

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA  
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA  
ELETTRONICA

**Tesi di Laurea Triennale**

MISURE DI ACCELERAZIONE CON SENSORI MEMS  
INTERFACCIATI A SCHEDA DI ACQUISIZIONE NI-USB-6211

**Relatore:** Prof.ssa Giada Giorgi

**Correlatore:** Dott. Marco Stellini

**Laureando:** Valentino De Faveri

Anno Accademico 2011- 2012



# Indice

<b>1</b>	<b>Materiali</b>	<b>5</b>
1.1	Scheda di acquisizione . . . . .	5
1.2	Accelerometro MEMS . . . . .	6
1.2.1	Principio di funzionamento . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Prima acquisizione</b>	<b>9</b>
2.1	Libreria DAQmx . . . . .	9
2.2	Diagramma a blocchi . . . . .	9
2.3	Scheda generazione segnali . . . . .	11
2.4	Confronto LabVIEW oscilloscopio . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Progettazione</b>	<b>13</b>
3.1	Circuito . . . . .	13
3.1.1	Capture CIS . . . . .	14
3.1.2	Layout PLUS . . . . .	15
3.1.3	Fresa a controllo numerico . . . . .	17
3.1.4	Test del circuito . . . . .	20
<b>4</b>	<b>Misure statiche di angoli</b>	<b>21</b>
4.1	Parametri di acquisizione . . . . .	22
4.2	Calibrazione . . . . .	23
4.3	Misurazione dell'angolo . . . . .	24
4.3.1	Correzione degli errori . . . . .	26
4.3.2	Esempi di misura . . . . .	27
<b>5</b>	<b>Conclusione</b>	<b>29</b>
<b>6</b>	<b>Appendice</b>	<b>31</b>
<b>7</b>	<b>Bibliografia</b>	<b>43</b>

*INDICE*

---

# Introduzione

L'elaborato ha lo scopo di creare e testare una base di alimentazione per il dispositivo MEMS a disposizione.

Nella prima parte dell'esperienza è stato testato il funzionamento e la connessione al pc della scheda di acquisizione, con l'ausilio di LabVIEW, per gestire il processo di configurazione e la raccolta dei dati.

La parte più impegnativa è stata la progettazione della scheda di alimentazione che ha richiesto l'utilizzo della suite Orcad per passare dal circuito alla scheda vera e propria.

La scheda realizzata è stato il primo prototipo che ha portato ad una implementazione più accurata e all'utilizzo della stessa nel laboratorio di misure elettroniche, per le esperienze legate alla progettazione e acquisizione di dati attraverso LabVIEW e libreria DAQmx.

L'elaborato è suddiviso in quattro capitoli fondamentali:

Capitolo 1 descrizione dei componenti fondamentali quali scheda di acquisizione e accelerometro

Capitolo 2 prima parte di test della scheda di acquisizione con una scheda di generazione di segnali

Capitolo 3 progettazione e realizzazione dello stampato per l'alimentazione del dispositivo MEMS e filtraggio delle uscite

Capitolo 4 misure statiche di angoli attraverso l'acquisizione con la scheda NI USB-6211 e LabVIEW

*INDICE*

---

# Capitolo 1

## Materiali

### 1.1 Scheda di acquisizione

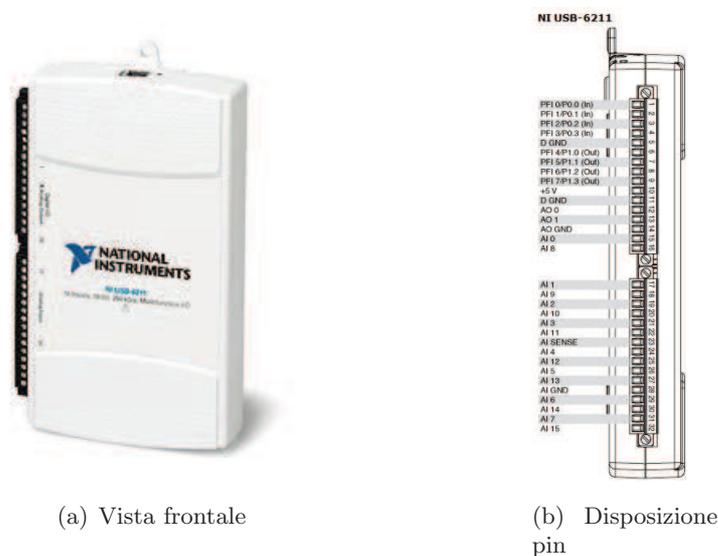
La scheda DAQ (Digital AcQuisition) utilizzata è una NI USB-6211 della National Instruments dotata di:

- 16 ingressi analogici (16 bit, 250 Ks/s)
- 2 uscite analogiche (16 bit, 250 Ks/s)
- 4 ingressi digitali
- 4 uscite digitali
- 2 contatori a 32 bit
- connettività USB
- libreria per LabVIEW

La scheda permette di effettuare tre tipologie di misurazione diverse per gli ingressi analogici:

- **Differenziale**, permette di misurare la differenza di potenziale tra una coppia di morsetti.
- **Referenced Single-End Mode**, misura la differenza di potenziale tra un morsetto e quello di massa.
- **Non-Referenced Single-End Mode**, misura la differenza di potenziale tra un morsetto e l' AI SENSE input.

Nel nostro caso, non alimentando il dispositivo direttamente dalla scheda, andremo a fare una misura differenziale tra i morsetti AI0 e AI1, a cui verranno collegati le uscite del dispositivo ed il morsetto di massa dell'alimentazione.



(a) Vista frontale

(b) Disposizione pin

Figura 1.1: Scheda NI-USB-6211

## 1.2 Accelerometro MEMS

Un accelerometro è un dispositivo in grado di rilevare e misurare l'accelerazione a cui viene sottoposto, può avere uno o più assi di misura (2 nel nostro caso).

Ci sono molti tipi di accelerometri:

- **Estensimetrici:** basati sulla variazione di resistenza di un estensimetro in seguito a una variazione della sua lunghezza.
- **Piezoresistivi:** basati sulla variazione di resistività di un lamina sottoposta a variazioni di lunghezza.
- **Piezoelettrici:** utilizzano un cristallo piezoelettrico come base di appoggio della massa rivelatrice, questo cristallo produce un segnale elettrico a seconda del livello di compressione a cui è sottoposto.
- **Capacitivi:** sfruttano la variazione di capacità tra due armature al variare della distanza tra di esse.
- **Trasferimento di calore:** sono una categoria di nuovi accelerometri brevettati dalla MEMSIC che sfrutta il movimento di una piccola bolla di aria calda all'interno di una cupola ermetica.

I dispositivi MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) sono il risultato di lavorazioni microscopiche, che incorporano tutti gli elementi elettrici e meccanici in un unico substrato di silicio, con tutti i blocchi di condizionamento e amplificazione del segnale direttamente *on-chip*.

L'accelerometro usato in questa esperienza è un MXA2500ML della MEMSIC a trasferimento di calore. Questa particolare tecnologia, brevettata dalla stessa ditta produttrice, sfrutta il movimento di una microscopica bolla d'aria all'interno di una cupola ermetica, per rilevare accelerazioni e inclinazioni a cui viene sottoposto il dispositivo. Questo tipo di integrazione permette di ridurre moltissimo i costi di produzione e quindi di vendita del prodotto, incrementa inoltre di molto la resistenza del dispositivo ad urti anche molto forti (50000 g nel nostro caso), grazie all'elevata miniaturizzazione. Vengono ora riportate le caratteristiche principali del dispositivo:

- Sensibilità: 500 mV/g
- Offset tipico a 20°C: 1.25 V
- Vref tipico a 5V: 2.5 V
- Tensione di uscita x,y a 5V: 0.1 ÷ 4.9 V
- Tensione di alimentazione: 3.0 ÷ 5.25 V
- Temperatura di utilizzo: -40 ÷ +105°C

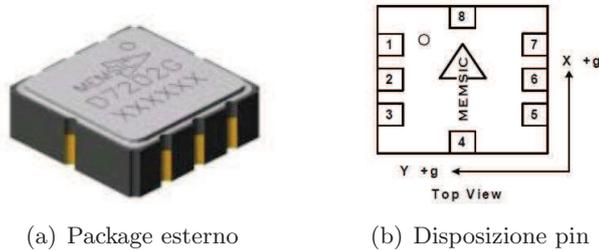


Figura 1.2: MXA2500ML

**Pin Description: LCC-8 Package**

Pin	Name	Description	I/O
1	T <sub>OUT</sub>	Temperature (Analog Voltage)	O
2	A <sub>OUTY</sub>	Y-Axis Acceleration Signal	O
3	Gnd	Ground	I
4	V <sub>DA</sub>	Analog Supply Voltage	I
5	A <sub>OUTX</sub>	X-Axis Acceleration Signal	O
6	V <sub>ref</sub>	2.5V Reference Output	O
7	Sck	Optional External Clock	I
8	V <sub>DD</sub>	Digital Supply Voltage	I

Figura 1.3: Mappatura pin

### 1.2.1 Principio di funzionamento

Il funzionamento di questi accelerometri è basato sullo spostamento di una piccola bolla d'aria riscaldata all'interno di una cavità sigillata. La differenza di temperatura tra le due termocoppie poste alla base del dispositivo, permette di ricavare una variazione di tensione all'uscita, proporzionale alla sollecitazione subita dal dispositivo, sia per variazioni di tilt (caso statico) che per shock temporanei (caso dinamico).

