

INTERNAL REPORT

Progettazione e realizzazione del Position Sensing Device

Pierluigi Ortu, Mauro Pili, Andrea Saba, Enrico Urru, Tonino Pisanu

Report N. 53,
released: 12 01 2016

Revisore: Giuseppe Valente



Osservatorio
Astronomico
di Cagliari

Sommario

1. Introduzione	3
2. Introduzione al PSD	4
3. La caratterizzazione del sensore PSD	5
4. Front-end	7
4.1 Convertitore corrente-tensione	9
4.2 Il sottrattore	10
4.3 Il sommatore	11
4.4 AD534 utilizzato come divisore	12
5. Realizzazione dello schematico e sbroglio del circuito.....	14
6. Adattatore di livelli	17
7. Il convertitore analogico-digitale.....	20
7.1 Diodi di protezione	20
8. Realizzazione della parte meccanica	23
9. Cablaggio della parte analogica e risultato finale 1.0.....	26
9.1 Cablaggio parte digitale.....	29
10. Progettazione e sviluppo del firmware per Arduino	30
10.1 Codice del Firmware.....	30
10.2 Gestione ed elaborazione dei dati in ingresso	30
10.3 PSD Reader	34
11. Misure effettuate	36
12. Conclusioni e sviluppi futuri	41
13. Bibliografia.....	42
14. Tavole	42
15. Ringraziamenti.....	42

1. Introduzione

Il team Metrologico del Sardinia Radio Telescope sta installando diversi dispositivi nel telescopio da 64 metri. Questi dispositivi hanno lo scopo di permettere la realizzazione di un sistema di controllo delle deformazioni dell'antenna causate dalla deformazione termica e dalla gravità che causano appunto il tilt e lo shift rispetto all'allineamento ideale dell'ottica. Uno di questi dispositivi è un Position Sensing Device (PSD) capace di monitorare la posizione e l'inclinazione dello specchio secondario (M2) [1].

Il PSD, finanziato da **Sardegna Ricerche** tramite il progetto cluster **Sardasensors**, è basato sulla misura della posizione del punto in cui un beam laser colpisce la sua superficie. La precisione della misura è legata alla larghezza del *beam*, alla sua concentrazione e al suo angolo di incidenza rispetto alla superficie. In questo progetto, che prevede la realizzazione di un prototipo per valutare l'accuratezza del sensore commerciale **DL-20C** della **Osi Optoelectronics** [2], è stato necessario predisporre tutta l'elettronica necessaria al suo funzionamento, la logica di controllo hardware e software e l'alloggiamento fisico di tutto il dispositivo.

Di seguito verranno illustrate le varie fasi della progettazione e dello sviluppo del PSD. Nella prima parte verrà illustrata la progettazione e la realizzazione della componente elettronica, nella seconda parte la realizzazione delle box per contenerla, nella terza parte la programmazione del firmware di controllo e del software per il monitoraggio, e nell'ultima parte i risultati ottenuti.

2. Introduzione al PSD

Per PSD (**Position Sensing Device**) si intende un dispositivo in grado di misurare la posizione, in una o due dimensioni del punto luminoso che colpisce la superficie del sensore.

Un PSD è fondamentalmente un **sensore** costituito da uno strato resistivo uniforme su una o entrambe le superfici, da un substrato a semiconduttore ad alta resistività e da una coppia di elettrodi formati su entrambe le estremità dello strato resistivo per estrarre segnali di posizione. L'area attiva, che è uno strato resistivo, ha una giunzione p-n¹ che genera fotocorrente² mediante effetto fotovoltaico.

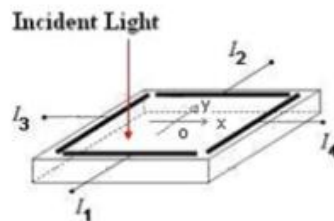


Figura 1: Schematico sensore PSD 2D

I PSD possono essere di tipo monodimensionale o bidimensionale.

Quelli monodimensionali permettono la misura della posizione del *beam* solo lungo una direzione mentre quelli bidimensionali sono raggruppati per struttura in tipi duo-laterali e tetra-laterali per poter effettuare misure su due dimensioni. Le formule per il calcolo della posizione differiscono leggermente a seconda della struttura del PSD. I PSD bidimensionali hanno due coppie di elettrodi di emissione, x_1 , x_2 e y_1 , y_2 , corrispondenti nella Figura 1 alle quattro foto-correnti I_4 , I_3 , I_2 , I_1 .

