q1	T1
Q2	T1 (area factor: 0.5)
R1	600Ω
R2	2000Ω
R3	100Ω
R4	4Ω

Figura 2.1: Schema circuitale del BGA614. I pin 1 e 3 vanno collegati al circuito mentre il pin 2 va collegato a massa.

quindi una tensione di soglia maggiore rispetto a quella che si avrebbe con un solo transistor. Altro svantaggio risiede nel fatto di avere un tempo di risposta minore.

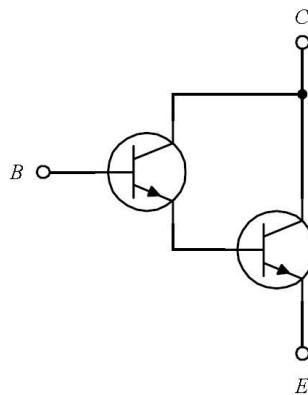


Figura 2.2: Schema circuitale della configurazione Darlington [6].

Considerando quanto detto fino ad ora, l'intero circuito di preamplificazione è quello che appare nella Figura 2.3. Per comprendere a meglio il funzionamento del circuito, si è deciso di simularlo usando il programma LTSpice e di risolverlo mediante l'uso di equazioni. Per poter simulare il circuito con LTSpice è sufficiente inserire nello schematico, presente all'apertura del programma, i componenti del circuito con i loro valori, che in questo caso si trovano sullo schematico fornito dal progetto MuonPi, e scegliere il tipo di simulazione da effettuare. A questo punto, il programma creerà un file chiamato *netlist* nel quale sono presenti tutte le direttive per la costruzione e la simulazione del circuito. Nel caso preso in esame si è interessati alla simulazione del punto di lavoro stazionario, del comportamento di piccolo segnale e della risposta in transitorio, quest'ultima necessaria per capire come il circuito si comporta all'arrivo del

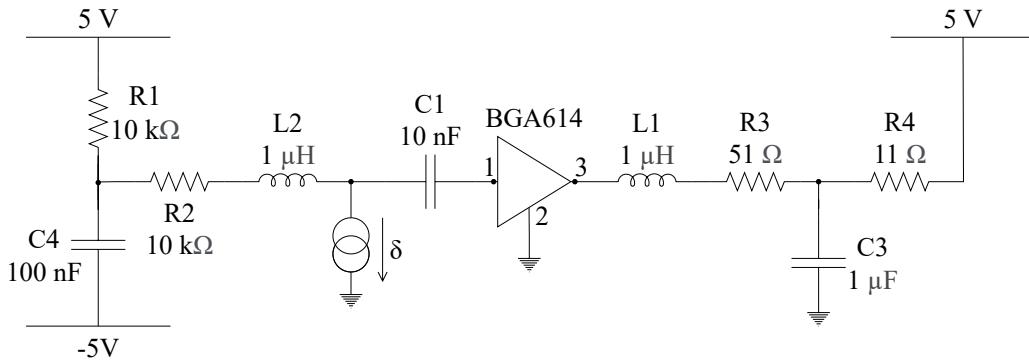


Figura 2.3: Schema circuitale del preamplificatore. Il generatore di corrente δ è il modello del sottosistema SiPM-scintillatore.

segnaletico a gradino proveniente dal sensore costituito da scintillatore e SiPM. Per risolvere matematicamente il circuito, invece, occorre effettuare due tipologie di analisi: l’analisi delle componenti stazionarie (punto di lavoro stazionario) e l’analisi delle componenti di segnale in frequenza (analisi di piccolo segnale). Per risolvere il punto di lavoro stazionario per circuiti con all’interno transistor BJT sono necessarie una serie di assunzioni per non rendere i calcoli estremamente complessi. Per esempio, si assume normalmente che la tensione tra base ed emettitore V_{BE} sia pari a 0.6 V. Assunzioni come la precedente causano la generazione di una serie di approssimazioni che a cascata rendono i calcoli teorici leggermente diversi dai risultati simulati, dato che quest’ultimi tengono conto delle equazioni complete. Per questo motivo verranno riportati i soli calcoli svolti per l’andamento di piccolo segnale che verranno poi analizzati insieme a quelli ottenuti dai calcoli, mentre per l’analisi del punto di lavoro verranno presi in considerazione solo i risultati ottenuti dalla simulazione.

2.1 Punto di lavoro stazionario

L’obiettivo del calcolo del punto di lavoro stazionario è quella di ottenere il valore in continua di tutte le correnti che scorrono nei rami del circuito e di tutte le tensioni ai nodi e stabilire se il circuito in questa condizione sia acceso o spento. Per esempio, nel caso di circuiti contenenti BJT, come quello analizzato ora, si richiede una tensione tra collettore e emettitore $V_{BE} > 20$ mV. Per fare ciò, bisogna considerare i soli generatori di tensione e corrente in continua, considerando come cortocircuiti i generatori di tensione alternata e come circuiti aperti i generatori di corrente alternata. Inoltre, si cortocircuitano gli induttori e si trasformano in circuiti aperti i condensatori. Dopo queste operazioni, il circuito appare come quello della Figura 2.4. Per simulare il punto di lavoro stazionario

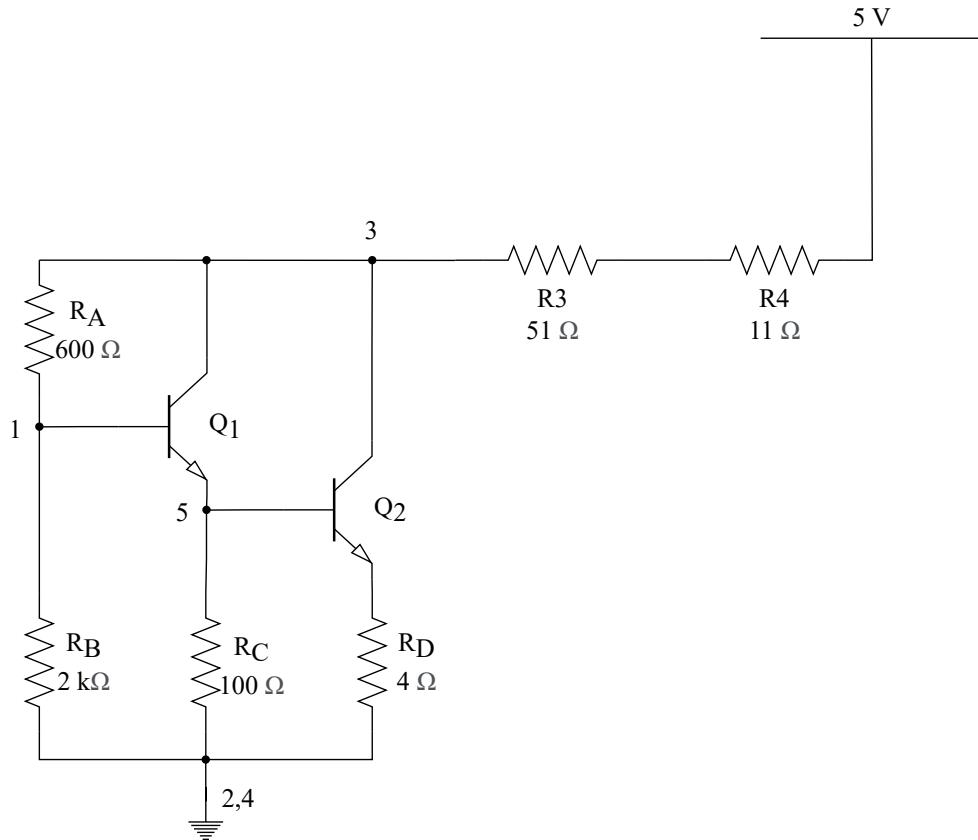


Figura 2.4: Schema circuitale del preamplificatore in DC.

utilizzando LTSpice è sufficiente la direttiva `.op`. I risultati della simulazione si trovano all'interno di un file di log e sono riportati nella Tabella 2.1, mentre nella Tabella 2.2 sono riportati i valori delle grandezze elettriche proprie dei transistor BJT Q_1 e Q_2 . Facendo

Tensione	Valore
V_3	2.52 V
V_1	1.80 V
V_5	0.99 V

Tabella 2.1: Valori delle tensioni nel punto di lavoro stazionario.

riferimento al circuito nella Figura 2.4, sono rilevanti principalmente i valori di tensione del nodo 3, ai valori delle due transconduttanze g_m e ai valori di tensione tra collettore e emettitore V_{CE} nei due transistor. In particolare si vede che per entrambi i transistor $V_{CE} > 20 \text{ mV}$, perciò si deduce che entrambi i transistor sono in regione attiva diretta, amplificando così la corrente applicata sulla base secondo l'equazione $I_C = \beta \cdot I_B$, dove

Parametro	Q_1	Q_2
I_C	10.62 mA	28.21 mA
I_B	0.30 mA	0.98 mA
V_{BE}	0.80 V	0.88 V
V_{CE}	1.52 V	2.40 V
β	34.90	28.80
g_m	$0.37 \Omega^{-1}$	$0.912 \Omega^{-1}$

Tabella 2.2: Valori delle correnti, delle tensioni e delle transconduttanze dei due BJT.

β è detto guadagno di corrente ed è proprio di ogni transistor. Sostituendo i valori di β e I_B presenti nella Tabella 2.2, è possibile verificare se l'equazione $I_C = \beta \cdot I_B$ è corretta o si tratta di una approssimazione eccessiva. Dalla Tabella 2.3 emerge un errore relativo bassissimo, perciò la formula per il calcolo della I_C è molto coerente con quanto avviene nella simulazione.

Grandezza elettrica	Valore simulato	Valore calcolato	Errore relativo
$I_C(Q_1)$	10.62 mA	10.60 mA	0.12 %
$I_C(Q_2)$	28.22 mA	10.24 mA	0.07 %

Tabella 2.3: Confronto tra valori simulati e valori calcolati.

2.2 Analisi di piccolo segnale

L'obiettivo dell'analisi di piccolo segnale è di trovare la funzione di trasferimento che lega la tensione presente nel nodo di ingresso alla tensione presente nel nodo di uscita. Per fare ciò, occorre trasformare tutte le grandezze elettriche presenti nel circuito nel loro equivalente nel dominio delle frequenze: i generatori di corrente continua diventano dei circuiti aperti, i generatori di tensione continua diventano dei cortocircuiti e, nel caso del circuito preso in analisi, ogni transistor BJT in regione attiva diretta viene sostituito da un generatore di corrente tra il collettore e l'emettitore, il cui valore è dato dall'equazione $i_c = g_m \cdot v_{be}$. Il modello per descrivere il BJT è quello utilizzato nei calcoli svolti e vale sotto due approssimazioni: si suppone $\beta \rightarrow \infty$ e si suppone una corrente di collettore indipendente dalla tensione tra collettore e emettitore V_{CE} . La potenza di calcolo del simulatore permette, invece, di usare un modello più complesso per il BJT che non tiene conto delle approssimazioni appena descritte. Così facendo occorre inserire due

resistenze: una tra base ed emettitore $r_\pi = \frac{\beta}{g_m}$ e una tra collettore e emettitore in parallelo al generatore di tensione $r_{ce} = \frac{V_{AF}+V_{BC}}{I_C}$, dove V_{AF} è la tensione di Early diretta che assume generalmente valori da alcune decine ad alcune centinaia di volt [7]. Nella Figura 2.5 si vede la differenza circuitale tra i due modelli. A questo punto, il circuito di cui viene fatta la risoluzione mediante equazioni è modellizzato dalla Figura 2.6.