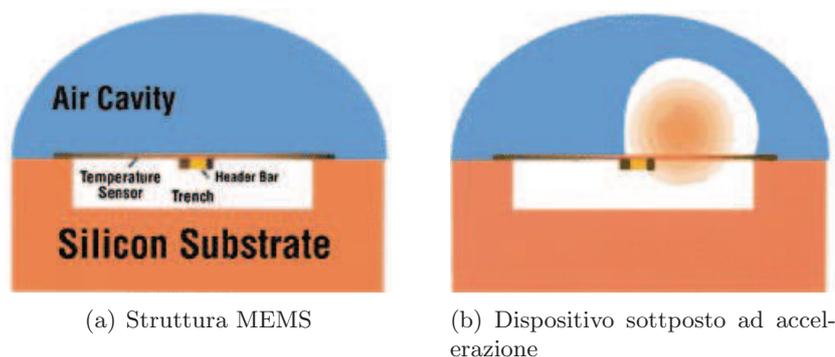


Figura 1.4: Funzionamento MEMS

Il condizionamento del segnale direttamente *on-chip* permette di ridurre al minimo i possibili errori di tolleranza, riguardanti per esempio, le termocoppie. La possibilità da parte della ditta produttrice di riprogrammare alcuni parametri del circuito permette una vasta gamma di applicazioni di questi dispositivi.

Altra caratteristica vantaggiosa del dispositivo è la presenza un sensore di temperatura con uscita analogica, utile per verificare la tensione di offset, che da essa risulta fortemente influenzata.

L'integrazione dell'elettronica nel dispositivo consente di avere un output di verifica ad un livello di tensione stabile, il quale si è rivelato molto utile in fase di test del circuito creato per l'alimentazione ed il filtraggio dei segnali.

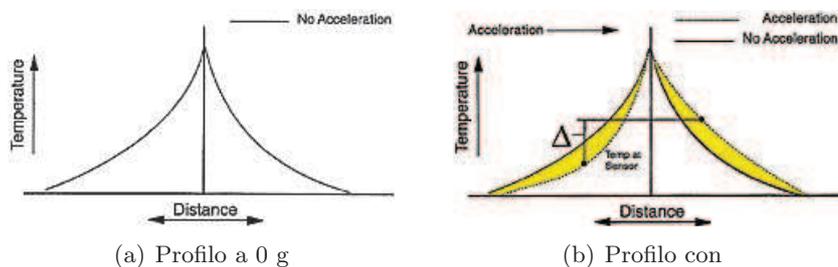


Figura 1.5: Profili di temperatura

## Capitolo 2

# Prima acquisizione

### 2.1 Libreria DAQmx

La libreria DAQmx, fornita con la scheda di acquisizione, permette di gestire il processo di acquisizione direttamente in ambiente LabVIEW. La libreria è progettata per funzionare con molte tipologie diverse di strumenti. Inconveniente di questo approccio è l'impossibilità di riconoscere autonomamente quale dispositivo è collegato al computer, di conseguenza è necessaria una programmazione attenta che richiede una conoscenza approfondita, delle funzioni disponibili e dei parametri del dispositivo utilizzato.

La struttura base per questa libreria è divisa in task, corrispondenti alle varie operazioni implementabili. Il task creato per questo esempio è *Onda triangolare*, che ha lo scopo di misurare la tensione triangolare applicata tra due morsetti di una scheda apposita. Le linee *task* ed *error* collegano i vari blocchi dello stesso task. Vengono create insieme al task e terminano con la sua cancellazione. In caso di errore, il blocco che lo riscontra genera un codice di errore e lo invia tramite la linea *error* al blocco successivo, il quale, lo trasmette a sua volta e così via. Prima della cancellazione del task deve essere gestito l'errore e comunicato all'utente. In questo primo esempio riportato però non viene implementato nessun controllo di errore.

### 2.2 Diagramma a blocchi

Viene ora riportato il primo esempio di acquisizione. Verrà eseguito un confronto tra i dati acquisiti con la scheda DAQ ed i valori misurati con l'oscilloscopio.

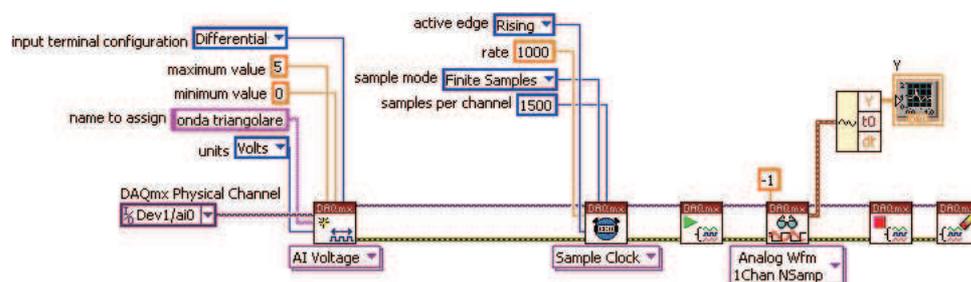


Figura 2.1: Diagramma a blocchi

In figura sono riportati i blocchi essenziali per una misura differenziale tra due morsetti:

- 
**Create Channel AI Voltage:** necessario per instaurare il canale fisico con la scheda di acquisizione, dove vengono impostati il tipo di misura che si va a effettuare, il minimo e massimo valore, l'unità di misura ed un eventuale nome al canale.
- 
**Timing Sample clock:** permette la sincronizzazione, l'impostazione del numero di campioni salvati, del sample rate del e fronte sensibile al clock.
- 
**Start Task:** fa partire l'acquisizione vera e propria del dispositivo, rispettando i parametri settati nei blocchi precedenti.
- 
**Read Analog waveform:** legge i campioni del task in corso e, a seconda del tipo di acquisizione, restituisce un valore o una serie di valori.
- 
**Stop Task:** blocca l'esecuzione della misura da parte della scheda di acquisizione.
- 
**Clear Task:** cancella il task di misura.

Tipologia di misura	differenziale
Valore massimo	5
Valore minimo	0
Unità di misura	Volts
Fronte sensibile del clock	salita
Sample rate	1000
Sample mode	campioni finiti
Sample per channel	1500

Tabella 2.1: Tabella valori impostati

Con Questi valori la finestra temporale misurata è di un secondo e mezzo, corrispondente al periodo dell'onda che misureremo.

### 2.3 Scheda generazione segnali

La scheda usata per la generazione del segnale di prova è una Agilent 54654, alimentata da una batteria a 9V.

Il segnale di interesse è un'onda triangolare che, da *Training Guide* della scheda, ha un periodo di 1.6 s ed un'ampiezza picco-picco 1.2V.

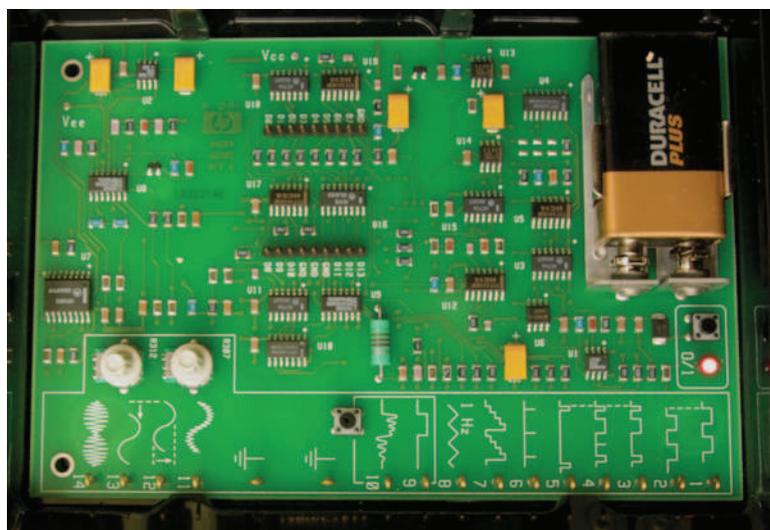


Figura 2.2: Agilent 54654

## 2.4 Confronto LabVIEW oscilloscopio

Viene ora presentato un confronto tra i valori ricavati con LabVIEW e quelli forniti dall'oscilloscopio in dotazione. Si vuole così valutare l'affidabilità del sistema ed il corretto setup dei valori necessari, relativi alla misurazione di un segnale a bassa frequenza e con range di valori ristretto, simile all'uscita dell'accelerometro. Come si può notare dalle scale dei valori, i due segnali coincidono.

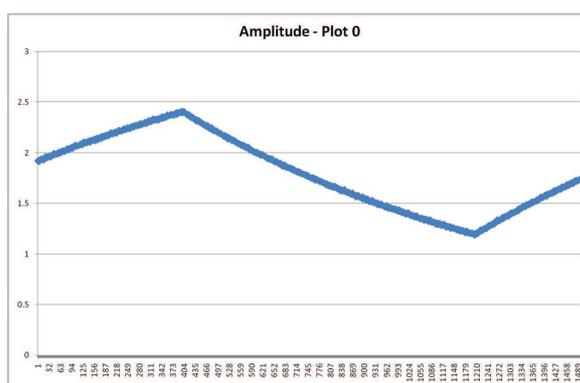


Figura 2.3: Acquisizione in LabVIEW

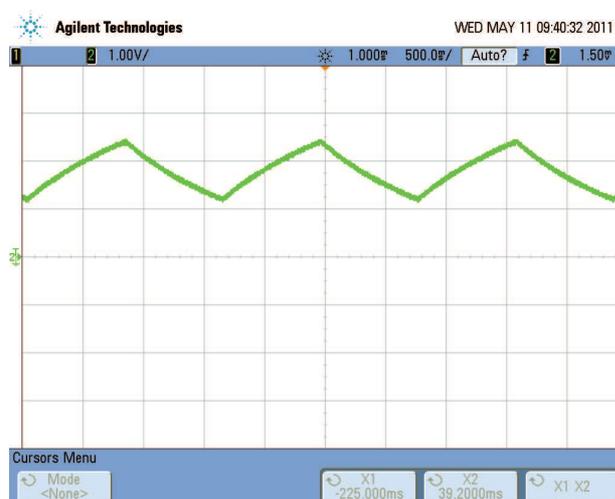


Figura 2.4: Acquisizione con oscilloscopio

## Capitolo 3

# Progettazione

### 3.1 Circuito

Parte fondamentale del lavoro svolto in laboratorio è stata la progettazione e la successiva fabbricazione ed assemblaggio del circuito di alimentazione e filtraggio per l'accelerometro MEMS. Per l'alimentazione viene utilizzata una configurazione, suggerita dal *datasheet*, in grado di attenuare il rumore. Questa prevede l'utilizzo di una resistenza da  $10\ \Omega$  e due condensatori da  $0.1\ \mu\text{F}$ .