¹ Con il termine **giunzione p-n** si indica l'interfaccia che separa le parti di un semiconduttore sottoposte a drogaggio di tipo differente.[3]

² La corrente che scorre in una cellula fotoelettrica illuminata. [4]

3. La caratterizzazione del sensore PSD

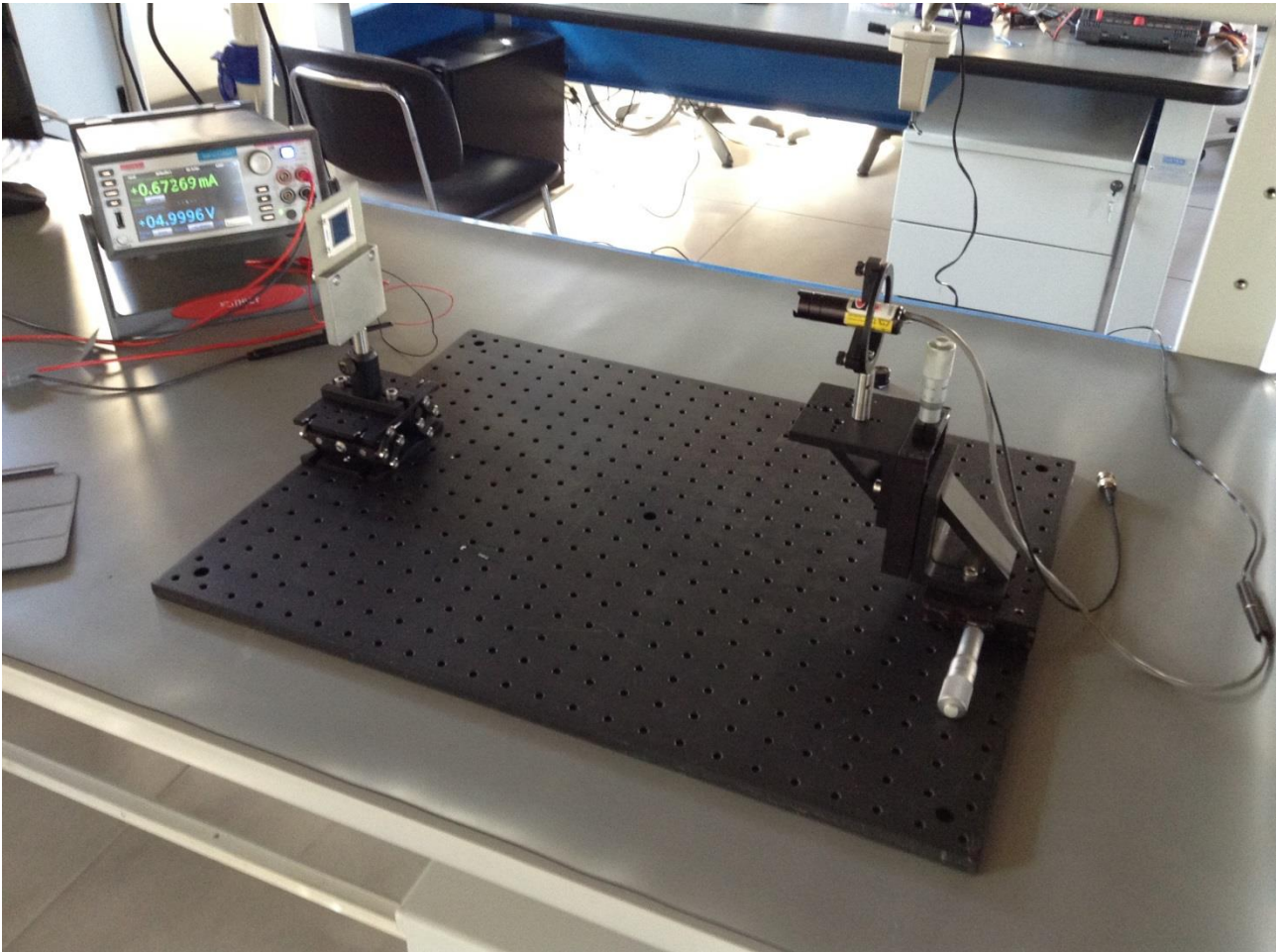


Figura 2: Caratterizzazione delle correnti in gioco del PSD

Prima di procedere alla realizzazione della componente elettronica è stato necessario effettuare le misure di caratterizzazione del PSD e delle correnti in gioco. Questo ha permesso di dimensionare e sviluppare tutta l'elettronica di front-end in maniera adeguata.

La misura è stata effettuata mediante Source Measurement Unit (**SMU**) **Keithley 2450** [5] utilizzato per alimentare il sensore PSD seguendo le indicazioni presenti nel datasheet con una tensione pari a 5V. Con uno spot laser di lunghezza d'onda compresa tra 400 e 710 nm sono stati puntati i vari quadranti del sensore per leggere le correnti corrispondenti. Essendo il PSD una giunzione p-n questa deve essere polarizzata in inversa. Attraverso la giunzione scorre una corrente proporzionale all'intensità e alla posizione del segnale luminoso a cui è sottoposto.