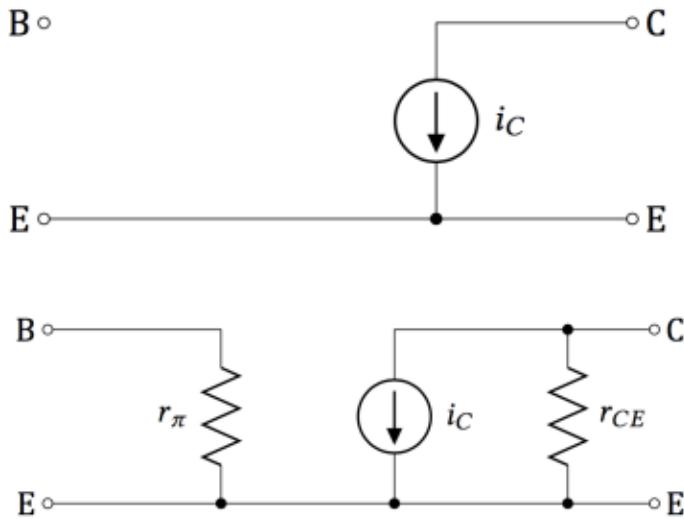


Figura 2.5: In alto il modello in AC del BJT in cui vengono considerate le approssimazioni, sotto il modello usato dal simulatore senza approssimazioni, con la presenza delle due resistenze r_π e r_{ce} .

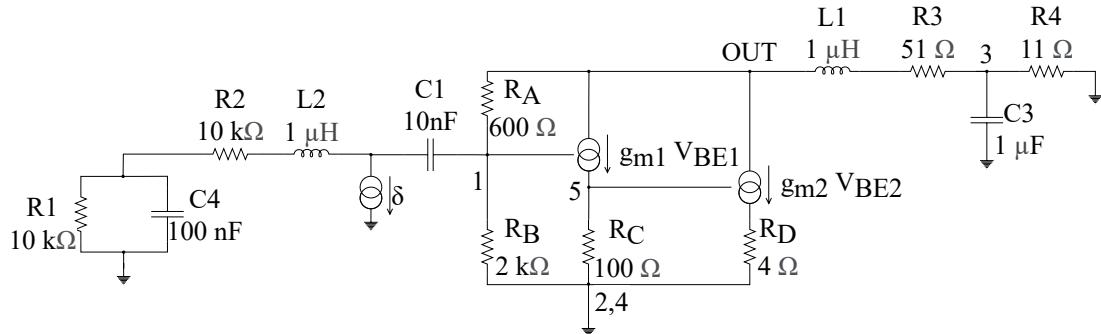


Figura 2.6: Schema circuitale del preamplificatore in AC.

Osservando i valori degli induttori L_1 e L_2 e del condensatore C_1 e considerando che ci troviamo a frequenze dell'ordine dei GHz, possiamo assumere $\omega \rightarrow \infty$. Sapendo che per calcolare le impedenze induttive vale $Z_L = j\omega L$ e per quelle capacitive $Z_C = \frac{1}{j\omega C}$, è possibile modellizzare i condensatori come cortocircuiti e gli induttori come circuiti aperti trasformando il circuito come in Figura 2.7 e semplificando notevolmente i calcoli.

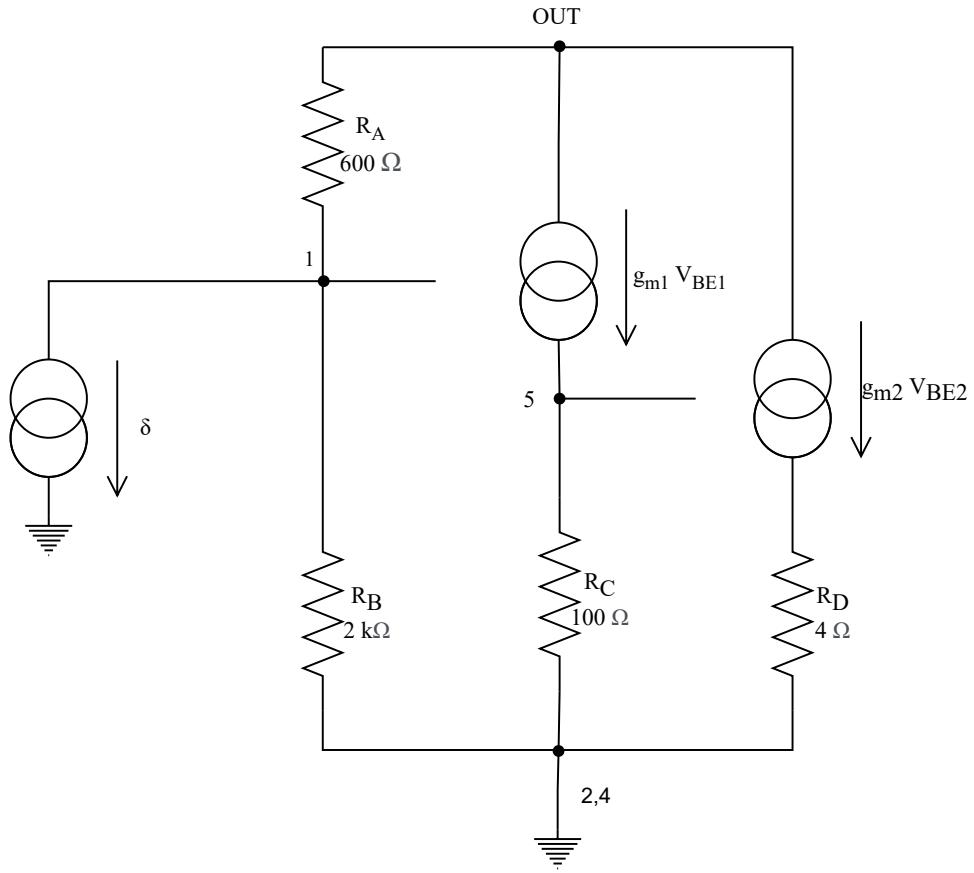


Figura 2.7: Schema circuitale del preamplificatore in AC considerando $\omega \rightarrow \infty$.

Applicando al nodo 1 la legge di Kirchoff ai nodi, si ottengono le Equazione 2.1:

$$\begin{aligned}
 i_A &= \delta + i_B; \\
 \frac{V_{\text{out}} - V_1}{R_A} &= \delta + \frac{V_1}{R_B}; \\
 V_1 &= \frac{R_B V_{\text{out}} - R_A R_B \delta}{R_A + R_B}.
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Osservando il circuito si nota che il transistor Q_1 si trova in configurazione di Emitter

Follower, di conseguenza valgono le Equazione 2.2

$$\begin{aligned}
 i_{C_1} &= g_{m_1}(V_{B_1} - V_{E_1}); \\
 &= g_{m_1} \left(V_1 - \frac{g_{m_1} R_1}{1 + g_{m_1} R_1} V_1 \right) \\
 &= g_{m_1} \frac{1}{1 + g_{m_1} R_1} V_1, \quad \text{con } g_{m_1} R_1 \gg 1; \\
 &= \frac{V_1}{R_1}.
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

Infine, effettuando un bilancio di correnti al nodo *out* otteniamo le Equazione 2.3:

$$\begin{aligned}
 \delta + i_B + i_{C_1} + i_{C_2} &= 0, \quad \text{dalla 2.2} \\
 \delta + \frac{V_1}{R_B} + \frac{V_1}{R_C} + \frac{V_1}{R_D} &= 0; \\
 \delta = - \left(\frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_D} \right) V_1, \quad \text{con } R_D \ll R_C \ll R_B \\
 \delta &= -\frac{V_1}{R_D}.
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Sostituendo poi Equazione 2.1 nella Equazione 2.3 si ricavano le Equazione 2.4:

$$\begin{aligned}
 \delta &= -\frac{R_B}{R_D} \cdot \frac{V_{\text{out}} - R_A \delta}{R_A + R_B}; \\
 \frac{R_D}{R_B} \cdot (R_A + R_B) \delta &= -V_{\text{out}} + R_A \delta; \\
 V_{\text{out}} &= [R_A - R_D(1 + \frac{R_A}{R_B})] \cdot \delta; \\
 V_{\text{out}} &= R_A \left[1 - R_D \left(\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} \right) \right] \cdot \delta
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

Considerando che $R_D(\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B}) = 0,0087 \ll 1$; l'equazione finale è la Equazione 2.5:

$$V_{\text{out}} = R_A \delta \tag{2.5}$$

Si ottiene così la funzione di trasferimento che lega la corrente in uscita dal SiPM alla tensione in uscita dal preamplificatore. Un modo per verificare se i calcoli appena visti sono corretti è quello di confrontare il valore del guadagno della funzione di trasferimento ottenuto simulando il circuito con LTSpice con il valore del guadagno della Equazione 2.5. Si verifica che $\left| \frac{V_{\text{out}}}{\delta} \right|_{\text{dB}} = 55 \text{ dB}$. Per effettuare l'analisi in AC del circuito in Figura 2.3 è sufficiente la direttiva `.ac dec 20 0.01 10G` con l'accortezza di assegnare al generatore di corrente δ il valore 1 con la direttiva `AC 1` dopo la sua definizione nella `netlist`. La direttiva permette di visualizzare i diagramma di Bode della funzioni di trasferimento da

δ al nodo selezionato. I parametri della direttiva indicano che la simulazione resituirà 20 punti per decade da una frequenza di 0.01 Hz a una di 10 GHz. Selezionando il nodo 3, si ottengono i diagrammi nella Figura 2.8. Come si può osservare, il circuito si comporta come un filtro passa-alto con una frequenza di taglio $\omega_0 \approx 8$ kHz, avendo un guadagno crescente fino al valore ω_0 per poi rimanere costante intorno al valore di 55 dB, concorde con quanto calcolato precedentemente. Inoltre, osservando il diagramma della fase, si nota che diminuisce passando da 90° a 0° , andamento concorde a quello del filtro passa-alto. Quindi, come previsto, il circuito preso in analisi si comporta come un amplificatore per alte frequenze.