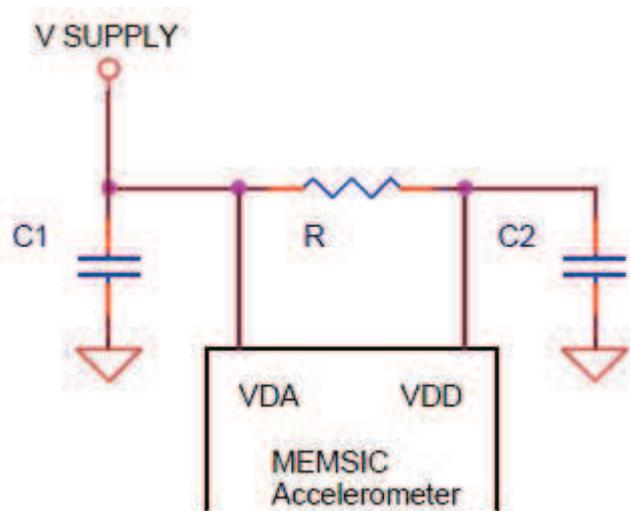


Figura 3.1: Circuito riduzione rumore

### 3.1.1 Capture CIS

La progettazione del circuito è stata eseguita con il programma Capture CIS (Component Information System) della suite Orcad. In Capture CIS è disponibile un catalogo off e on-line dei componenti suddivisi per tecnologie, tipologia produttiva e parametri tecnici. Il vantaggio enorme di questo database sta nella facilità di reperimento delle informazioni relative ai componenti e l'incorporamento diretto dei footprint dei componenti necessari per passare dal circuito al layout. E' stato comunque necessario l'inserimento manuale del footprint dell'accelerometro, in quanto non presente nelle librerie. Una volta creato il nuovo footprint all'interno delle nostre librerie, è stato possibile associarlo allo schematico. Il passaggio tra circuito e layout viene eseguito in automatico. Dal circuito mostrato in figura non è stato possibile ricavare un layout semplice da implementare quindi è stato leggermente modificato, riorganizzando le uscite ed alcuni collegamenti per garantire più una facile implementazione della scheda.

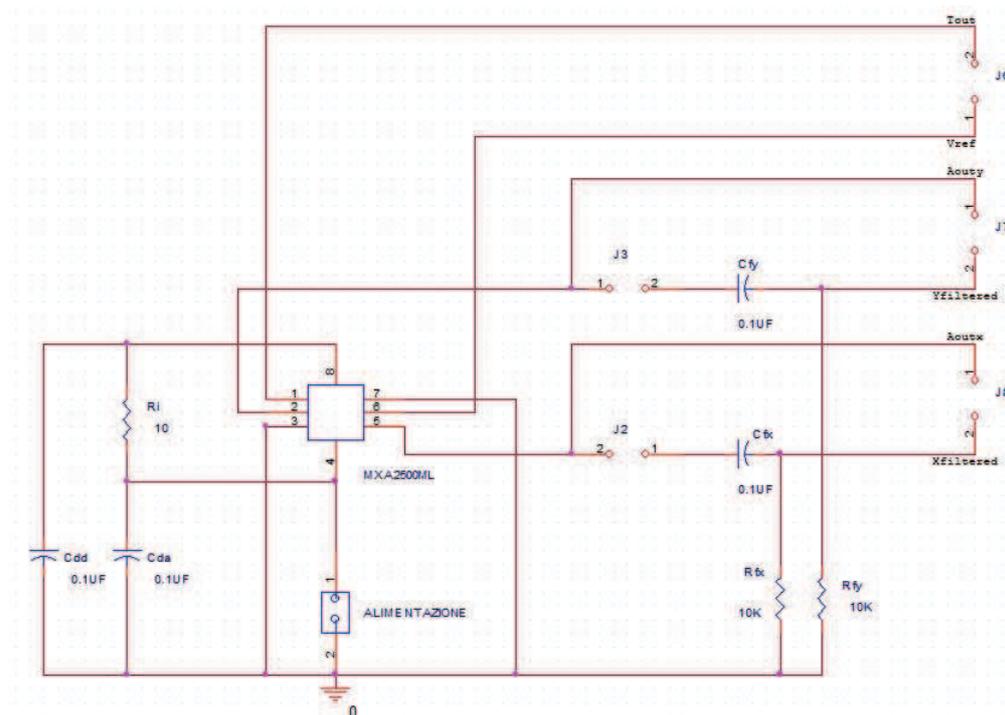
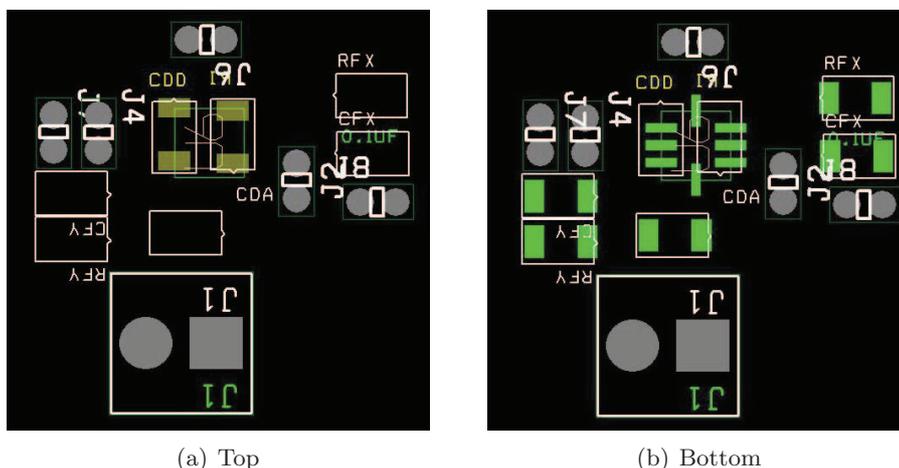


Figura 3.2: Circuito realizzato con Capture CIS

Finita la progettazione con Capture è stato sufficiente aggiungere ad ogni componente il footprint corrispondente. Sono stati utilizzati componenti con tecnologia SMD 1206 a 2 terminali con dimensioni 3.2 x 1.6 mm e, poichè le dimensioni sono standardizzate, è bastato utilizzare lo stesso footprint per resistenze e condensatori. Per l'alimentazione e le uscite abbiamo utilizzato dei jumper standard facilmente reperibili e di facile utilizzo.

### 3.1.2 Layout PLUS

Vengono ora riportate due immagini del programma Layout, che mostrano il *top* e il *bottom* della scheda realizzata senza nessun collegamento, per mostrare la disposizione dei componenti e su quale piano essi verranno successivamente collocati.



(a) Top

(b) Bottom

Figura 3.3: Layout senza collegamenti

Sul piano *top* verranno collocati l'accelerometro e la maggior parte dei componenti, di cui si intravede solo la piazzola, mentre nel piano *bottom* saranno presenti solamente una resistenza e un condensatore per la riduzione del rumore. La scelta di utilizzare due strati è stata necessaria per eliminare le sovrapposizioni delle piste, per questo sono stati praticati alcuni fori sulla scheda al di sotto dell'accelerometro, per portare il segnale tra un piano e l'altro. Gli altri fori visibili sono quelli per i piedini dei jumper, che per praticità verranno installati rivolti verso il *bottom*. In questo modo la scheda riceverà alimentazione e fornirà le uscite verso il *bottom*. Questo sarà da tener presente nell'implementazione successiva in LabVIEW, in quanto l'accelerometro è sottosopra e gli assi andranno quindi ribaltati attraverso il software.

Qui vengono riportate due immagini in cui si possono vedere le piste che collegano i vari componenti. Nella parte sinistra del *top* è presente la sezione di filtraggio dell'uscita y, abilitabile attraverso il jumper 4. Ai capi del jumper 7 abbiamo sopra l'uscita non filtrata e al di sotto quella filtrata, per eliminare la componente continua. Lo stesso schema è ripetuto nella parte destra, dove si trova il filtro dell'uscita x, il jumper 2 per la sua abilitazione ed il jumper 8 per l'uscita. Nel *bottom* si vedono il collegamento tra i due strati attraverso i due fori di via, per il circuito di riduzione del rumore, e la pista per collegare il piedino relativo alla tensione di riferimento.