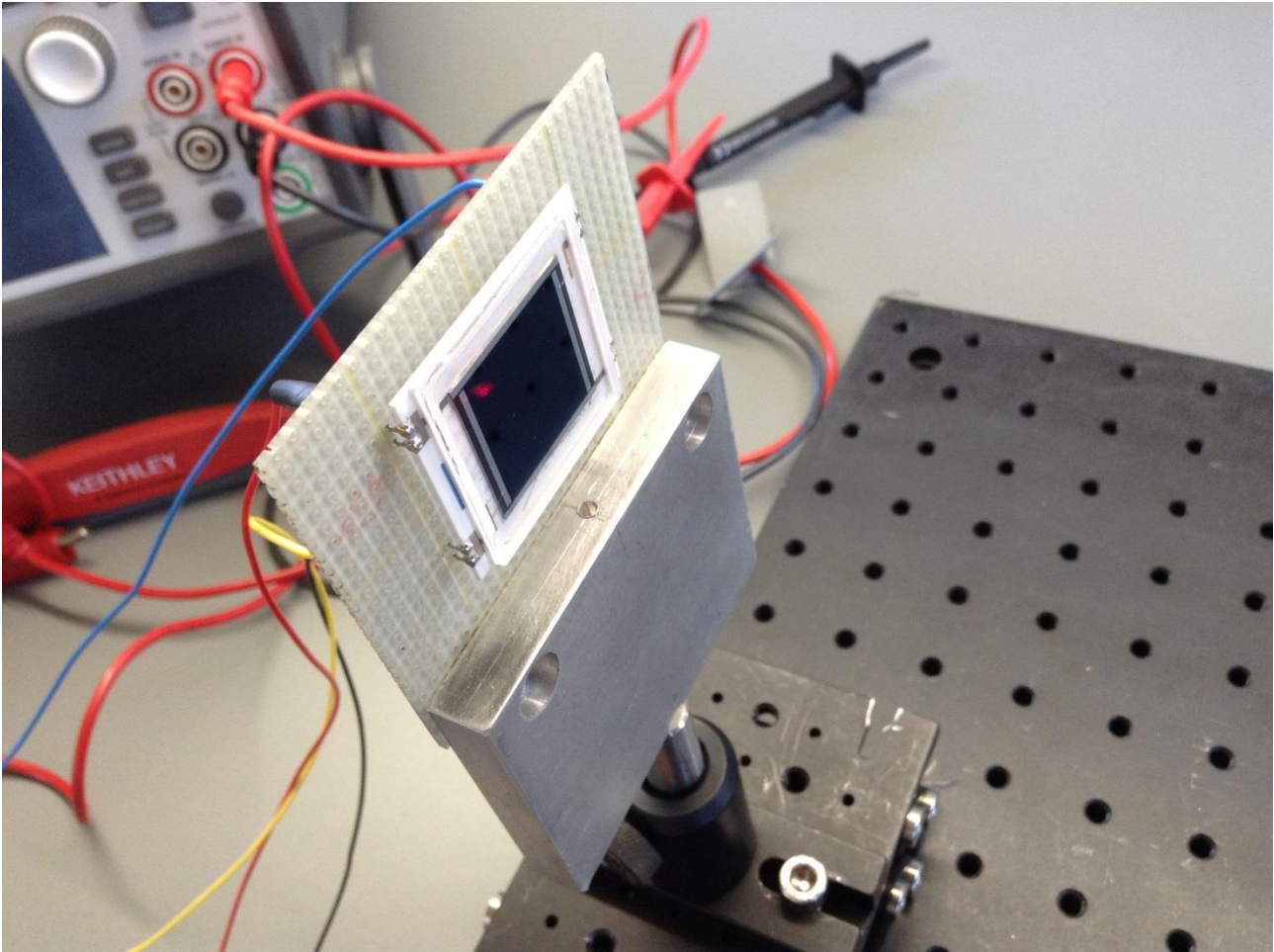


Figura 3: Spot laser sul PSD

La misura del range delle correnti è fondamentale per la corretta progettazione dell'elettronica di contorno che andrà a costituire il front-end dell'intero dispositivo di acquisizione, permettendo la corretta polarizzazione del PSD e la calibrazione dell'elettronica analogica in modo da ottenere un risultato compatibile con la parte digitale. Non è stato possibile utilizzare direttamente i dati forniti dal datasheet del sensore perché questo è stato tarato per un laser con lunghezza d'onda pari a 670nm mentre il laser utilizzato presente nei nostri laboratori ha una lunghezza d'onda di emissione tra 400 e 710nm.

Le misure effettuate hanno restituito per l'asse X un valore massimo di corrente pari a **0.135mA**, e a **0.127mA** per l'asse Y.

Per ottenere dal PSD un segnale digitale è necessario dotarlo di tutti quei componenti elettronici che convertiranno il segnale analogico in digitale.

Per fare ciò è stata scelta la seguente architettura:



Figura 4: Schema dell'architettura del sistema

4. Front-end

La prima parte del lavoro si è concentrata sulla progettazione e realizzazione di un front-end, Figura 4 , che permettesse di interfacciare il sensore PSD al meglio con un convertitore analogico-digitale (ADC Analog Digital Converter) e con un microcontrollore in grado di elaborare e trasmettere i dati ricevuti nel formato richiesto dall'operatore.

Per convertire il segnale elettrico proveniente dal sensore PSD è necessario applicare le equazioni indicate dal produttore e tipiche per questo genere di applicazioni. [6]

Le equazioni sono:

$$X = \frac{A - B}{A + B}$$

$$Y = \frac{C - D}{C + D}$$

dove, A, B, C, D sono i dati uscenti dai 4 Pin del PSD e che nel nostro caso saranno delle correnti di piccola intensità e X e Y rappresentano i segnali che possono essere associati alla posizione X e Y del *beam* luminoso sulla superficie del sensore.