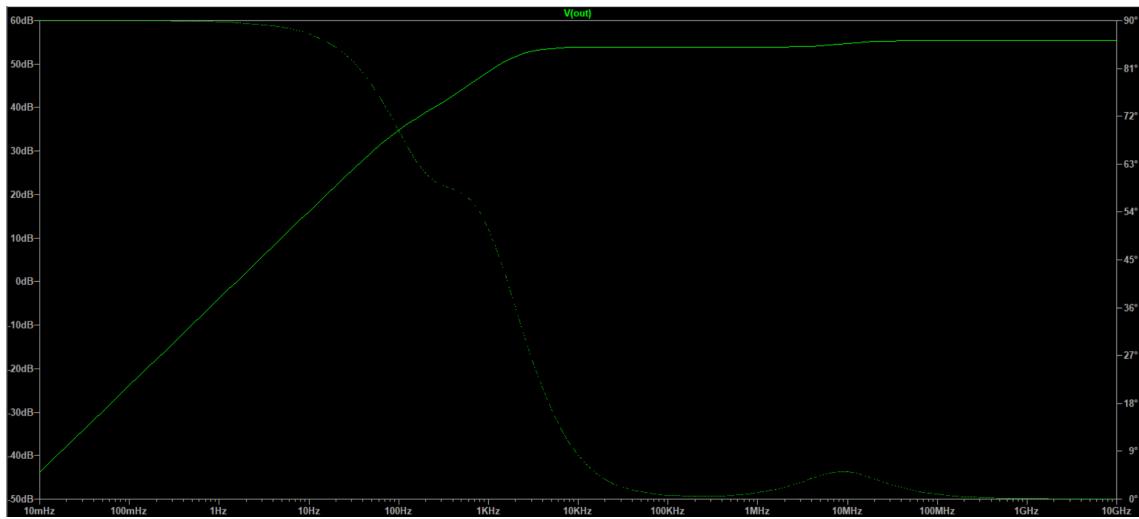


Figura 2.8: Diagrammi di Bode della funzione di trasferimento $\frac{V_{\text{out}}}{\delta}$. In linea continua il diagramma del guadagno, in linea tratteggiata quello della fase.

2.3 Analisi nel dominio del tempo

Per capire come si comporta il circuito all’arrivo di un muone, occorre effettuare un’analisi detta in transitorio in cui si vuole ottenere l’andamento della tensione d’uscita in funzione nel tempo. Per farlo, usando LTSPice, è necessario modellizzare il comportamento del sottocircuito SiPM-scintillatore. Da dati raccolti empiricamente, in uscita dal sottocircuito si ha una corrente che segue un andamento a gradino, con un intervallo di tempo tra salita e discesa di circa una decina di nanosecondi e valore massimo dipendente dall’energia trasportata dal muone. Per modellizzare questo comportamento occorre scrivere, dopo la definizione del generatore di corrente δ , `PULSE(0 Id 1n 1n 1n 9n)` che definisce un gradino con valore minimo di 0 A, valore massimo uguale a quello contenuto nella variabile `Id`, che verrà definita successivamente, ritardo rispetto l’inizio della simulazione di 1 ns, tempo di salita e discesa di 1 ns e tempo in cui il generatore eroga il valore massimo

di corrente di 9 ns. La variabile `Id` è definita secondo la direttiva `.step param Id 0 20m 0.5m` secondo la quale la variabile assumerà tutti i valori compresi tra 0 e 20 mA con un incremento di 0.5 mA. Per simulare l'andamento del circuito in transitorio la direttiva è `.tran 0 20n 0`: il software simulerà il circuito tra 0 e 2 ns salvando i dati da 0 s. Selezionando il nodo 3 nel circuito in Figura 2.3, si ottiene il grafico della Figura 2.9. Come si può vedere, il circuito, per certi valori di corrente ha un andamento difficile da definire. È utile allora in questo caso stabilire la caratteristica I-V che lega la corrente in ingresso alla tensione in uscita. Dal grafico si vede che il valore della tensione d'uscita dipende dall'istante di tempo e dal valore della corrente in ingresso. Non potendo rappresentare la tensione con entrambi i parametri, si è deciso di rappresentare la caratteristica I-V a 7 ns. Il motivo è che il valore si trova circa a metà del tempo di corrente massima. Per fare ciò, occorre scrivere la direttiva `.meas TRAN result FIND V(out) AT 7n`, si ottiene così il grafico della Figura 2.10.

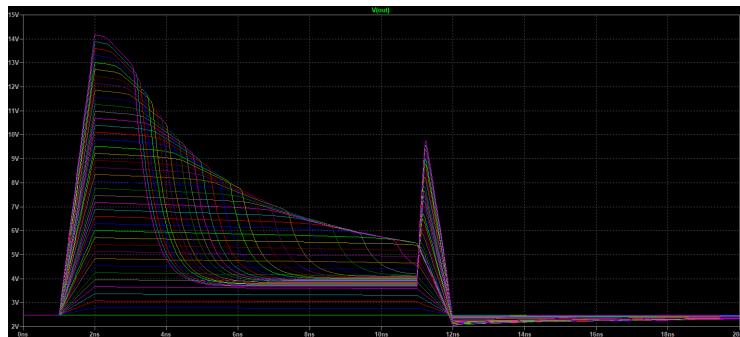


Figura 2.9: Andamento in transitorio del nodo 3 del preamplificatore.

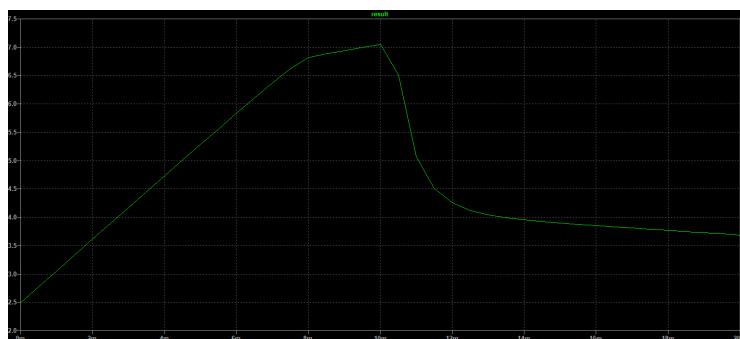


Figura 2.10: Caratteristica I-V del preamplificatore per valori di corrente compresi tra 0 A e 20 mA.

Osservando il grafico si nota un andamento lineare tra 0 e 8 mA. Questa è la zona di interesse, in cui il circuito ha l'andamento migliore per svolgere poi eventuali elaborazioni sui dati ottenuti. È lecito, infatti, aspettarsi una proporzionalità diretta tra l'energia trasportata dal muone e il valore di tensione in uscita dal preamplificatore. Restringendo quindi il grafico della Figura 2.10 tra 0 A e 8 mA si ottiene il grafico della Figura 2.11.

Calcolando il valore del coefficiente angolare dal grafico si ottiene $m = 600 \text{ V/A} = R_A$, come previsto dall'analisi del circuito in AC.



Figura 2.11: Caratteristica I-V del preamplificatore per valori di corrente compresi tra 0 A e 8 mA.

2.4 Progettazione della PCB

Le simulazioni e i calcoli visti sono utili per comprendere il funzionamento del circuito e facilitare la sua realizzazione. Per poter utilizzare il circuito preso in esame è necessario progettare la Printed Circuit Board (PCB) o circuito stampato. Un circuito stampato è un supporto usato per connettere i componenti di un circuito tramite dei conduttori, chiamati piste, incisi su un materiale non conduttivo. Per fare ciò si è utilizzato EAGLE, un software, distribuito da Autodesk, facente parte della categoria di strumenti per progettare e produrre sistemi elettronici (EDA, ossia Electronic Design Automation). Questo software permette ai progettisti di PCB di connettere tra di loro lo schematico del circuito, il posizionamento delle componenti e il PCB routing, cioè il collegamento dei componenti.

La prima fase dello sviluppo di una PCB con EAGLE è la realizzazione dello schematico. Nel caso preso in esame, lo schematico appare come nella Figura 2.12. Rispetto al circuito della Figura 2.3, si ha la presenza di quattro componenti con il prefisso JP e l'assenza dei generatori di tensione e di quello di corrente. I generatori di tensioni mancano perché non è possibile collocarli sulla PCB; ma è necessario fornire l'alimentazione dall'esterno. Il generatore di corrente era un modello per descrivere il comportamento del sottocircuito SiPM-scintillatore, che, come i generatori di tensione, può essere visto come collegato dall'esterno. Per connettere dei dispositivi tra loro è necessario disporre dei connettori, indicati nello schematico proprio dal prefisso JP. In particolare, il connettore JP1 connette il SiPM-scintillatore al preamplificatore attraverso il morsetto 1 e riceve le tensioni di alimentazione per il SiPM dai connettori 2 e 3. Il connettore JP2 fornisce ancora l'alimentazione al circuito, il connettore JP3 è connesso ai generatori di tensione e il connettore JP4 riceve la tensione del nodo di uscita. Disegnando lo schematico è

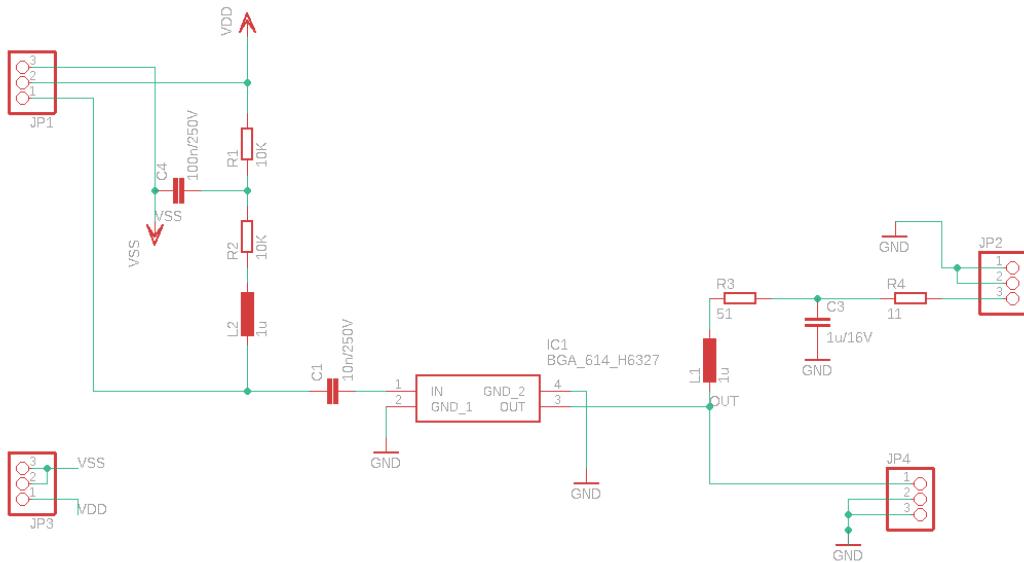


Figura 2.12: Schematico del preamplificatore in EAGLE.

necessario decidere quale modello del dispositivo, se sono presenti diverse opzioni, montare. Nel caso preso in esame, i componenti su cui c'era più possibilità di scelta erano i resistori, i condensatori e gli induttori. Per ognuno dei tre componenti è possibile scegliere il tipo di montaggio tra due modalità: PTH o SMD. PTH è un acronimo che sta per Pass Through Hole e indica che i dispositivi assemblati in questa maniera sono dotati di piedini che vengono inseriti in alcuni fori presenti nella PCB e saldati dalla parte opposta della scheda. SMD, invece, significa Surface Mounted Device; in questa categoria rientrano i dispositivi che possono venire saldati sullo stesso lato in cui vengono montati senza avere nessun piedino e nessun foro nella PCB. Quest'ultimi dispositivi, inoltre, sono più piccoli e hanno prestazioni migliori a frequenze pari a quelle che si hanno nel caso di studio trattato. Per avere una visione più chiara della differenza tra PTH e SMD si può osservare la Figura 2.13. Nel caso preso in analisi, per le considerazioni appena fatte,

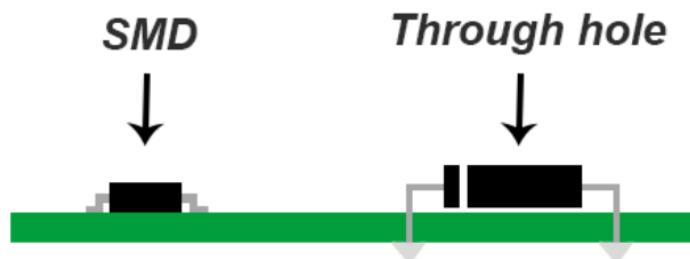


Figura 2.13: Differenza visiva tra dispositivi SMD, a sinistra, e dispositivi PTH, a destra.

tutti i dispositivi tra resistori, condensatori e induttori usati sono di tipo SMD. Una volta

completato lo schematico, è buona prassi effettuare l'ERC (Electrical Rule Check) un controllo del software che verifica se sono presenti eventuali errori elettrici nel circuito, come per esempio l'assenza di una massa.