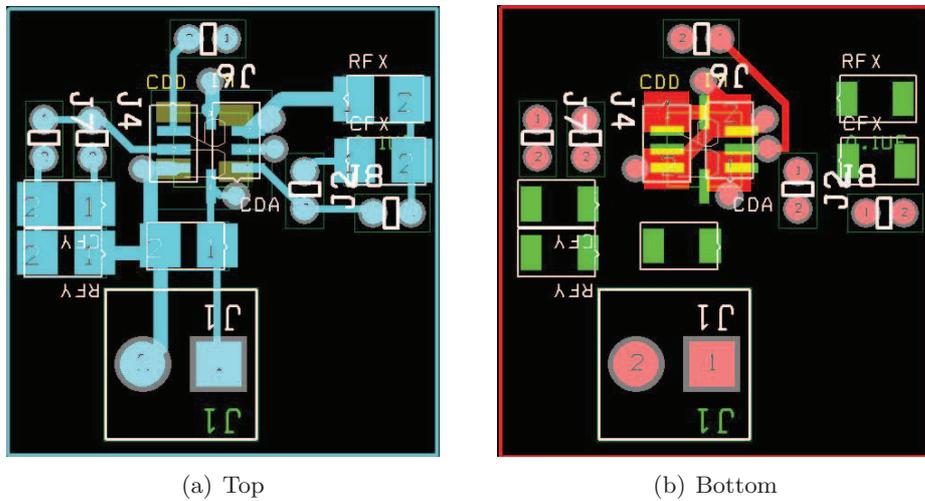


Figura 3.4: Layout con collegamenti

L'ultimo passaggio prima di passare alla fase di produzione prevede la stesura dello strato di ground, detto *copper pour*, su entrambi i lati. Ciò permette di inglobare le piste che conducono a massa e lasciare solo quelle di segnale e dell'alimentazione. L'utilizzo di questi piani di massa permette di ridurre di molto le piste da creare e risolve alcuni problemi di collegamento tra piedini, che comporterebbero la stesura di una pista accavallata ad un'altra. In questo modo invece il piano di massa aggira la pista e permette un facile collegamento. Il *copper pour* serve anche come piano di riferimento per i segnali, dato che vengono effettuate misure differenziali è utile avere sempre a disposizione la massa del circuito.

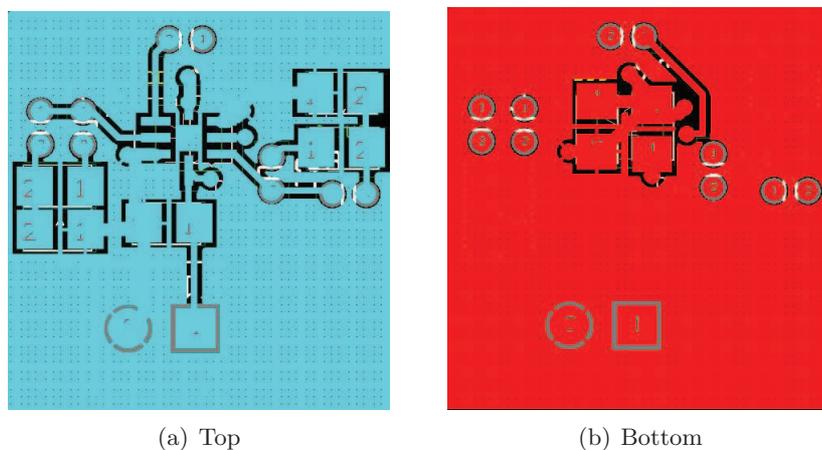


Figura 3.5: Layout con copper pour

### 3.1.3 Fresa a controllo numerico

Ora vedremo come dal layout si passa alla produzione vera e propria. Il primo passo da fare è impostare all'interno di Layout Plus le specifiche per la fresa. Vengono creati i file GERBER, utilizzati per la stampa del circuito PCB, e passati alla fresa a controllo numerico. La fresa utilizzata è una ProtoMat S62 che viene collegata a un personal computer attraverso un cavo USB. Quando vengono caricati i file nell'apposito programma del computer, viene eseguita un'analisi. Al termine viene presentata una lista di utensili che la fresa necessita per eseguire il nostro stampato. Questi vengono quindi inseriti nell'apposito caricatore e durante la lavorazione la fresa andrà a cambiare automaticamente l'utensile necessario.

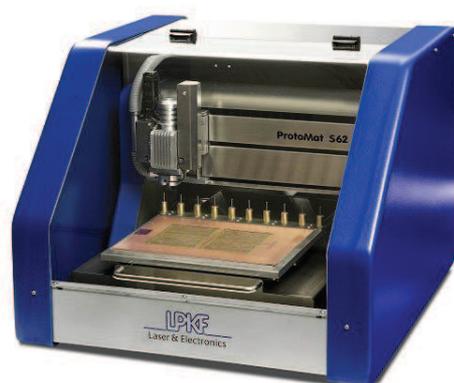


Figura 3.6: ProtoMat S62

La tecnica utilizzata sfrutta a fondo il *copper pour* che abbiamo steso durante la progettazione. La base su cui la fresa andrà a lavorare è formata da due strati di rame separati da uno di materiale isolante. In questo modo verranno scavati solo i canali per delimitare le piste, rimuovendo lo strato di rame per eliminare il collegamento elettrico. Prima di procedere con la stampa è necessario calibrare la fresa, questo viene fatto mediante dei fori campione sparsi per la base. Tramite una videocamera viene visualizzato a schermo un mirino che va centrato sul foro, si riesce così a dare delle coordinate fisse alla fresa.

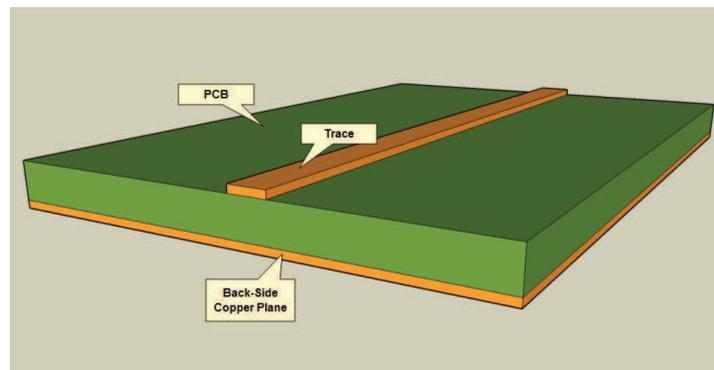


Figura 3.7: Struttura del foglio di rame

Il processo dura pochi minuti per lato e alla fine è sufficiente staccare la scheda dal foglio di rame.

La saldatura di componenti così piccoli (ogni piedino è largo appena 0.62 mm) di solito viene affidata a dei macchinari ma, data la ristretta quantità, sono stati saldati a mano. E' stato necessario l'utilizzo di un flussante e di una stazione saldante con lente d'ingrandimento, per riuscire a collegare correttamente i piedini alle piste. Nella prima prova della scheda, il comportamento del circuito non era quello voluto, è stato quindi necessario ripassare i solchi prodotti dalla fresa, per eliminare le parti di stagno che mettevano a contatto le linee di segnale con il piano di massa.

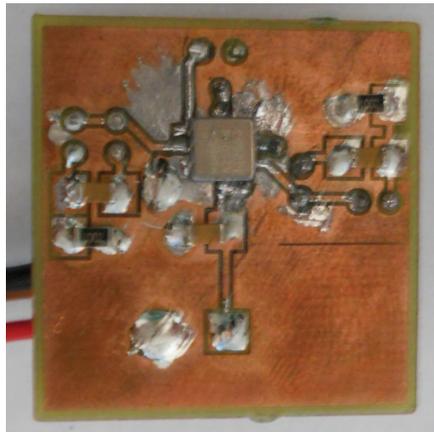


Figura 3.8: Top

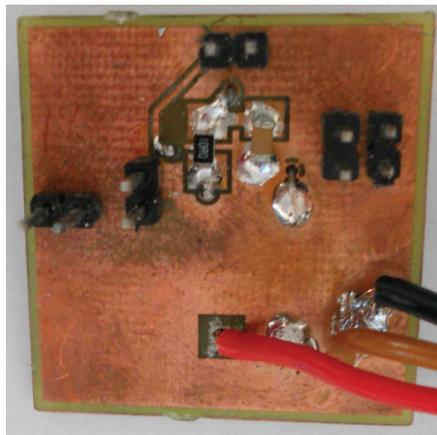


Figura 3.9: Bottom

### 3.1.4 Test del circuito

In questa fase è stato testato il circuito, le varie tensioni e le uscite. Per evitare di bruciare il componente in genere viene posizionato un diodo Zener in contropolarizzazione all'ingresso. Una tensione di breakdown di 5 V permette l'alimentazione dalla scheda di acquisizione o da una sorgente non stabilizzata. Non è stato utilizzato questo metodo perchè questo circuito è solo un primo prototipo di quello che verrà realizzato più avanti. Si è dunque utilizzato un alimentatore esterno stabilizzato. Il test è stato effettuato con un oscilloscopio, sono state rilevate le tensioni di offset di temperatura e il range di valori riscontrati in uscita:

Tensione di offset	1.27 V
Tensione di temperatura	1.3 V
Tensione di riferimento	2.5 V
Tensione a 90	1.76 V
Tensione a -90	0.72 V

Tabella 3.1: Tabella valori di test

I valori rilevati sono compatibili con quelli presenti nel datasheet, dimostrando così la validità della scheda prodotta. E' stata rilevata una grande accuratezza nel valore di risoluzione, riscontrando esattamente 500 mV/g nel passare da inclinazione nulla a + e - 90 gradi.

## Capitolo 4

# Misure statiche di angoli

In questa sezione vengono riportate e spiegate le varie parti del *vi* (*virtual instrument*) realizzato con LabVIEW per la gestione, la calibratura e la misura di angoli, utilizzando la scheda prodotta e la scheda di acquisizione NI-USB-6211. Questo è lo schema del sistema di misura utilizzato.