Queste equazioni possono essere applicate direttamente dal microcontrollore incaricato. Tuttavia, poiché queste operazioni richiederebbero un gran numero di cicli macchina, è più efficiente effettuarle in analogico, ottenendo una risposta complessiva del circuito più rapida.

Il front-end che è stato realizzato è visualizzabile nello schematico in Figura 5 e i blocchi evidenziati che lo compongono verranno illustrati di seguito.

Relazione di progettazione e realizzazione Position Sensing Device

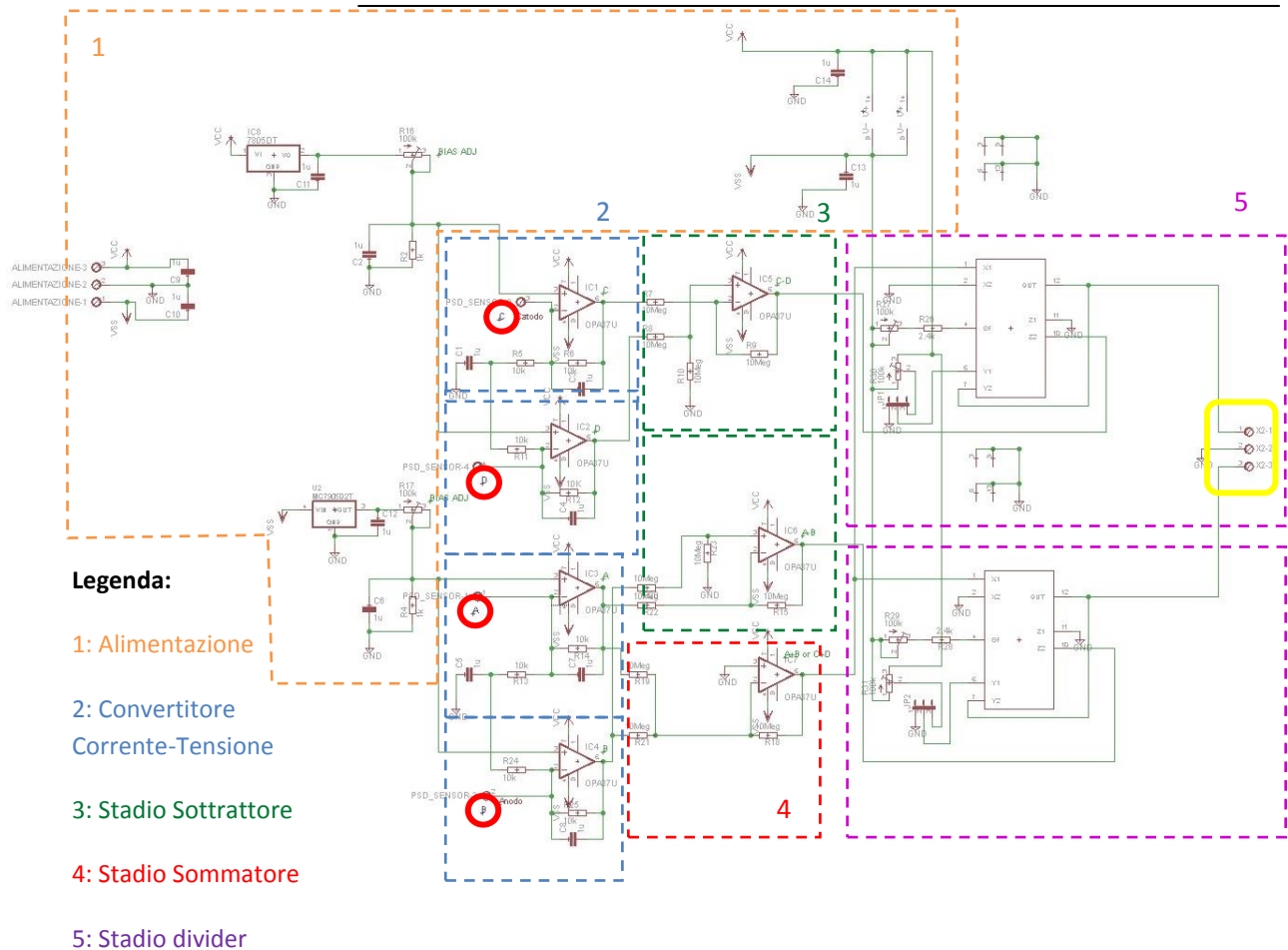


Figura 5: Schematico PSD PRT Ver 1.0

I segnali provenienti dal sensore PSD evidenziati in rosso in Figura 5, sono composti da correnti nell'ordine di frazioni di milliampere, verranno convertiti in un valore di tensione da operazionali (OPA37) posti in ingresso e scelti per essere degli operazionali dalle elevate prestazioni in termini di rumore. [7]

Successivamente, il dato amplificato verrà processato da altri stadi analogici formati da due sottrattori e un sommatore sempre ottenuti tramite gli stessi operazionali. L'uscita di questi andrà direttamente al divider ottenuto con AD534 [8]. In questo modo otterremo direttamente in uscita un valore proporzionale allo spostamento dello spot luminoso sul PSD. Come si vedrà nel corso del documento, è stato scelto di eseguire le operazioni principali direttamente in analogico, in questo modo sarà possibile ottenere un risultato più rapidamente e con una maggiore accuratezza di quelle che permetterebbe il microcontrollore.