Dopo aver completato il disegno dello schematico e effettuato l'ERC, EAGLE genera automaticamente il layout della board. La prima cosa da fare è decidere da quanti layer sarà formata la PCB. In questo caso, la PCB avrà 2 layer. Dopo aver scelto i layer, si devono impostare le regole di progetto da definire in base alla capacità produttiva seguendo le linee guida del produttore. Da qui inizia la fase di design in cui si devono collocare i componenti inseriti nello schematico all'interno del layout con l'accortezza di disporre vicini i dispositivi che saranno connessi l'uno con l'altro. Questo permette di ridurre le dimensioni della board. Tuttavia, non si devono collocare i dispositivi troppo vicini per evitare di avere disturbi dovuti ad interferenze. Una volta posizionati i componenti, si possono connettere tra loro con le piste. È stata scelta una larghezza delle piste pari 0.3048 mm per avere la possibilità di far scorrere nel circuito un corrente elevata. Normalmente, si collegano prima i segnali, poi le alimentazioni ed infine le masse. Nel tracciare le piste bisogna assolutamente evitare gli angoli di 90° perché questi fanno perdere integrità al segnale, creano cioè rumore, e aumentano la probabilità di errori di fabbricazione. Come per la collocazione dei componenti, va lasciato spazio tra piste, dispositivi, eventuali via e fori metallizzati usati per interconnettere due o più layer della board. I via sono importanti perché permettono una miglior distribuzione della potenza e del segnale di massa, è norma aggiungerli dove sono presenti ampie aree prive di componenti o via.

Dopo aver tracciato tutte le piste è necessario creare il piano di massa. Analogamente a quanto effettuato con lo schematico, anche per il layout si effettua un controllo chiamato DRC (Design Rule Check) dove si verifica che siano state rispettate le regole del progetto. La PCB progettata per il preamplificatore è riportata in Figura 2.14: si può notare l'assenza di angoli retti, la vicinanza dei dispositivi collegati tra loro e la presenza dei via in zone ampie senza componenti o piste.

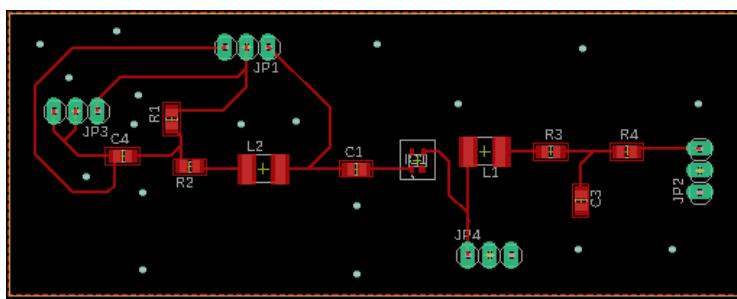


Figura 2.14: La PCB dell'amplificatore. Le dimensioni sono di 85.8 mm × 33.3 mm

Riassumendo, in questa parte di lavoro, lo studio del preamplificatore è iniziato con

l’analisi del dispositivo elettronico BGA614, componente fondamentale del circuito, di cui poi è stata fatta un’analisi completa. Il calcolo del punto di lavoro stazionario ha permesso di conoscere lo stato dei componenti attivi del circuito, l’analisi di piccolo segnale ha stabilito il comportamento del circuito alle frequenze operative del sottocircuito SiPM-scintillatore e l’analisi in transitorio ha messo in luce la reazione del circuito all’arrivo dei segnali dal sottocircuito. Queste tre analisi hanno coperto tutti i domini operativi di un circuito, prevedendo così il suo comportamento. Infine, la progettazione della PCB ha realizzato il design costitutivo del circuito rendendolo pronto alla fabbricazione per poi essere utilizzato nel campo di applicazione descritto da questo lavoro.

Capitolo 3

Rivelazione di muoni cosmici con SiPM e scintillatore

3.1 I muoni

Un muone, indicato con il simbolo μ^- , è una particella elementare, cioè una particella subatomica che non è composta da altre particelle. Secondo il modello standard, i muoni appartengono alla famiglia dei fermioni, cioè delle particelle che hanno spin semintero. All'interno della famiglia dei fermioni, i muoni appartengono al gruppo dei leptoni, sono cioè dei fermioni elementari. Queste caratteristiche sono condivise anche dall'elettrone, con la differenza che i muoni sono 207 volte più pesanti [8]. Essendo così pesanti, i muoni subiscono un'accelerazione meno intensa dai campi elettromagnetici, risultando estremamente penetranti nella materia; trovandone traccia anche dentro le miniere.

Come si può osservare dalla Figura 3.1, i muoni si formano naturalmente negli strati più alti dell'atmosfera a seguito del decadimento di altri tipi di particelle, chiamate pioni. Questi si formano quando i raggi cosmici, che sono formati da protoni con energie elevatissime, collidono con i nuclei atomici delle molecole che si trovano in aria. I muoni, dopo la loro formazione, iniziano a muoversi nello spazio a velocità prossime a quelle della luce, fino ad arrivare sulla superficie terrestre. I muoni hanno tempo di decadimento a riposo pari a $2 \mu\text{s}$, tempo che, secondo la fisica classica, non gli permetterebbe di raggiungere la superficie terrestre [9]. Tuttavia, muovendosi a velocità vicine a quelle della luce, secondo la teoria della relatività, il loro tempo di vita risulta dilatato rispetto a chi, nello stesso sistema inerziale, rimane fermo; allo stesso modo, collocandoci nel sistema di riferimento del muone, in accordo con la legge di contrazione delle lunghezze, la particella vede la distanza contratta.

Come gli elettroni, anche i muoni sono particelle dotate di carica negativa $-e$, questo li porta ad avere energia sufficiente per ionizzare le molecole. Questo tipo di energia è

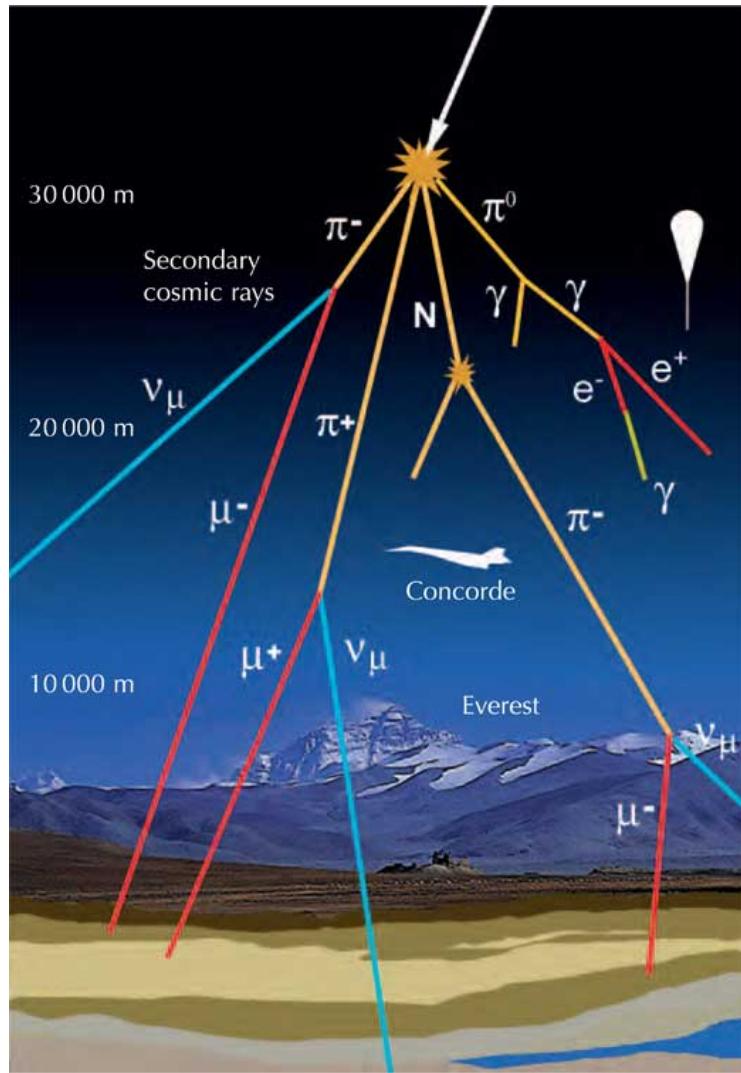


Figura 3.1: Il processo di formazione dei muoni [10].

detta radiazione ionizzante. I muoni sono la radiazione ionizzante più penetrante.

3.2 Descrizione del setup di misura

Nel Capitolo 1 è stato descritto il processo di caratterizzazione del SiPM, grazie al quale è stato possibile stabilire i corretti parametri di funzionamento del dispositivo. In questo capitolo, si descrive l'esperimento effettuato in laboratorio attraverso il quale è stato possibile utilizzare in combinazione dei SiPM con uno scintillatore. Quest'ultimo è un materiale in cui la ionizzazione prodotta dalla radiazione incidente induce l'emissione di luce. Il processo di rivelazione funziona come segue: il muone incidente deposita energia tramite la radiazione ionizzante quando incontra lo scintillatore [11] [12]. La radiazione ionizzante è composta da particelle subatomiche o onde elettromagnetiche che hanno sufficiente energia per ionizzare atomi o molecole. Nel caso dello scintillatore,

l’energia depositata dalla radiazione ionizzante libera fotoni. Se uno scintillatore è usato in combinazione con un rilevatore di luce, come un SiPM, è possibile creare un sistema che operi come rilevatore del passaggio di particelle ionizzanti.

Questa configurazione è quella usata nel caso preso in esame per la rivelazione di muoni cosmici. Per ottimizzare la resa della rivelazione, si collocano i SiPM il più vicino possibile allo scintillatore, anche adiacenti se la conformazione dei due oggetti lo permette. Per poter funzionare, il setup, ha bisogno di essere polarizzato, bisogna cioè fornire la tensione di alimentazione. Avendo collegato due SiPM e lo scintillatore, abbiamo bisogno di una tensione di alimentazione sufficientemente elevata, di circa 42 V. Per fornire questa tensione è stato utilizzato, ancora una volta il DC Power Analyzer Keysight N6705C. Anche in questo caso, per preservare i componenti, si alza gradualmente la tensione di 1 V al secondo, a partire da 0 fino a 43 V. Inoltre, per evitare che il SiPM rilevi radiazioni luminose non provenienti dallo scintillatore, lo si pone in un ambiente buio. Nel caso preso in considerazione in questo lavoro, durante le acquisizioni lo scintillatore era posto in un ambiente completamente buio avvolto da un materiale oscurante, all’interno di una scatola.