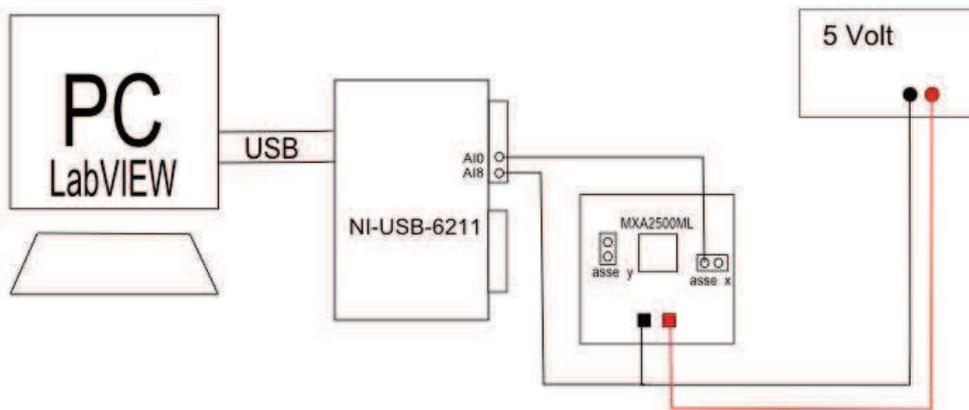


Figura 4.1: Schema di principio

## 4.1 Parametri di acquisizione

Questa parte viene eseguita una sola volta, prima dell'acquisizione, e serve a impostare i parametri della scheda NI-USB nel seguente modo:

Tipo di misura	differenziale
Massimo valore	5
Minimo Valore	0
Unità di misura	Volts
Canale fisico	Dev1/ai0
Sample rate	1000 sample/s
Fronte di campionamento	salita
Metodo di campionamento	finiti campioni
Numero di campioni da acquisire	1000

Tabella 4.1: Parametri di acquisizione

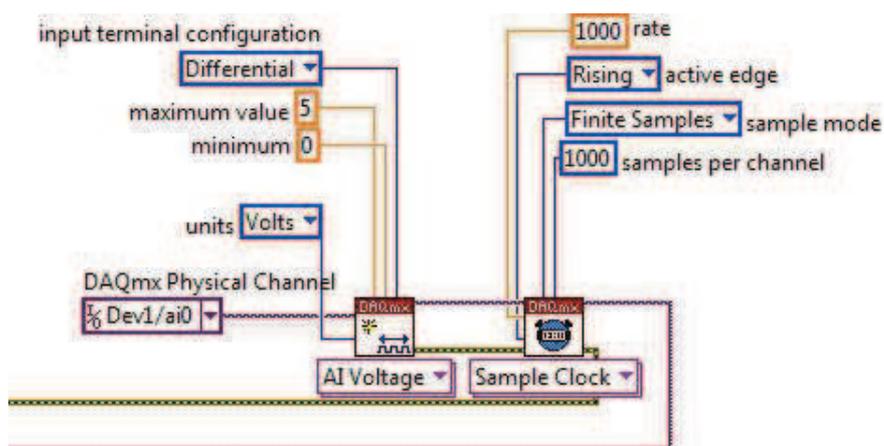


Figura 4.2: Blocchi di settaggio parametri

## 4.2 Calibrazione

La fase successiva è quella di calibrazione. Viene effettuata una prima misura, specificando da software di mantenere il dispositivo orizzontalmente. Il valore calcolato in questa prima misura verrà utilizzato per il calcolo dell'angolo. Viene ora riportata la schermata del *front panel* per la calibrazione e la parte di *vi* che si occupa dell'acquisizione e del calcolo della tensione di offset.

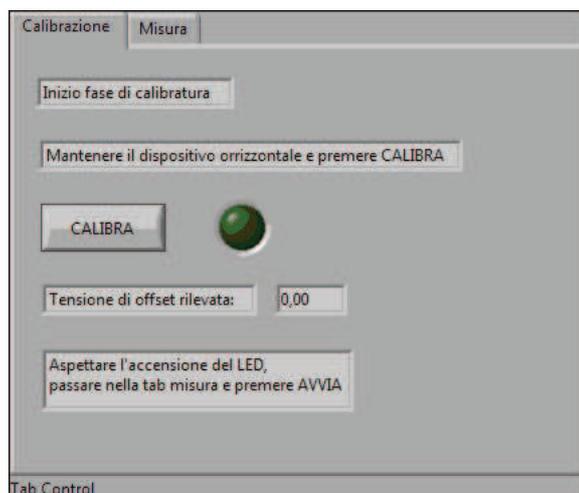


Figura 4.3: Front panel calibrazione

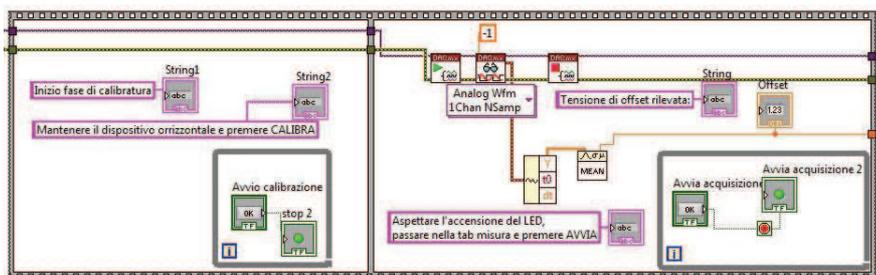


Figura 4.4: Blocchi di calibrazione

La sequenza serve per dare la temporizzazione al *vi* in modo che l'utente attenda il corretto completamento delle operazioni prima di procedere. I valori tipici di questa tensione sono compresi tra 1.2 e 1.3 V, e variano a seconda della temperatura.

### 4.3 Misurazione dell'angolo

Questa è la parte principale del *vi*, dove viene calcolata l'inclinazione. Viene rilevata la tensione di uscita dalla scheda e si utilizza la tensione di offset calcolata nello step precedente.



Figura 4.5: Front panel misura

Nella schermata del *front panel* si può notare un piccolo grafico che mostra l'andamento della tensione durante il periodo di acquisizione, che in questo caso vale:

$$\frac{N_{sample}}{sample/s} = \frac{1000}{1000} = 1s$$

Qui l'utente deve solamente decidere quando avviare l'acquisizione ed il programma farà continue acquisizioni, ogni secondo, e calcolerà l'inclinazione fino a quando verrà fermato tramite il pulsante *stop*. Per calcolare l'inclinazione in radianti è stata utilizzata la seguente formula:

$$\alpha_{rad} = \arcsin\left(\frac{V_x - V_o}{risoluzione}\right)$$

Dove  $V_x$  è la media dei valori calcolata dall'acquisizione,  $V_o$  è la tensione di offset calcolata nella tab calibrazione e *risoluzione* è il valore fornito dal produttore, pari a  $500mV/g$ .

Con le nostre misurazioni riusciamo a coprire un range di angoli tra  $-90$  e  $+90$  gradi. Unico accorgimento nel calcolo è il cambio di segno perché l'accelerometro si trova nella parte inferiore della scheda e quindi gli assi sono opposti.

Qui vengono riportati i blocchi necessari per il calcolo dell'angolazione, dove la linea arancione proveniente da sinistra è relativa alla tensione di offset  $V_o$ . E' presente l'insieme di blocchi necessari al ricalcolo dell'angolo e alla trasformazione da radianti a gradi. Al di fuori del ciclo è presente un unico blocco, *Clear Task*, che viene eseguito solamente dopo che è stato premuto il tasto *stop* come ultima operazione da eseguire. Come già detto in precedenza non è stato implementato nessun sistema di cattura degli errori, quindi in caso di malfunzionamento non si riesce a risalire né al blocco che lo ha prodotto né al tipo di errore riscontrato.

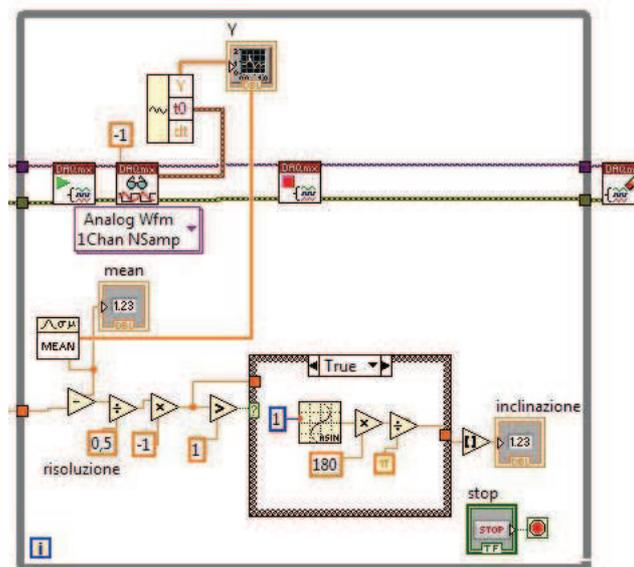


Figura 4.6: Blocchi di misura

La funzione svolta da questi blocchi è quella di calcolare la media della tensione misurata, sottrarre la tensione di offset e calcolare l'inclinazione in radianti tramite la seguente formula:

$$\alpha_{rad} = \arcsin\left(\frac{V_x - V_o}{risoluzione}\right)$$

La conversione tra radianti e gradi viene calcolata in questo modo:

$$\alpha_{grad} = \alpha_{rad} \cdot \frac{180}{\pi}$$

### 4.3.1 Correzione degli errori

Nel nostro esempio è stato necessario introdurre un piccolo accorgimento per eliminare alcuni errori dovuti a due fattori:

- perdita di sensibilità della funzione  $\sin x$  vicino a  $\pm 90$  gradi
- piccoli errori di parallasse commessi nel montaggio dell'accelerometro

Secondo i calcoli l'argomento dell'arcsin risultava maggiore di 1 e quindi con soluzione impossibile.