4.1 Convertitore corrente-tensione

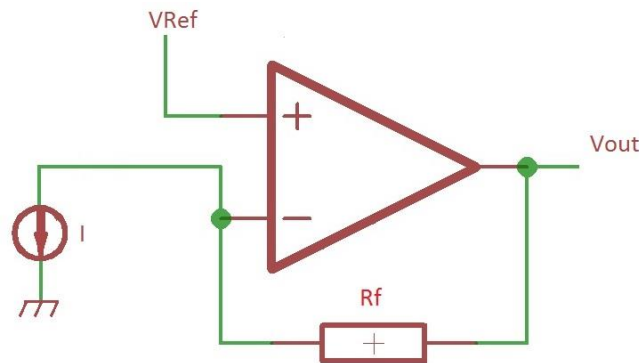


Figura 6: Convertitore corrente-tensione

Il convertitore corrente-tensione può essere schematizzato come in *Figura 6* dove V_{ref} è la tensione di riferimento con cui verranno polarizzati i catodi del PSD. In fase di progettazione il suo valore è stato posto a 2.5 V, per poi essere modificato in fase di realizzazione tramite degli appositi trimmer in modo da ottenere la massima dinamica dell'intensità elettrica. La corrente I , schematizzata con un generatore, è quella che il PSD fa scorrere in base alla zona in cui verrà colpito dallo spot luminoso, pertanto risulterà proporzionale allo spostamento e sarà entrante o uscente in base allo stadio corrente-tensione esaminato.

La tensione di uscita V_{out} risultante sarà quindi:

$$V_{out_1} = V_{ref} - R_f \cdot I_f \quad \text{nel caso di corrente entrante;}$$

$$V_{out_2} = V_{ref} + R_f \cdot I_f \quad \text{nel caso di corrente uscente.}$$

Dalle misure effettuate con la caratterizzazione mediante SMU è risultato che la corrente massima ottenibile dal PSD è pari a circa **0.135 mA**, pertanto sostituendo i valori nelle equazioni precedenti si ottiene:

$$V_{out_1} = 2.5 - 10 \cdot 10^3 \cdot 0.135 \cdot 10^{-3} = 1.15 \text{ V}$$

$$V_{out_2} = 2.5 + 10 \cdot 10^3 \cdot 0.135 \cdot 10^{-3} = 3.85 \text{ V}$$

Le due uscite dei due convertitori corrente-tensione andranno quindi al sottrattore che ne farà la differenza.

Il caso è duale (V_{ref} negativa) se prendiamo in considerazione i convertitori corrente-tensione e il sottrattore posti nel canale, e che eseguono, i calcoli per l'asse Y.

4.2 Il sottrattore

Configurando gli operazionali in modalità sottrattore, è possibile effettuare le differenze necessarie. Le sottrazioni daranno un risultato positivo o negativo in base alla polarità con cui verrà collegato il PSD. In questo modo avremo un totale controllo sul segno semplicemente decidendo in fase di cablaggio come collegare il PSD. Questo ci svincola, quindi, dalla configurazione in uscita del AD534 che vedremo in seguito.

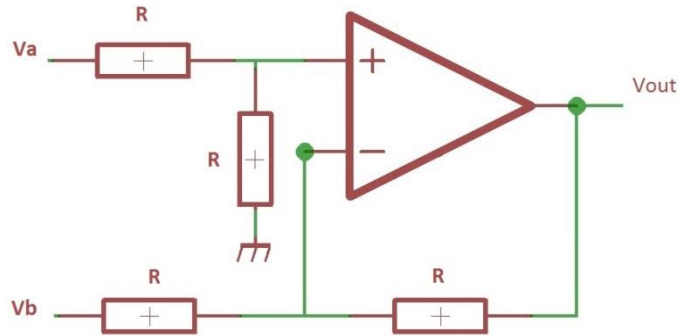


Figura 7: Il sottrattore

$$V_{out} = V_a - V_b$$

Nel nostro caso, avremo quindi:

$$V_{out_1} - V_{out_2} = -2.7 V$$

Oppure

$$V_{out_2} - V_{out_1} = 2.7 V$$

Come si può notare il modulo del risultato è lo stesso, cambia il segno in base al collegamento tra PSD e scheda front-end.

Per quanto riguarda l'asse Y, i risultati sono analoghi e dualmente ottenibili, infatti per una corrente misurata di **0.127 mA** si ottiene:

$$V_{out_1} = -V_{ref} - R_f \cdot I_f = -2.5 - 1.27 = -3.77 V$$

$$V_{out_2} = -V_{ref} + R_f \cdot I_f = -2.5 + 1.27 = -1.23 V$$

$$V_{out_1} - V_{out_2} = -2.54 V$$

$$V_{out_2} - V_{out_1} = 2.54 V$$

4.3 Il sommatore

La configurazione a sommatore è un altro blocco fondamentale che è stato implementato nella realizzazione del front-end del PSD.