Completato l’allestimento del setup, il sistema è pronto per rilevare eventuali muoni in arrivo. Si stima che, sulla superficie terrestre, ogni minuto arrivi un muone per cm^2 . Quando un muone arriva, è previsto un cambiamento dell’andamento della tensione in uscita dal sistema. Per poter osservare l’andamento della tensione nel tempo in un punto di un circuito si usa uno strumento chiamato oscilloscopio. Questo strumento è dotato di un display che consente di visualizzare, su un grafico, l’andamento nel dominio del tempo della tensione presente nel nodo del circuito a cui è collegato l’oscilloscopio. Nel caso preso in esame, è stato utilizzato l’oscilloscopio LeCroy WaveSurfer 454. Questo oscilloscopio digitale, permette anche di salvare i grafici ottenuti ed è dotato del sistema operativo Windows XP Embedded. Queste ultime due caratteristiche rendono possibile il salvataggio delle forme d’onda su un dispositivo di archiviazione che può essere poi collegato ad un comune calcolatore per effettuare l’analisi dei dati.

Il SiPM e l’oscilloscopio sono sempre collegati tra di loro rendendo continuo il rilevamento delle tensioni in uscita. Per evitare quindi il salvataggio continuo di dati, è necessario stabilire in quale condizione salvare i dati ricevuti. Dopo vari tentativi, è stato scelto di salvare i grafici quando veniva rilevato un valore di tensione, detto trigger, pari a -50 mV . Questo valore permette di avere un numero di eventi acquisiti comparabile al numero di muoni in arrivo sulla terra.

Nella Figura 3.3 è mostrato il setup completo utilizzato nella rivelazione dei muoni cosmici.

Per alimentare il circuito e leggere il valore di tensione in uscita al SiPM si utilizza il circuito mostrato nella Figura 3.2. Al canale per la lettura del segnale proveniente dal

SiPM va collegato un connettore a T. Nella Figura 3.3, si può vedere che al connettore a T sono collegati l'oscilloscopio e i due SiPM. In questo modo, l'oscilloscopio salverà i dati quando, su almeno uno dei due lati dello scintillatore su cui sono montati i SiPM sarà erogata una tensione sufficiente da far scattare il trigger. Il sistema funziona in modo simile ad una porta OR: è sufficiente che uno dei due SiPM eroghi una tensione minima pari a quella del trigger per fare in modo che l'oscilloscopio salvi i dati ottenuti. La decisione di usare il connettore a T è stata presa in quanto l'interesse del lavoro è misurare il passaggio del muone e di valutare le prestazioni dello scintillatore e del SiPM in confronto alle simulazioni e alla caratterizzazione.

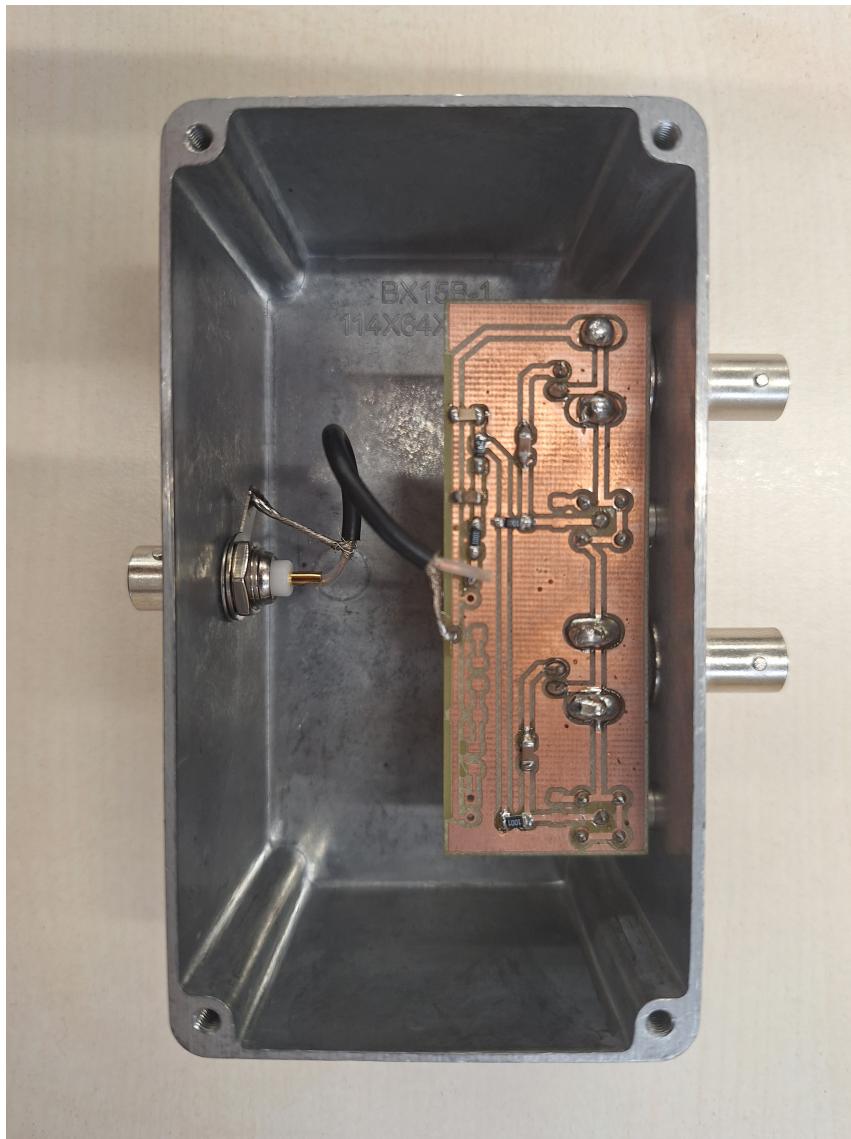


Figura 3.2: Il circuito utilizzato per l'alimentazione e per la lettura del segnale in uscita dal SiPM. Sono presenti tre connettori: quella a sinistra è per l'alimentazione, i due di destra sono usati per la lettura del segnale. Nel caso analizzato è stato utilizzato solo uno dei due connettori di lettura.

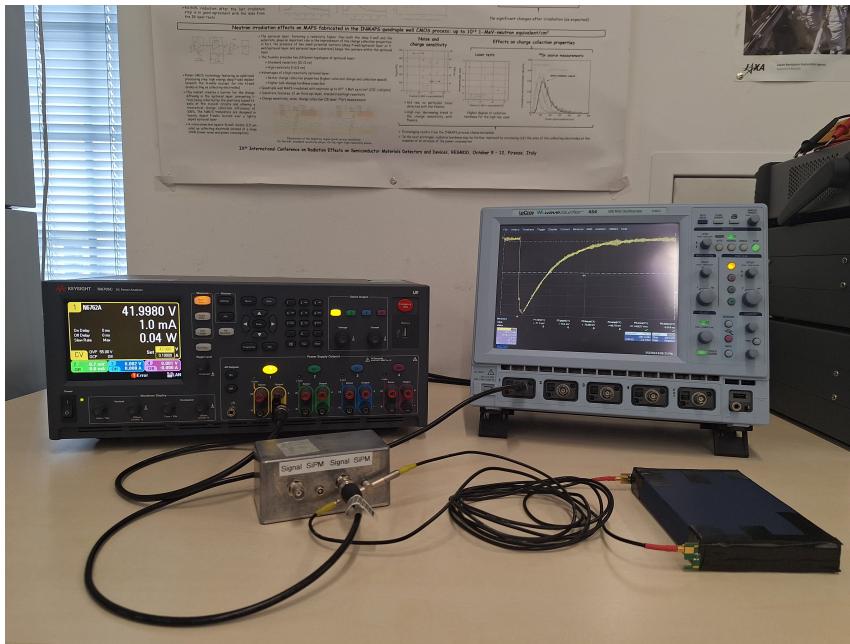


Figura 3.3: Il setup usato per la rivelazione dei muoni cosmici. A sinistra il DC Power Analyzer, in alto a destra l'oscilloscopio e in basso a destra lo scintillatore con i due SiPM. Lo scintillatore e i due SiPM sono circondati da un involucro per minimizzare le radiazioni luminose e non che possono colpirli.

3.3 Raccolta e analisi dei dati

Dopo aver predisposto il setup, è possibile rilevare l'arrivo di muoni sullo scintillatore. Questo è segnalato da un cambiamento della tensione in uscita dal SiPM, e si può notare sul display dove appare un'immagine simile a quella della Figura 3.4.

Una volta raggiunto il trigger, l'oscilloscopio salva sul dispositivo di archiviazione i valori di tensione misurati in un determinato istante di tempo. In questo modo è possibile, una volta spostati i file sul calcolatore, elaborare i dati ottenuti. Usando Python, in particolare l'interfaccia Pyplot presente nella libreria Matplotlib possiamo realizzare il grafico che otteniamo sull'interfaccia del display. Un esempio di grafico ottenuto in questo modo è quello in Figura 3.5. Come possibile apprezzare, vengono salvati i valori a partire da circa 200 ns prima dell'arrivo del trigger fino a circa 2 μ s dopo l'arrivo del trigger. La finestra temporale è stata impostata sull'oscilloscopio, ed è stata determinata in forma empirica per garantire di valutare l'intero andamento del segnale fino al ritorno al valore di tensione che si ha nel punto DC.

Osservando il grafico, si notano parecchie oscillazioni dovute al rumore esterno soprattutto nei momenti in cui si è in attesa dell'arrivo del muone e subito dopo il suo arrivo durante il ritorno in fase di riposo. Questo aspetto è rilevante nel momento in cui le variazioni della baseline causate dal rumore, potrebbero erroneamente triggerare il salvataggio dei dati e, nel caso di raccolta dati più massiccia, lasciando acceso il sistema

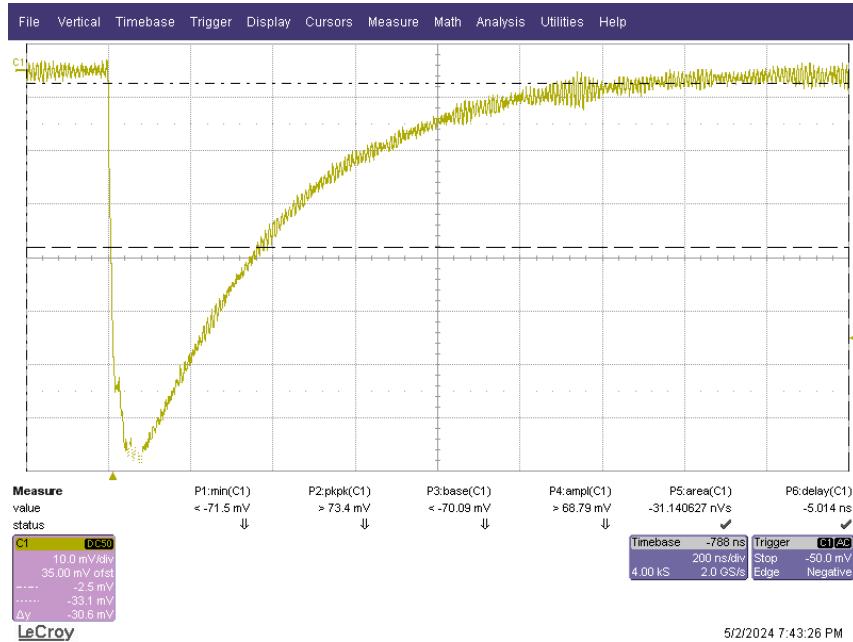


Figura 3.4: Il display dell’oscilloscopio che mostra l’andamento della tensione di uscita del SiPM all’arrivo di un muone.