Per ovviare al problema è stato inserito un blocco booleano in grado di sostituire tutti i valori maggiori di 1 con 1. Questa piccola perdita di precisione è inevitabile. Una soluzione più raffinata sarebbe stata la linearizzazione del seno per angoli vicini a quelli critici, dove si può approssimare  $\alpha = V_x * k$ . Questo procedimento avrebbe però portato ad una complicazione del *vi* non necessaria ai fini di questo elaborato, volto principalmente alla creazione della scheda di alimentazione, filtraggio e del suo test operativo. A livello sperimentale inoltre, non è possibile misurare inclinazioni superiori a 90 gradi, dato che il nostro accelerometro non è in grado di conoscere la sua posizione assoluta, essendo sprovvisto di giroscopio.

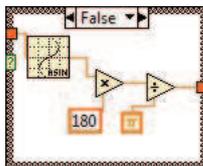


Figura 4.7: Valori del campo False

### 4.3.2 Esempi di misura

Vengono ora riportati tre esempi di misurazione, effettuati con la nuova scheda, realizzata come evoluzione di quella progettata in questo elaborato. Si sono considerati tre casi distinti: inclinazione nulla, maggiore e minore di 0.

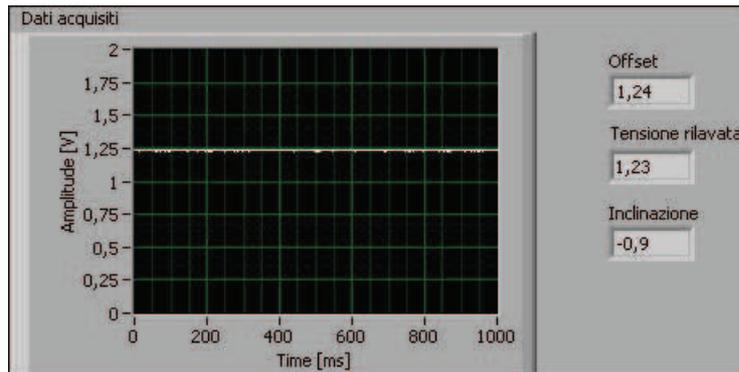


Figura 4.8: Front panel 0 gradi

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{1,23-1,24}{0,5}\right) \cdot \frac{180}{\pi} = -1,14$$

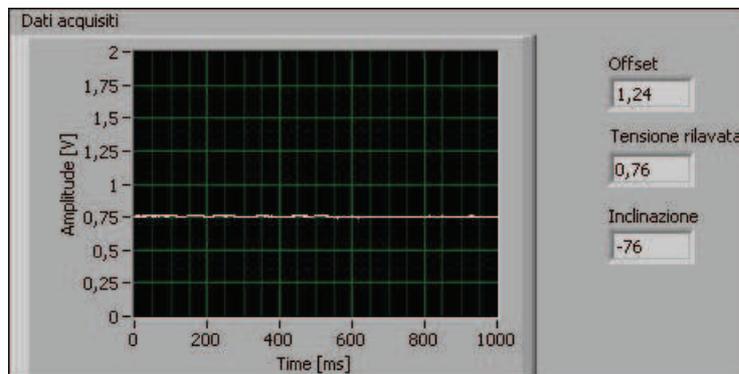


Figura 4.9: Front panel inclinazione negativa

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{0,76-1,24}{0,5}\right) \cdot \frac{180}{\pi} = -73,73$$

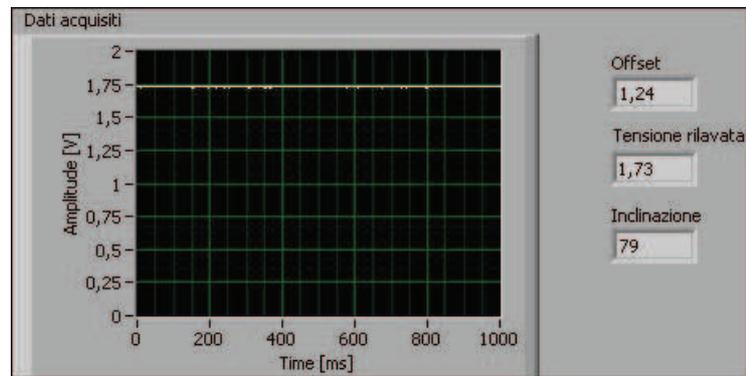


Figura 4.10: Front panel inclinazione positiva

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{1.73-1.24}{0.5}\right) \cdot \frac{180}{\pi} = 78.52$$

Le piccole differenze tra i valori riportati da LabVIEW e quelli calcolati manualmente sono dovuti all'alto grado di approssimazione impostato in LabVIEW.

## Capitolo 5

# Conclusione

La scheda progettata e testata in questo elaborato è servita a realizzarne una più evoluta ed organizzata sul piano della disposizione dei componenti. La nuova scheda viene ora utilizzata nel laboratorio di misure elettroniche come esperienza di acquisizione dati con una scheda NI USB-6211 interfacciata a LabVIEW. La prolungata fase di test ha permesso di sondare a fondo la validità del dispositivo ed il corretto funzionamento in tutte le sue caratteristiche statiche.



## Capitolo 6

# Appendice

In questa sezione vengono riportati tutti i diagrammi a blocco per esteso e le foto del sistema di misura finale utilizzato nel laboratorio di misure e il datasheet del dispositivo MEMS.

CAPITOLO 6. APPENDICE

**MXA2500G/M SPECIFICATIONS** (Measurements @ 25°C, Acceleration = 0 g unless otherwise noted; V<sub>DD</sub>, V<sub>DA</sub> = 5.0V unless otherwise specified)

Parameter	Conditions	MXA2500G			MXA2500M			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
<b>SENSOR INPUT</b>								
Measurement Range <sup>1</sup>	Each Axis	±1.7			±1.7			g
Nonlinearity	Best fit straight line X Sensor to Y Sensor		0.5	1.0		0.5	1.0	% of FS
Alignment Error <sup>2</sup>			±1.0			±1.0		degrees
Transverse Sensitivity <sup>3</sup>				±2.0			±2.0	%
<b>SENSITIVITY</b>								
Sensitivity, Analog Outputs at pins A <sub>OUTX</sub> and A <sub>OUTY</sub> <sup>5</sup>	Each Axis	475	500	525	475	500	525	mV/g
Change over Temperature		-10		+8	-25		+8	%
<b>ZERO g BIAS LEVEL</b>								
0 g Offset <sup>5</sup>	Each Axis	-0.1	0.0	+0.1	-0.1	0.0	+0.1	g
0 g Voltage <sup>5</sup>		1.20	1.25	1.30	1.20	1.25	1.30	V
0 g Offset over Temperature	Based on 500 mV/g		±1.5			±1.5		mg/°C
<b>NOISE PERFORMANCE</b>								
Noise Density, rms	Without frequency compensation		0.2	0.4		0.2	0.4	mg <sup>2</sup> /√Hz
<b>FREQUENCY RESPONSE</b>								
3dB Bandwidth - uncompensated		15	17	19	15	17	19	Hz
3dB Bandwidth - compensated <sup>4</sup>			>160			>160		Hz
<b>TEMPERATURE OUTPUT</b>								
T <sub>OUT</sub> Voltage		1.15	1.25	1.35	1.15	1.25	1.35	V
Sensitivity		4.6	5.0	5.4	4.6	5.0	5.4	mV/°K
<b>VOLTAGE REFERENCE OUTPUT</b>								
V <sub>REF</sub> Output	@3.0V-5.25V supply	2.4	2.5	2.65	2.4	2.5	2.65	V
Change over Temperature			0.1			0.1		mV/°C
Current Drive Capability	Source			100			100	µA
<b>SELF TEST</b>								
Continuous Voltage at A <sub>OUTX</sub> , A <sub>OUTY</sub> under Failure	@5.0V Supply, output rails to supply voltage		5.0			5.0		V
Continuous Voltage at A <sub>OUTX</sub> , A <sub>OUTY</sub> under Failure	@3.0V Supply, output rails to supply voltage		3.0			3.0		V
<b>A<sub>OUTX</sub> and A<sub>OUTY</sub> OUTPUTS</b>								
Normal Output Range	@5.0V Supply	0.1		4.9	0.1		4.9	V
	@3.0V Supply	0.1		2.9	0.1		2.9	V
Current	Source or sink, @ 3.0V-5.25V supply			100			100	µA
Turn-On Time <sup>6</sup>	@5.0V Supply		160			160		nS
	@3.0V Supply		300			300		nS
<b>POWER SUPPLY</b>								
Operating Voltage Range		3.0		5.25	3.0		5.25	V
Supply Current	@ 5.0V	2.5	3.1	3.9	2.5	3.1	3.9	mA
Supply Current <sup>5</sup>	@ 3.0V	3.0	3.8	4.6	3.0	3.8	4.6	mA
<b>TEMPERATURE RANGE</b>								
Operating Range		0		+70	-40		+105	°C

**NOTES**  
<sup>1</sup> Guaranteed by measurement of initial offset and sensitivity.  
<sup>2</sup> Alignment error is specified as the angle between the true and indicated axis of sensitivity.  
<sup>3</sup> Transverse sensitivity is the algebraic sum of the alignment and the inherent sensitivity error.  
<sup>4</sup> External circuitry is required to extend the MB bandwidth (ref. Application Note AN-00MX-003).  
<sup>5</sup> The device operates over a 3.0V to 5.25V supply range. Please note that sensitivity and zero g bias level will be slightly different at 3.0V operation. For devices to be operated at 3.0V in production, they can be trimmed at the factory specifically for this lower supply voltage operation, in which case the sensitivity and zero g bias level specifications on this page will be met. Please contact the factory for specially trimmed devices for low supply voltage operation.  
<sup>6</sup> Output settled to within ±17mg.