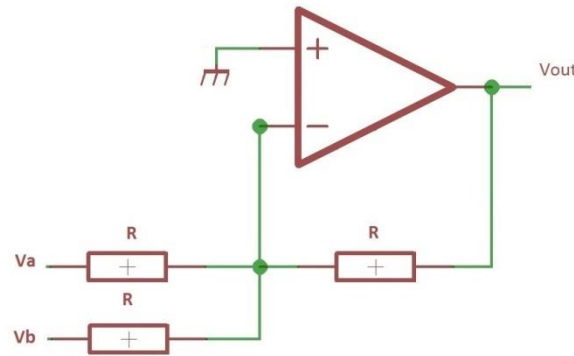


Figura 8: Il sommatore

Poiché anche questa è una configurazione a retroazione negativa e poiché risulta composto solo da componenti lineari, si può applicare il principio di sovrapposizione degli effetti e il metodo del corto circuito virtuale ottenendo:

$$V_{out_1} = V_b \cdot \left(-\frac{R}{R}\right) = -V_b$$

$$V_{out_2} = V_a \cdot \left(-\frac{R}{R}\right) = -V_a$$

$$V_{out_{TOT}} = -V_a - V_b = -(V_a + V_b)$$

In questo modo la somma algebrica dei due segnali in ingresso è cambiata di segno (sommatore invertente).

Poiché il sommatore invertente è posto sul canale Y del PSD, e risultando questo polarizzato con una $V_{ref} < 0$, i valori di V_a e V_b risulteranno essere sempre negativi quindi applicando $-V_a$ e $-V_b$ al nostro sommatore, otterremo in uscita un valore sempre positivo. Questo risultato evita la necessità di configurare l'AD534 per la gestione del segno, infatti:

$$-(V_a + V_b) = -(-3.77 + (-1.23)) = 5$$

4.4 AD534 utilizzato come divisore



Figura 9: Misure su AD534

Nell'architettura del front-end è stato scelto un circuito integrato denominato AD534. La sua versatilità gli consente di poter effettuare in analogico un gran numero di operazioni in base alla configurazione circuitale che lo circonda. Nel nostro caso è stato configurato come divisore seguendo in questo modo le specifiche progettuali dettate dalla casa produttrice del sensore PSD.

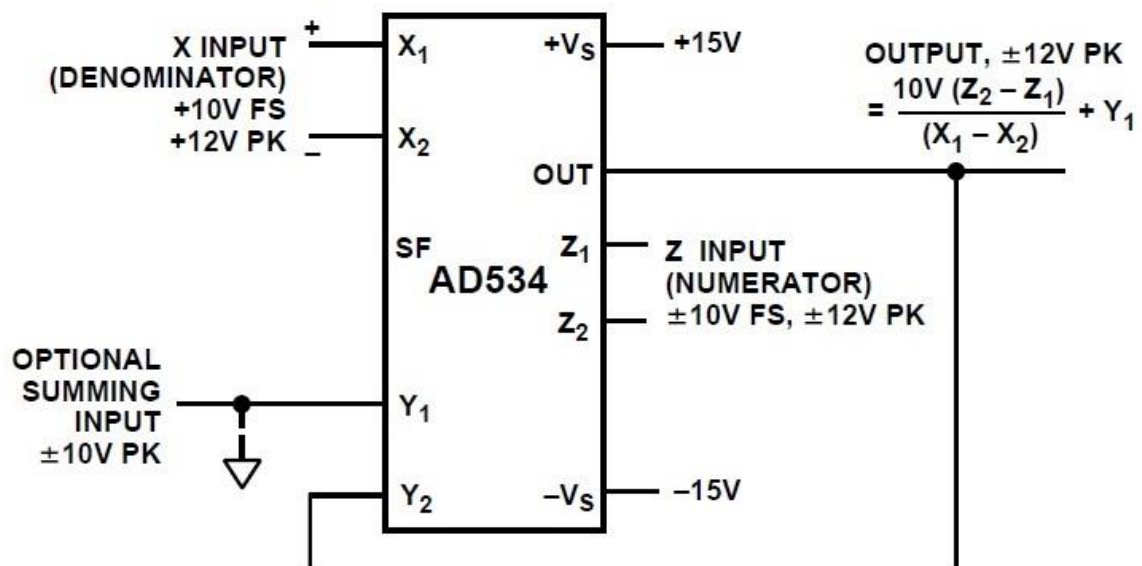


Figura 10: AD534 configurato come divisore

Come si può notare il valore in uscita risulta essere la divisione tra il numeratore e il denominatore forniti in ingresso. Questo valore viene moltiplicato per una costante di 10 V e infine sommato con una costante pari a Y_1 .

La costante 10 V è modificabile tramite il pin **scale factor** (SF) e la scelta di questo valore rivestirà una grande importanza perché dovrà essere decrementato in modo da avere un uscita inferiore ai 5 V . Infatti i principali ADC in commercio non possono lavorare con tensioni superiori ai 5 V .

Per quanto riguarda Y_1 , invece, questa è una costante che ci permetterà di tarare al meglio il nostro divisore consentendoci di eliminare eventuali offset intrinseci al chip.

Prima di realizzare fisicamente la PCB finale gli AD534, sono stati testati su breadboard in modo da verificarne le caratteristiche e i range di funzionamento.