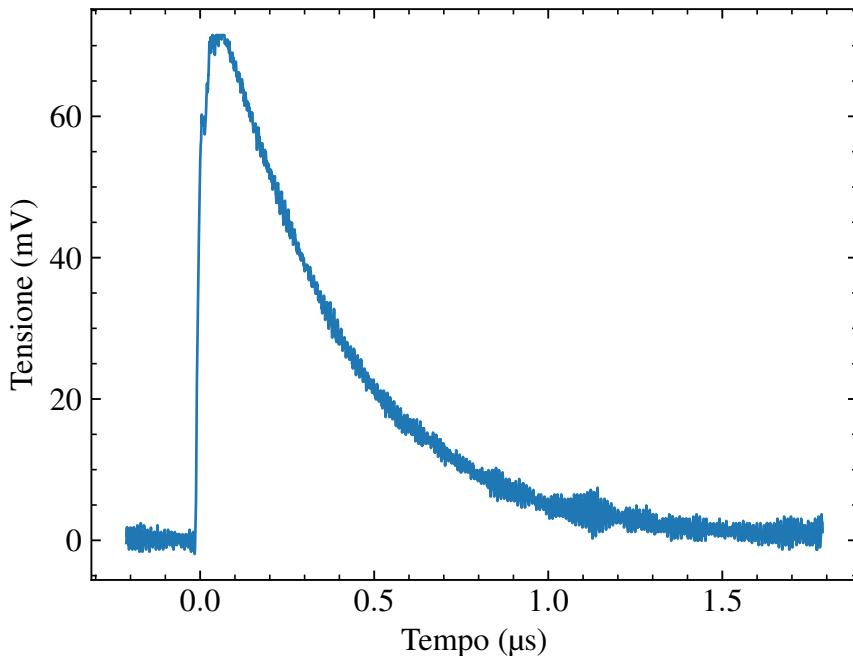


Figura 3.5: Grafico ottenuto a partire dai dati raccolti dall’oscilloscopio che mostra l’andamento della tensione di uscita del SiPM all’arrivo di un muone. In questo caso il grafico è stato trasformato nel suo simmetrico rispetto all’asse delle ascisse per avere una maggiore leggibilità.

per qualche minuto, si ottiene un quantitativo di dati tale da poter avere delle misure non volute. Includere queste misure nell’analisi, potrebbe portare a conclusioni errate. È necessario, quindi, scartare queste ipotetiche forme molto rumorose. Per farlo si possono

usare vari metodi. Uno di questi può essere quello di scartare le misure che hanno un numero estremamente elevato di oscillazioni. Tuttavia, applicare questo metodo ai grafici ottenuti può portare a scartare delle misure che hanno numerose oscillazioni prima o dopo il trigger, anche se questo è dovuto al passaggio del muone. Questo problema può essere risolto filtrando le oscillazioni con frequenza più elevata. Lo strumento che permette di fare ciò è un filtro passa-basso. Il subpackage `signal` del modulo `scipy` fornisce varie funzioni con cui realizzare dei filtri passa-basso. Il più comune e semplice di questi è il filtro Butterworth. La funzione di trasferimento per questa classe di filtri è definita dalla Equazione 3.1. In questa equazione, n è detto ordine del filtro e ω_f è la pulsazione di taglio, cioè la pulsazione che si ha in corrispondenza di un guadagno di -3 dB.

$$|G(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_f}\right)^{2n}}} \quad (3.1)$$

Maggiore è l'ordine, maggiore sarà il valore assoluto della pendenza del grafico nell'intervallo di attenuazione [13]. L'esempio di come l'ordine influisca sul grafico lo si apprezza dal grafico della Figura 3.6

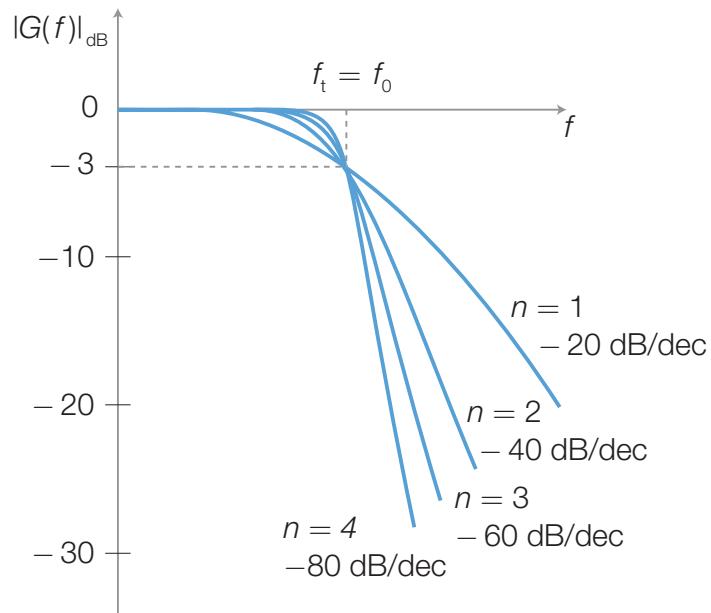


Figura 3.6: Differenza nell'andamento del grafico di un filtro passa-bassa Butterworth con l'aumento o la diminuzione dell'ordine. L'aumento o la diminuzione della pulsazione di taglio sposta, rispettivamente, a destra o sinistra l'inizio della discesa [14].

Per poter creare usando Python un filtro di quest tipo si usa la funzione:

```
signal.butter(ordine, freq_taglio_norm, 'low', output='sos').
```

$$f_{\text{norm}} = \frac{2f_s}{f_c} \quad (3.2)$$

L'argomento `frequenza_taglio_normalizzata` indica la frequenza di taglio normalizzata, definita nell'Equazione 3.2 dove f_s è la frequenza di taglio effettiva e f_c è la frequenza di campionamento, che si ricava facendo l'inverso della differenza di due istanti di tempo consecutivi presenti nel dataset e che, in questo caso, risulta essere 2 GHz.

Per stabilire il valore della f_s si può osservare dal grafico della Figura 3.5 che l'intervallo di tempo che passa dal momento in cui la tensione inizia a diminuire a quello in cui ritorna al valore iniziale è di circa 1 μ s. Questo è l'intervallo di tempo che il SiPM impiega per ritornare nello stato di attesa del fotone, per questo motivo è lecito tagliare tutte le frequenze maggiori di questa, cioè tutte le frequenze > 1 MHz. Dall'Equazione 3.2 si ricava l'Equazione 3.3.

$$f_{\text{norm}} = \frac{2f_s}{f_c} = 0.001 \quad (3.3)$$

Nel caso preso in esame si è scelto un filtro di ordine $n = 1$. Il grafico del segnale filtrato è riportato nella Figura 3.7. La ragione per la quale è stato scelto un filtro di ordine 1 è che questo ordine garantisce la maggiore fedeltà all'andamento del grafico non filtrato.

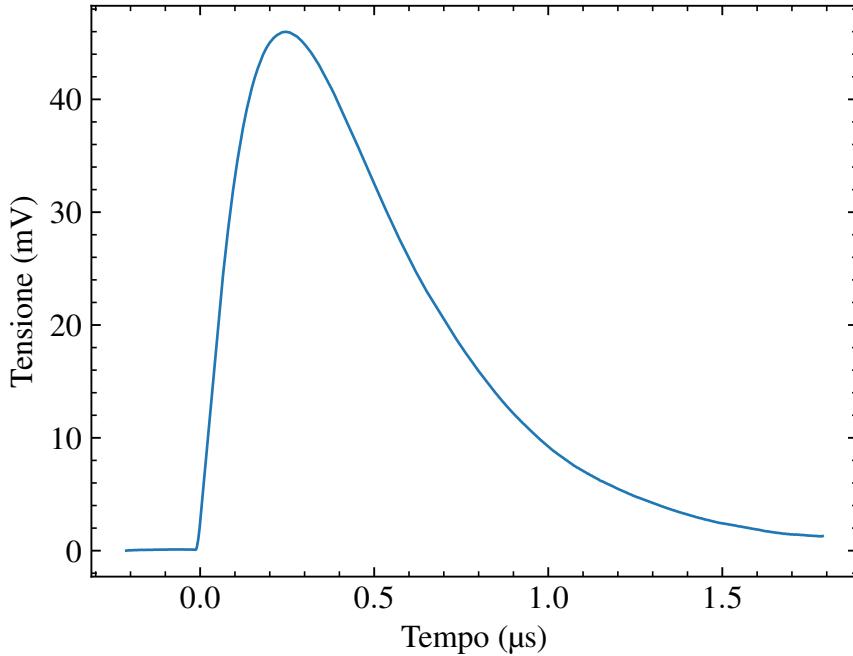


Figura 3.7: Grafico ottenuto a partire dall'applicazione di un filtro passa-basso di Butterworth al grafico della Figura 3.5.

Per avere un numero di dati apprezzabile, è stata effettuata un'acquisizione con una durata complessiva di 30 minuti e un trigger di 10 mV al fine di garantire un numero

di eventi sufficientemente alto da avere una statistica sufficientemente comparabile alla stima iniziale di 1 muone per cm^2 per minuto. Avendo uno scintillatore con una area di rivelazione di 150 cm^2 si stima un numero di eventi pari a 4500. Tuttavia, considerando che il modello BC-422 usato ha un'efficienza del 55% e delle problematiche che possono insorgere a causa dell'output, è ragionevole prevedere un numero di misure che si attesti intorno alla metà del valore teorico. Avendo organizzato la lettura del segnale del SiPM con il connettore a T, il segnale viene acquisito dall'oscilloscopio quando uno dei due SiPM rivelava il passaggio del muone. Se durante la finestra di tempo che l'oscilloscopio occupa per rivelare e salvare i dati arrivasse un altro muone, questo non verrebbe rivelato dall'oscilloscopio. Allo stesso modo, se un altro muone colpisce lo scintillatore nel momento in cui il SiPM sta tornando in attesa, questo non verrebbe rivelato. Entrambe le situazioni descritte portano ad una diminuzione delle misure. A partire da queste considerazioni, il numero di 2164 acquisizioni ottenute in 30 minuti risulta del tutto in linea con quanto atteso.