Figura 6.1: Datasheet MXA2500ML

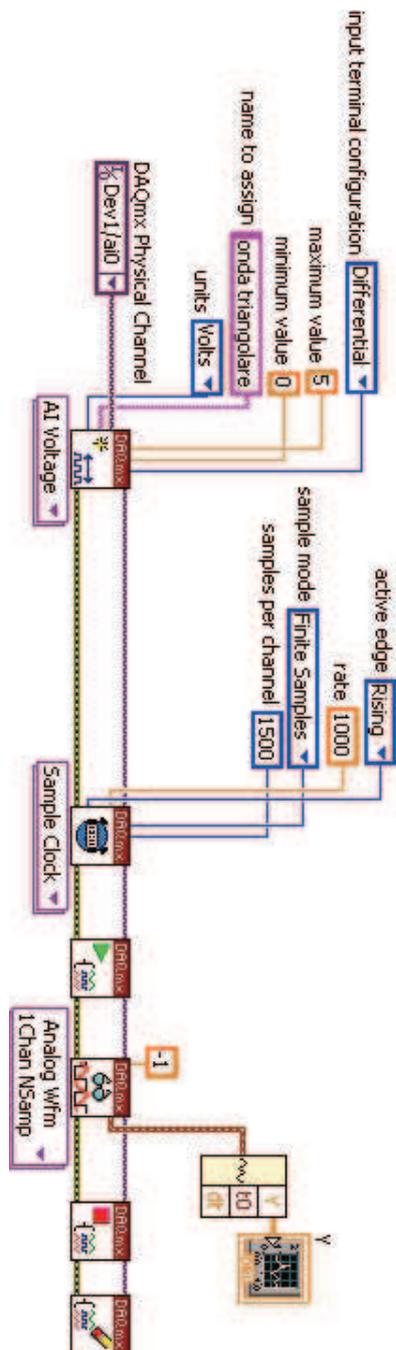
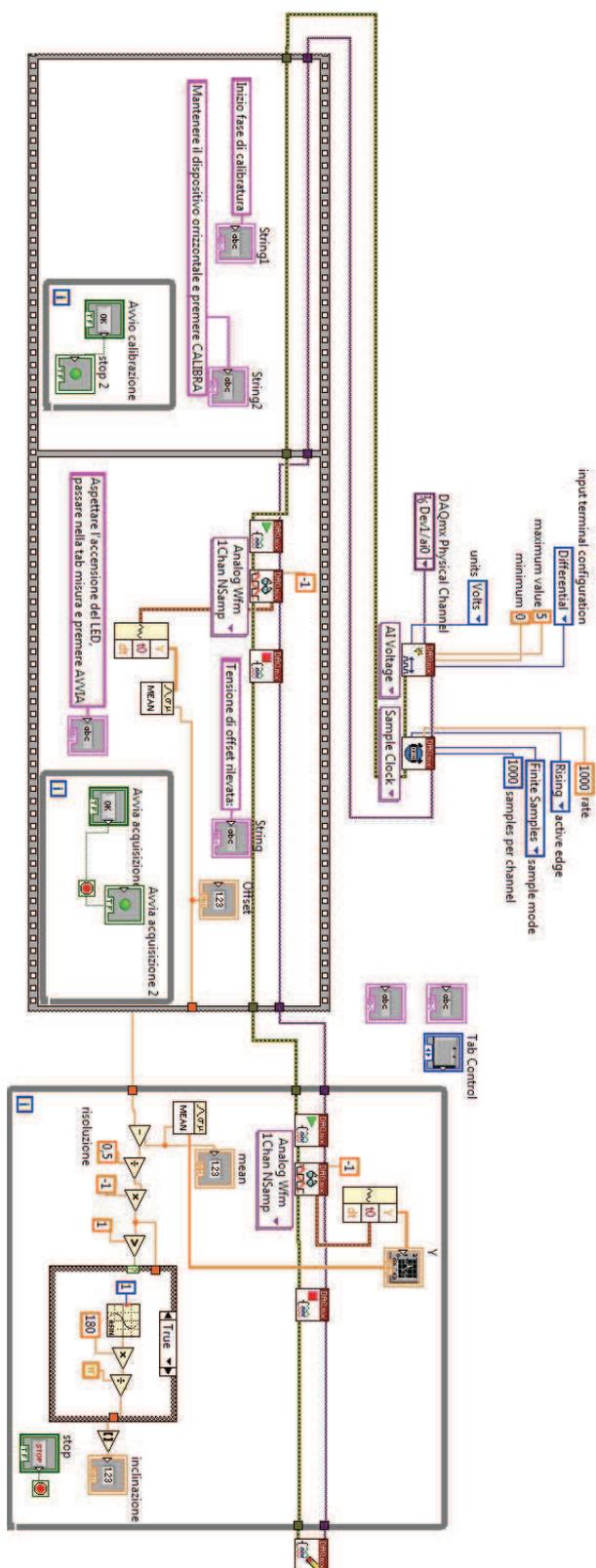