Senza modificare il fattore di scala originario sono stati dati due ingressi, rispettivamente numeratore e denominatore, di vari valori. Dati i valori di tensione di numeratore e denominatore pari a 2 V e 6 V è stato ottenuto il risultato pari a 3.326 V , in linea con il valore atteso di 3.3 V . Infatti

$$\frac{2V}{6V} \cdot 10 + 0 = 3.3V$$

Per questa misura il divider è stato alimentato con una tensione duale $\pm 8\text{ V}$, ma per aumentarne la dinamica d'uscita, nella sua realizzazione finale, si è scelto di alimentare il divider con una tensione duale di $\pm 15\text{ V}$.

5. Realizzazione dello schematico e sbroglio del circuito

La realizzazione dello schematico e il successivo sbroglio del circuito sono stati fatti tramite il software di progettazione elettronica **Eagle** [9], che consente un approccio veloce ed intuitivo alla realizzazione di PCB personalizzate. Nella Figura 11 è possibile vedere lo schematico del circuito. Questo è caratterizzato da un input-stage (composto da amplificatori operazionali OPA37 della Texas Instruments) che garantisce la conversione corrente-tensione consentendo di trasformare il valore di corrente proveniente dal PSD in valori di tensione di più facile utilizzo. Il secondo stadio è composto da due sottrattori e un sommatore sempre realizzati con OPA37. E infine abbiamo i 2 divider realizzati con AD534. Sono inoltre stati aggiunti gli stabilizzatori di tensione, necessari alla corretta polarizzazione del PSD e per ottenere la stabilità in tensione necessaria ai divider.

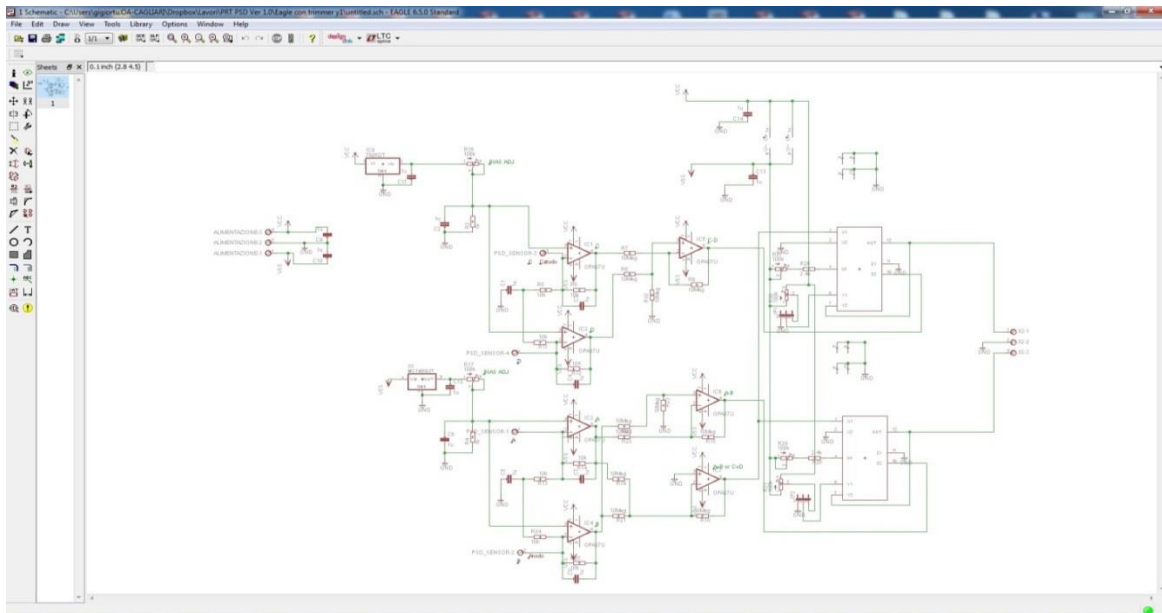


Figura 11: Realizzazione dello schematico con Eagle

Relazione di progettazione e realizzazione Position Sensing Device

In Figura 12 si possono notare le piste nel Top e Bottom successive allo sbroglio, rispettivamente in rosso e in blu, dove è stata scelta componentistica **Surface Mounting Device (SMD)** in modo da diminuire gli spazi ed ottenere così una PCB il più possibile compatta.