Ogni muone incidente sullo scintillatore ha un'energia diversa che porta ad avere un numero di fotoni rilasciati dallo scintillatore dipendente dall'angolo di incidenza che il muone ha rispetto alla superficie dello scintillatore. Il numero di fotoni rilasciati dallo scintillatore fa generare dal SiPM risposte temporali con valori di picco di ampiezza diversa. Risulta quindi di notevole interesse analizzare l'andamento della distribuzione delle tensioni di picco e, per fare ciò, è sufficiente calcolare il valore massimo ottenuto in ogni misura e creare poi un istogramma. Si ottiene così il grafico della Figura 3.8.

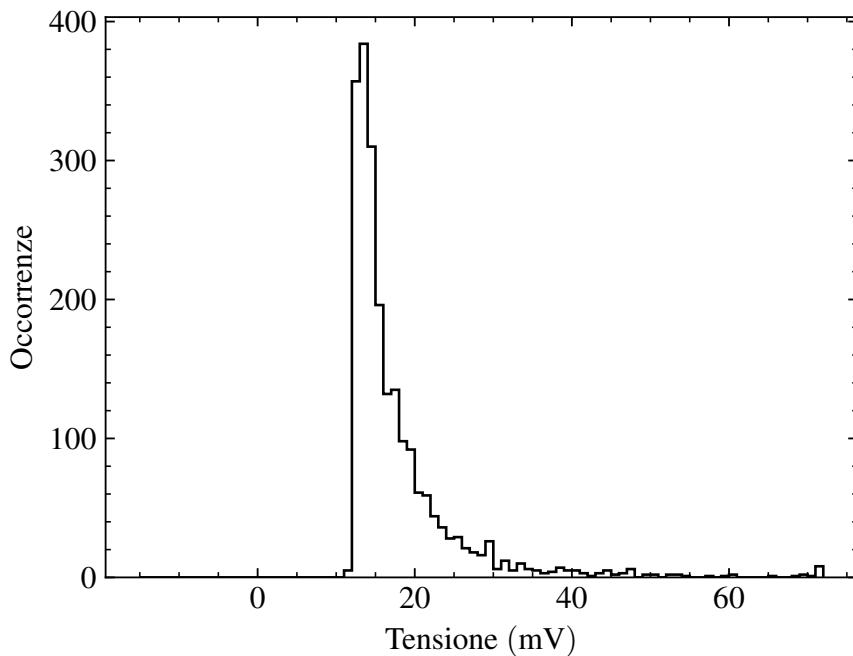


Figura 3.8: Istrogramma dei valori minimi delle misure

È stato dimostrato che i depositi di energia delle particelle su un materiale seguono una

distribuzione detta di Landau. Questa distribuzione ha un'equazione per calcolare la probabilità di un determinato evento estremamente complessa, che può essere approssimata usando l'Equazione 3.4:

$$p(x) = e^{-\frac{1}{2} \frac{x-\mu}{c} + e^{-\frac{x-\mu}{c}}} \quad (3.4)$$

Nell'Equazione 3.4, il simbolo μ è una costante di traslazione che sposta a destra o sinistra il grafico, mentre il simbolo c è un parametro di scala che aumenta o diminuisce l'ampiezza della curva. Graficamente appare come si vede dall'immagine Figura 3.9. In questo tipo di distribuzione non esiste un modo per calcolare media e varianza analiticamente, ma possono essere usati dei valori associabili, ricavati attraverso passaggi empirici lavorando direttamente sul grafico. In questo caso la media corrisponderà al valore più probabile (*MPV*), cioè al valore di picco del grafico, mentre la deviazione standard, che verrà indicata con σ , viene definita come la differenza di ascisse tra i punti a ordinata pari a metà del picco.

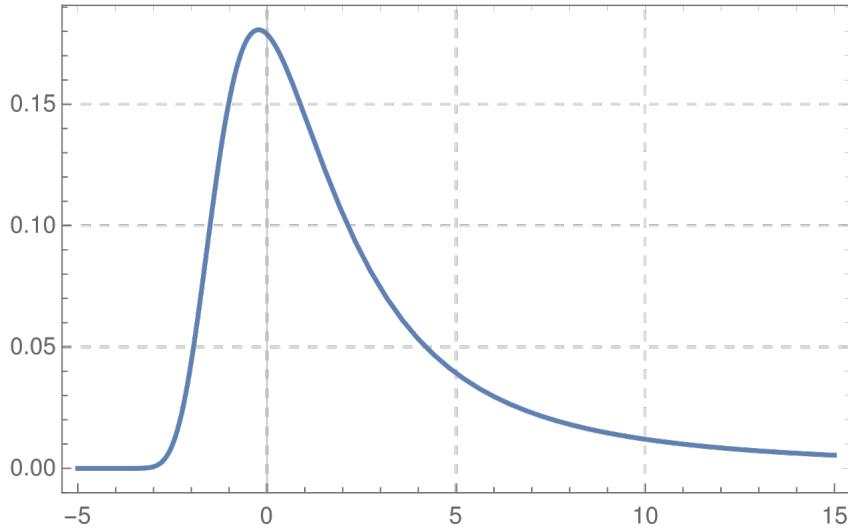


Figura 3.9: Andamento della distribuzione di Landau

Ci aspettiamo quindi che anche le nostre misure seguano l'andamento della Landau, dobbiamo disegnare quindi una funzione che includa la maggior parte dei valori presenti nell'istogramma. La funzione più fedele è quella mostrata nel grafico della Figura 3.10. Si può notare che per alcuni valori dell'istogramma non collimano esattamente gli esatti corrispondenti nella distribuzione. Questo può essere dovuto ad un numero di eventi non abbastanza alto, però, soprattutto per i valori maggiori, la funzione si adatta molto bene all'andamento prodotti dall'istogramma.

Si è detto che questo tipo di misure possono portare al salvataggio di rivelazione errate che vengono attivate da un passaggio della tensione al valore di trigger. Per eliminare eventuali misure rumorose che possono generarsi, si deve prima stabilire quando una

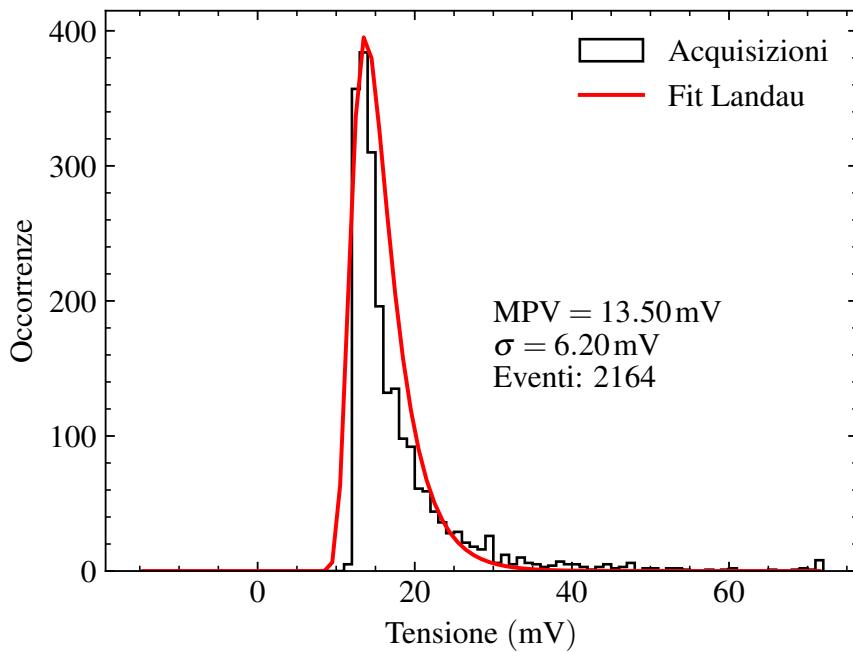


Figura 3.10: Fit della distribuzione di Landau sui valori ottenuti dall’istogramma.

rivelazione va considerata rumorosa. Nel caso di studio presentato, si considera una misura rumorosa se non rispetta l’andamento della Figura 3.7. Un’osservazione che si può fare riguardo all’andamento del grafico è che il suo valore medio è compreso tra il picco della curva e il momento in cui la curva si trova in stato di riposo. Osservando la Figura 3.7, possiamo affermare che un grafico corretto attraversa il valore medio due volte. Tuttavia, anche se il grafico è filtrato, non si può stabilire con certezza che questo attraversi il valore medio due volte dato che potrebbero esserci comunque delle minime oscillazioni. Una possibile soluzione a questo problema è andare a calcolare la media degli attraversamenti del valor medio di ogni grafico e considerare rumorosi i grafici con un numero di attraversamenti di molto superiore alla media, per esempio il doppio. Agendo in questo modo vengono scartate 36 acquisizioni, di cui si vedono due esempi significativi nella Figura 3.11.

Osservando il grafico "C1coil20may00244" questo presenta in realtà un andamento simile al riferimento, tuttavia osservando la parte crescente del grafico non filtrato si notano una serie di oscillazioni poco ampie che influiscono nella valutazione e che continuano ad essere presenti a causa della loro ampiezza nel grafico non filtrato. Quindi, considerando anche il loro numero a confronto del totale dei grafici ottenuti, si può ritenere che anche se questi vengono scartati il risultato dell’analisi è pur sempre verosimile. Osserando, invece, l’andamento del grafico "C1coil20may01708", si può ritenere che questi siano effettivamente misurati a seguito di un rumore esterno, probabilmente da una certa quantità di luce esterna che ha colpito il SiPM. Avendo scartato solo 36 misure su 2164 si può affermare che il setup preparato è molto preciso e affidabile e si può prevedere che,

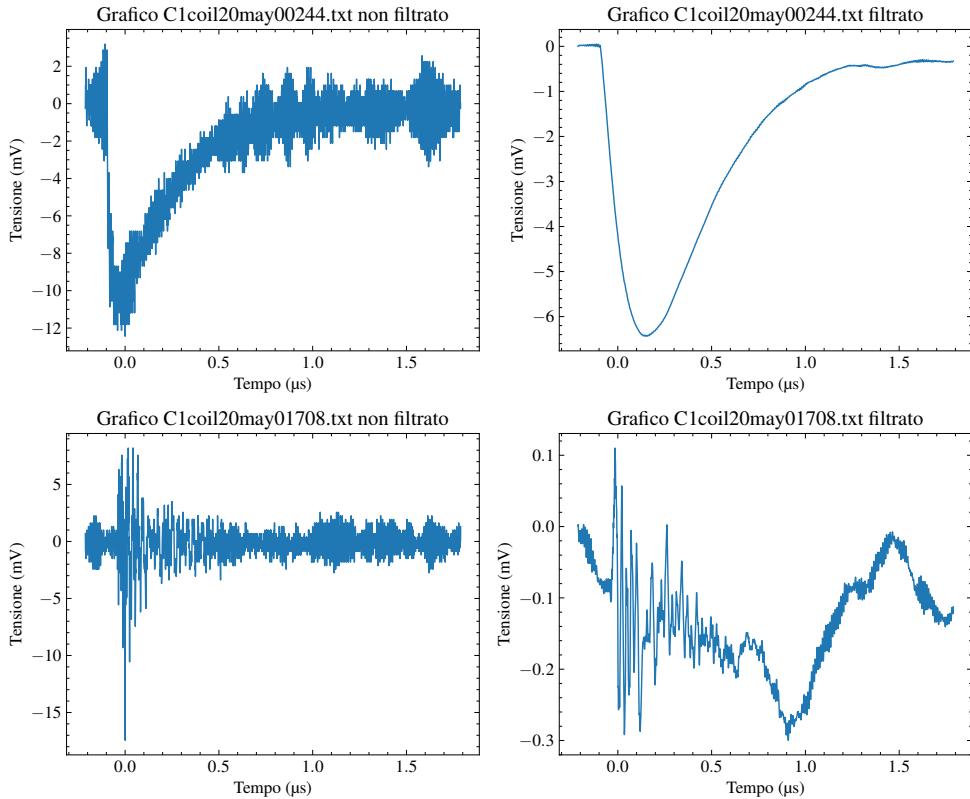


Figura 3.11: Due esempi di grafici scartati in cui vengono riportati la versione non filtrata e quella filtrata

rifacendo l’istogramma dell’andamento dei valori minimi come quello della Figura 3.8 i valori di MPV e σ non cambieranno molto. Come si può vedere dalla Figura 3.12; l’ MPV rimane lo stesso. Nel secondo caso, invece, σ diminuisce di 2.63 mV, cioè dell’53,84% rispetto alla media dei due σ .