Figura 6.2: Diagramma a blocchi prima acquisizione



34 Figura 6.3: Diagramma a blocchi misura statica di angoli

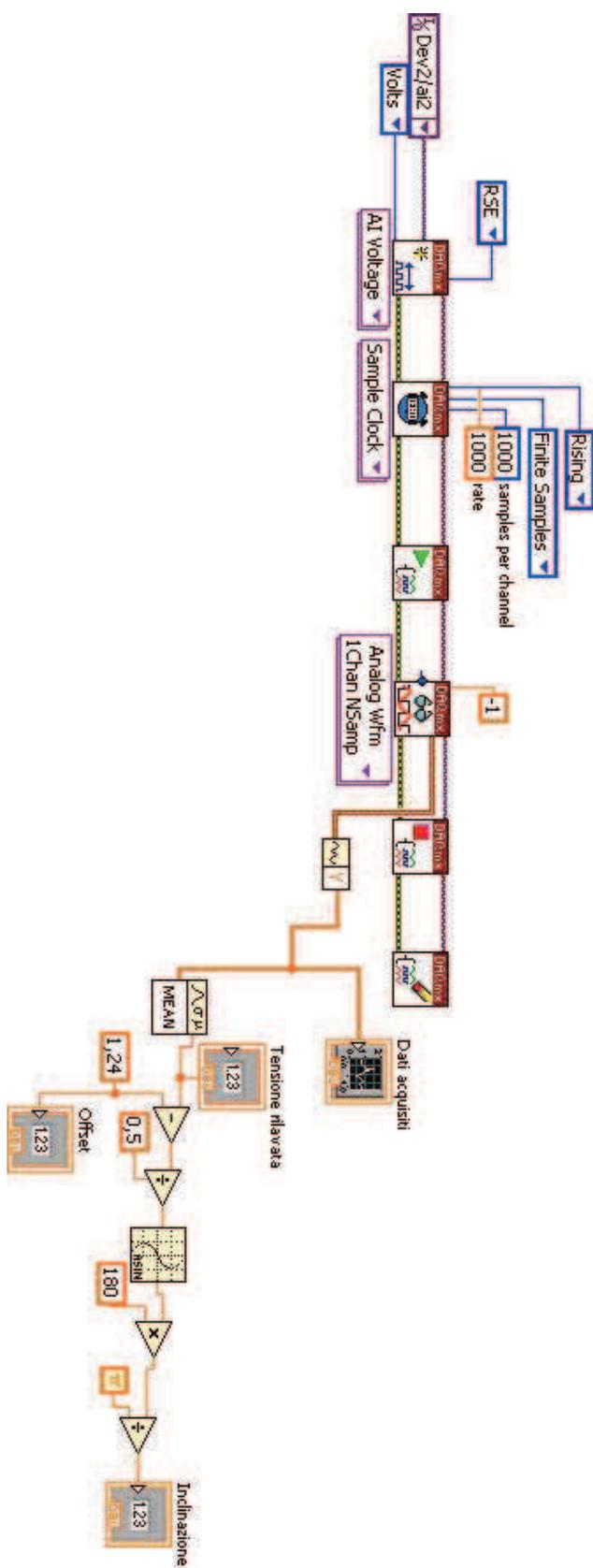


Figura 6.4: Diagramma a blocchi test scheda usata in laboratorio

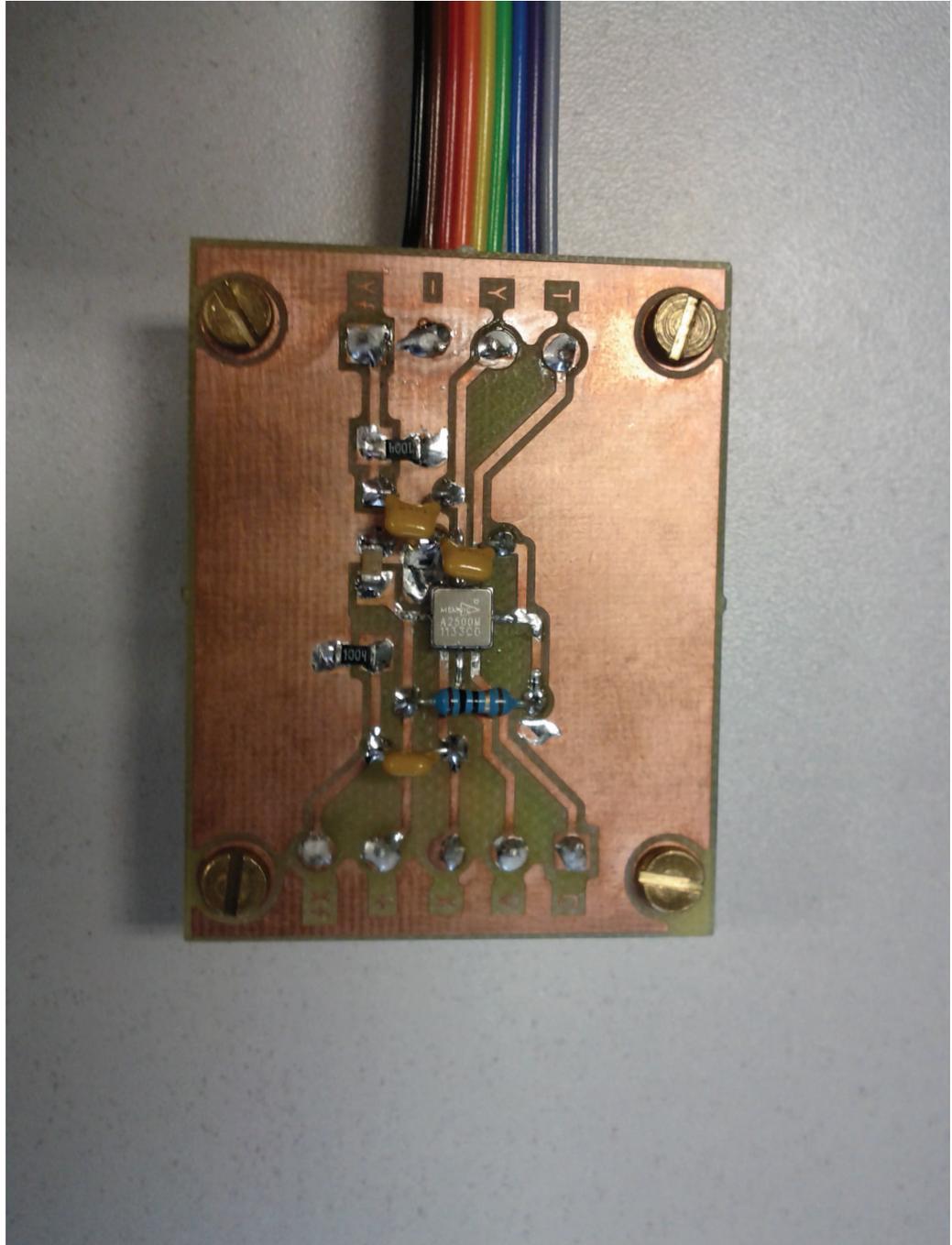


Figura 6.5: Scheda usata in laboratorio

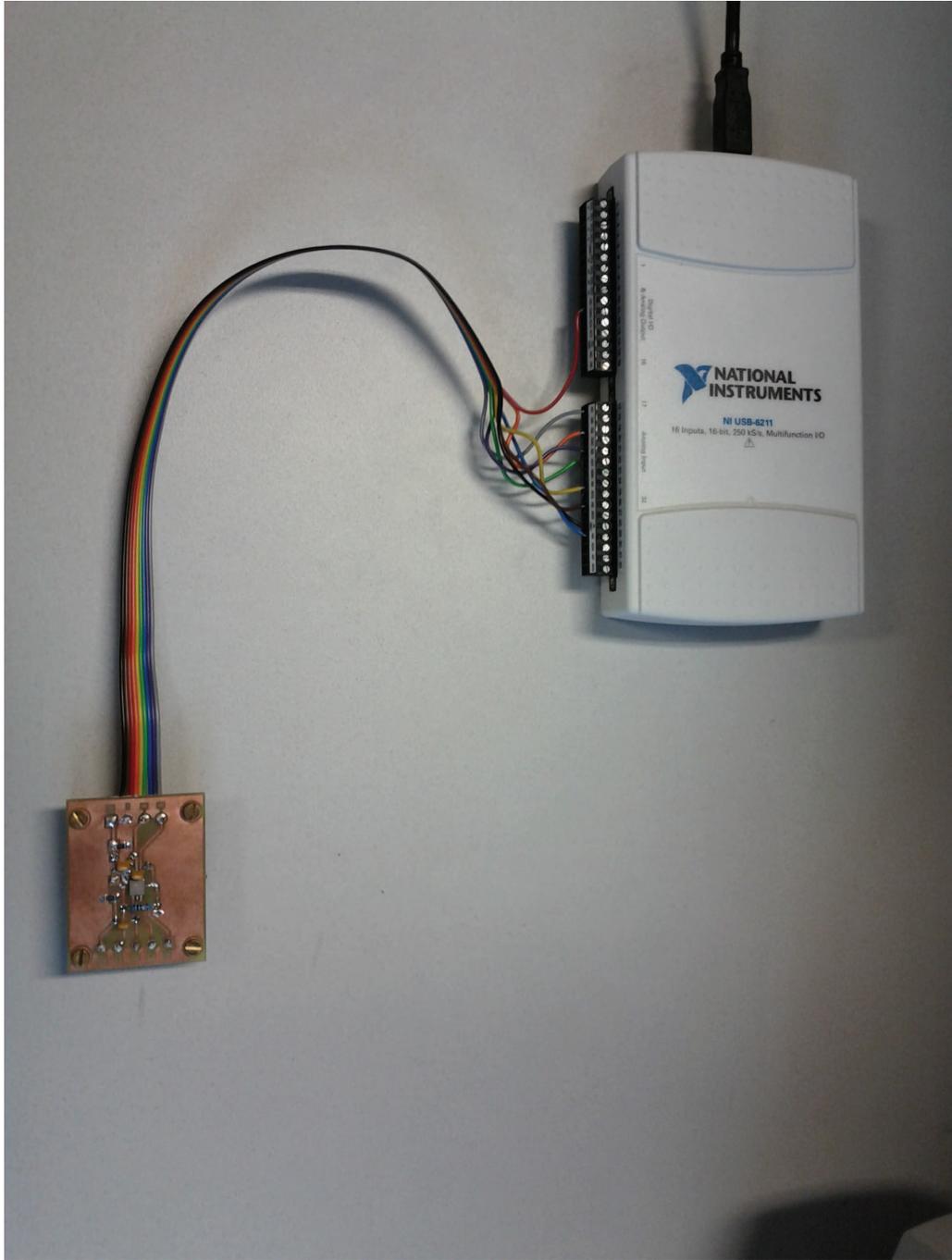


Figura 6.6: Sistema di misura usato in laboratorio



# Elenco delle figure

1.1	Scheda NI-USB-6211 . . . . .	6
1.2	MXA2500ML . . . . .	7
1.3	Mappatura pin . . . . .	7
1.4	Funzionamento MEMS . . . . .	8
1.5	Profili di temperatura . . . . .	8
2.1	Diagramma a blocchi . . . . .	10
2.2	Agilent 54654 . . . . .	11
2.3	Acquisizione in LabVIEW . . . . .	12
2.4	Acquisizione con oscilloscopio . . . . .	12
3.1	Circuito riduzione rumore . . . . .	13
3.2	Circuito realizzato con Capture CIS . . . . .	14
3.3	Layout senza collegamenti . . . . .	15
3.4	Layout con collegamenti . . . . .	16
3.5	Layout con copper pour . . . . .	17
3.6	ProtoMat S62 . . . . .	17
3.7	Struttura del foglio di rame . . . . .	18
3.8	Top . . . . .	19
3.9	Bottom . . . . .	19
4.1	Schema di principio . . . . .	21
4.2	Blocchi di settaggio parametri . . . . .	22
4.3	Front panel calibrazione . . . . .	23
4.4	Blocchi di calibrazione . . . . .	23
4.5	Front panel misura . . . . .	24
4.6	Blocchi di misura . . . . .	25
4.7	Valori del campo False . . . . .	26
4.8	Front panel 0 gradi . . . . .	27
4.9	Front panel inclinazione negativa . . . . .	27
4.10	Front panel inclinazione positiva . . . . .	28
6.1	Datasheet MXA2500ML . . . . .	32
6.2	Diagramma a blocchi prima acquisizione . . . . .	33

*ELENCO DELLE FIGURE*

---

6.3	Diagramma a blocchi misura statica di angoli . . . . .	34
6.4	Diagramma a blocchi test scheda usata in laboratorio . . . .	35
6.5	Scheda usata in laboratorio . . . . .	36
6.6	Sistema di misura usato in laboratorio . . . . .	37

# Elenco delle tabelle

2.1	Tabella valori impostati . . . . .	11
3.1	Tabella valori di test . . . . .	20
4.1	Parametri di acquisizione . . . . .	22

*ELENCO DELLE TABELLE*

---

## Capitolo 7

# Bibliografia

- National Instruments, *NI USB-6211 Manual* ,  
URL (Dicembre 2011): <http://www.ni.com/pdf/manuals/371931f.pdf>
- National Instruments, *NI USB-6211 Datasheet* ,  
URL (Dicembre 2011): <http://www.ni.com/pdf/manuals/371932f.pdf>
- Wikipedia Foundation, Wikipedia: l'enciclopedia libera, *Accelerometro*,  
URL (Dicembre 2011): <http://it.wikipedia.org/wiki/Accelerometro>
- Wikipedia Foundation, Wikipedia: l'enciclopedia libera, *MEMS*,  
URL (Dicembre 2011): <http://it.wikipedia.org/wiki/MEMS>
- Texax Instruments, *Accelerometers and how they work*,  
URL (Dicembre 2011) :<http://www2.usfirst.org/2005comp/Manuals/Acceler1.pdf>
- Dimension Engineering, *A beginner's guide to accelerometers*,  
URL (Dicembre 2011): <http://www.dimensionengineering.com/accelerometers.htm>
- Sensors Article Archives, *A Micromachined Thermal Accelerometer*,  
URL (Dicembre 2011): <http://archives.sensormag.com/articles/0601/98/index.htm>
- MEMSIC, *Thermal Accelerometer*,  
URL (Dicembre 2011): <http://www.memsic.com/technology/sensor-components.html>
- National Test Equipment, *Agilent 54654 Training guide*,  
URL (Dicembre 2011): <http://www.nationaltestequipment.com/docs>
- National Instruments, *DAQmx library headlines* ,  
URL (Dicembre 2011): <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/2835>