In conclusione, in questo capitolo è stato spiegato come realizzare un sistema in grado di rivelare l’arrivo dei muoni sulla superficie terrestre e è stato mostrato un esempio di come poter analizzare i dati ottenuti secondo le proprie esigenze usando anche una distribuzione statistica propria di questo tipo di problema come la distribuzione di Landau. I dati elaborati dal procedimento descritto in questa parte possono anche essere condivisi tra diverse unità di raccolta dati, come previsto dal progetto MuonPi.

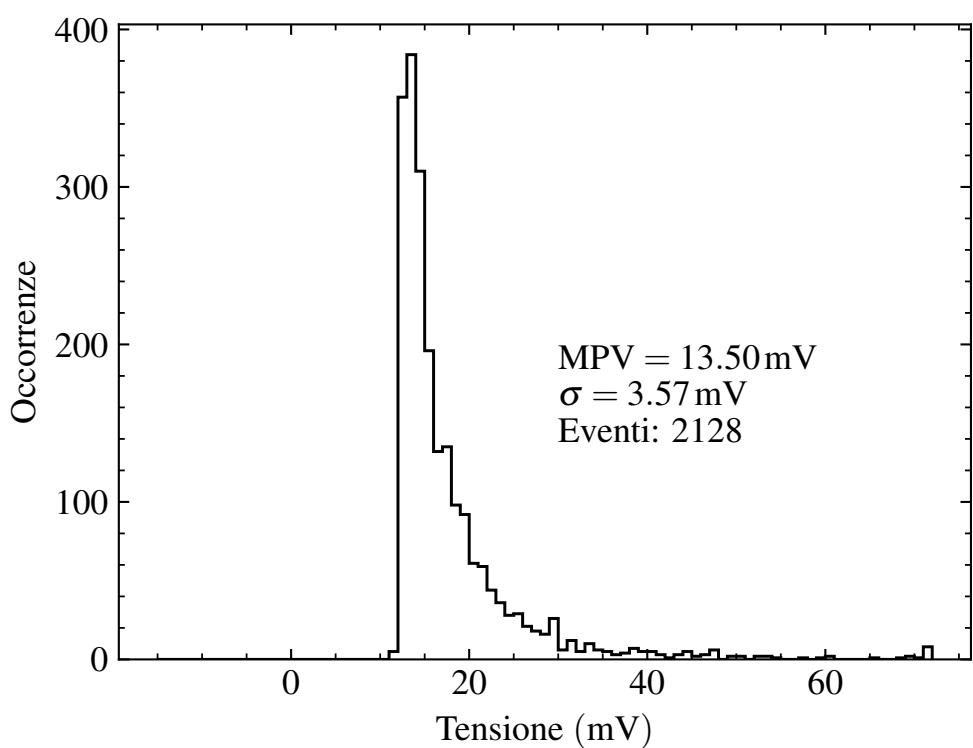


Figura 3.12: Istogramma della distribuzione dei depositi di energia dei muoni con escluse le misure rumorose.

Conclusioni

In questo lavoro di tesi, è stata affrontata la progettazione, realizzazione e caratterizzazione di un sistema per la rivelazione dei muoni cosmici. Il sistema di rivelazione si compone principalmente di due elementi: uno scintillatore, responsabile dell'emissione di luce a seguito dell'interazione con i muoni, e il Silicon Photomultipliers (SiPM), un sensore a semiconduttore progettato per rivelare i fotoni generati dallo scintillatore.

Per garantire un funzionamento preciso ed efficiente del sistema di rivelazione, è stata eseguita una caratterizzazione approfondita dei SiPM. Sono stati identificati i range operativi ottimali ed è stato analizzato il comportamento del dispositivo in diverse condizioni ambientali, inoltre sono stati individuati i parametri ideali di funzionamento con particolare attenzione alla tensione di polarizzazione. Successivamente, i SiPM sono stati integrati in un circuito di lettura, che è stato simulato per valutarne le prestazioni in regime DC, AC e transitorio. Completata la fase di simulazione, è stata progettata una scheda a circuito stampato (PCB) per consentire l'integrazione completa del sistema.

Il sistema sviluppato è in grado di rilevare con elevata efficienza i muoni cosmici, consentendo la raccolta e l'analisi accurata dei dati acquisiti. È stato inoltre implementato un setup sperimentale che ha permesso l'effettiva rivelazione dei muoni cosmici attraverso l'utilizzo di uno scintillatore accoppiato a un Silicon Photomultipliers. L'integrazione con il progetto MuonPi consente la condivisione dei dati con altre stazioni di rivelazione, facilitando una collaborazione su scala globale e contribuendo a un'analisi più approfondita delle caratteristiche dei muoni. Questo approccio sinergico ha il potenziale di migliorare la comprensione dei raggi cosmici e di offrire ricadute positive sia per la ricerca scientifica che per lo sviluppo tecnologico.

CONCLUSIONI

Bibliografia

- [1] M.-W. contributors, “Muonpi-wiki,” Muonpi.org, 2017. [Online]. Available: <https://wiki.muonpi.org/>
- [2] . Semiconductor Components Industries, LLC, “And9770 - introduction to the silicon photomultiplier (sipm),” www.onsemi.com, 08 2023. [Online]. Available: <https://www.onsemi.com/pub/collateral/and9770-d.pdf>
- [3] L. Linssen, P. Zehetner, L. Diehl, E. Sicking, D. Dannheim, J. Braach, and c.-E.-D. Place, “Eurizon detector school characterization of silicon photomultipliers tutors,” 2023.
- [4] M.-W. contributors, “Sipm board - muonpi-wiki,” Muonpi.org, 2017. [Online]. Available: https://wiki.muonpi.org/index.php?title=SiPM_board#cite_ref-3
- [5] I. T. AG, “Bga614 silicon germanium broadband mmic amplifier rf & protection devices,” 09 2011. [Online]. Available: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BGA614-DS-v02_01-en.pdf?fileId=db3a304314dca3890115418ffd35163a
- [6] “Darlington-pair, configuration, current gain, transistor, relays, motors,” World of Electronics Study, 10 2019. [Online]. Available: <https://www.worldofelectronicsstudy.com/darlington-pairconfigurationcurrent-gaintransistorrelaysmotorssolenoids/>
- [7] S. Graffi, “Transistori bipolari a giunzioni (bjt),” www-micro.deis.unibo.it, 02 2007. [Online]. Available: <http://www-micro.deis.unibo.it/~graffi/Altre/appunti/bjt.pdf>
- [8] O. of Science, “Doe explains...muons,” Energy.gov. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/science/doe-explainsmuons>
- [9] MuonSources, “About muons – muonsources,” muonsources.org. [Online]. Available: <https://muonsources.org/about-muons/>

BIBLIOGRAFIA

- [10] T. Luu, “Decode cosmic ray, one muon at a time,” Medium, 07 2020. [Online]. Available: <https://trieuhanluu3.medium.com/decode-cosmic-ray-one-muon-at-a-time-3384037993a6>
- [11] H. Yang, G. Luo, T. Yu, S. Zhao, B. Hu, Z. Huang, H. Shen, L. Yang, Y. Chen, and J. Tang, “Mugrid: A scintillator detector towards cosmic muon absorption imaging,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment*, vol. 1042, pp. 167 402–167 402, 11 2022.
- [12] S. Leoni, “Scintillator detectors,” www0.mi.infn.it, 12 2021. [Online]. Available: <https://www0.mi.infn.it/~sleoni/TEACHING/Nuc-Phys-Det/PDF/Lezione-partI-6-scint-det.pdf>
- [13] A. De Luca, “Sistemi digitali di controllo.” [Online]. Available: http://www.diag.uniroma1.it/deluca/contrdig/14_ProblemiRealizzazione.pdf
- [14] S. Mirandola, *Progettazione di filtri attivi passa-basso e passa-alto di ordine superiore*, ser. Elettrotecnica ed Elettronica. Zanichelli, 01 2012. [Online]. Available: https://online.scuola.zanichelli.it/mirandola-files/Elettronica_V03/Capitolo_02/Mirandola_V3_02-3_Filtri_ordine_superiore.pdf

BIBLIOGRAFIA

Ringraziamenti

Al termine di questo lavoro, ritengo doveroso ringraziare le persone che mi hanno supportato durante il mio percorso universitario e lo sviluppo della tesi di laurea.

Innanzitutto, voglio ringraziare il mio relatore, il Prof. Massimo Manghisoni, e il mio correlatore, il dottorando Luca Ghisoltti, per l'opportunità di lavorare su un progetto così stimolante, per l'aiuto e per la disponibilità dimostrata in questi mesi di lavoro.

Ringrazio infinitamente mamma e papà, che durante tutti questi anni non mi hanno mai fatto mancare il loro sostegno e la loro fiducia. Vederli contenti dei miei traguardi mi ha motivato a dare sempre il massimo. Un'altra grande motivazione me l'ha data una frase pronunciata qualche anno fa da mio fratello Alberto, che ringrazio di cuore.

Grazie anche ai miei amici, con i quali ho condiviso momenti bellissimi di condivisione e divertimento, che mi hanno aiutato ad affrontare con spensieratezza ed entusiasmo questo percorso di studi. In particolare, ci tengo a ringraziare Picci, compagna di studi fin dalle elementari, per esseri stata vicina e per i suoi consigli preziosi, e Barci, con il quale condivido passioni e interessi come con nessun altro e con il quale scambio confronti profondi e stimolanti per la mia curiosità.

Ringrazio, infine, Giorgia, il primo e l'ultimo pensiero della mia giornata. La felicità che provo nell'averla vicina mi aiuta ad affrontare con serenità ogni nuova sfida.

Raggiungere questi traguardi è sempre una grande soddisfazione, ma avere persone con cui condividere queste emozioni è la parte migliore. Voglio che in questi ringraziamenti si rispecchi ogni persona che mi è stata vicina.

Grazie a tutti voi,
Giorgio