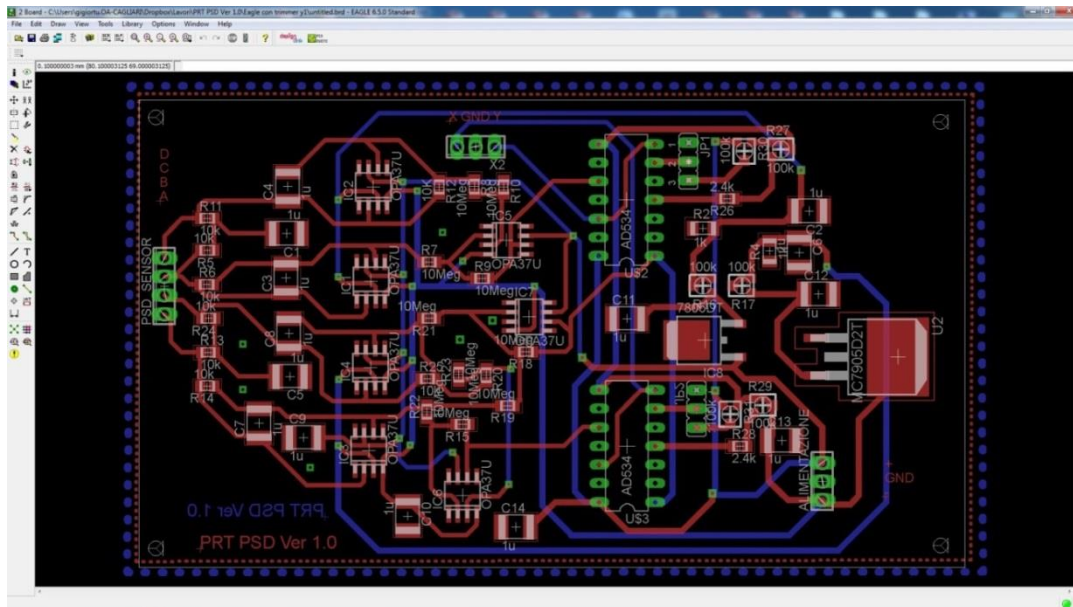


Figura 12: PCB del Front-end

Tramite il software **Google Sketchup** [10] è stato possibile, inoltre, realizzare un rendering 3D della scheda, nel quale è possibile notare l'aggiunta dei piani di massa utilizzati per limitare possibili disturbi. Questi infatti ci consentiranno di avere una maggiore robustezza al rumore mantenendo una robustezza maggiore dal punto di vista meccanico.

Tramite il modello è stato possibile inoltre ottimizzare gli ingombri per una corretta installazione e una semplice connessione col mondo esterno.

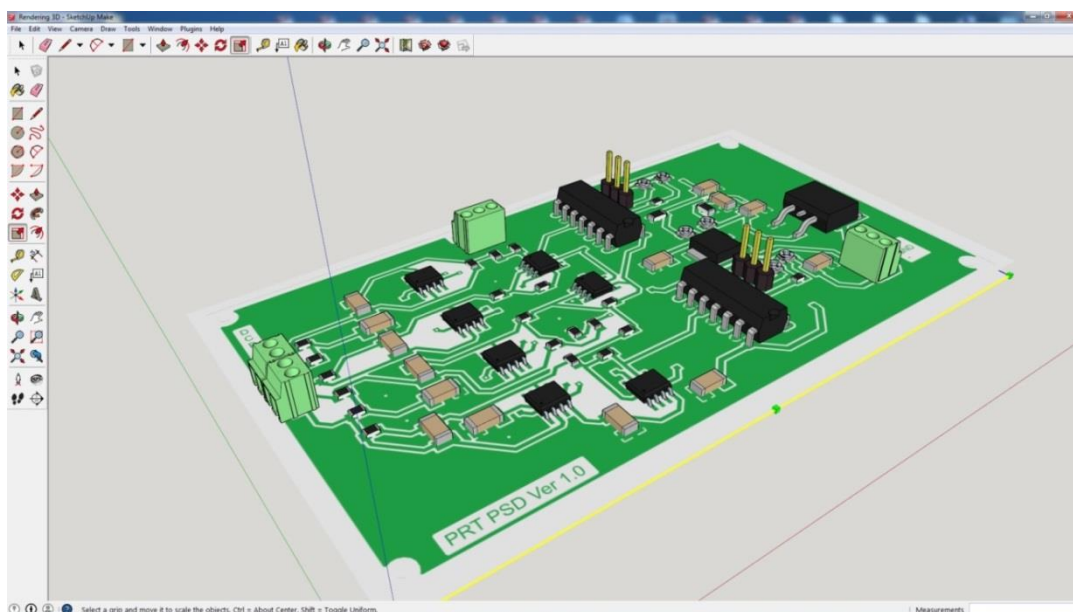


Figura 13: Rendering 3D

Relazione di progettazione e realizzazione Position Sensing Device

Il prototipo è stato realizzato nei nostri laboratorio tramite fresatrice LPKF, questa ci consente la realizzazione di prototipi di tipo elettronico. La scheda è stata inoltre saldata sempre nei nostri laboratori a mano. I primi test danno da subito esito positivo e la scheda ci fornisce in uscita una tensione compresa tra -4 e +4 V direttamente proporzionale allo spot luminoso che viene fatto incidere direttamente sul sensore posto in ingresso alla scheda. Ci si rende conto da subito che questi valori non potranno essere utilizzati con semplicità sui principali convertitori analogico-digitali presenti in commercio che posseggono un valore di ingresso limitato al range 0-5V. Pertanto si rende necessaria l'aggiunta di un ulteriore blocco al nostro schema denominato **adattatore di livelli** ottenendo:



Figura 14: Schema a blocchi con adattatore di livelli

6. Adattatore di livelli

Poiché in uscita al circuito analogico, evidenziata in giallo in Figura 5, è presente una tensione con range di $\pm 4\text{ V}$, e potendo l'ADC campionare solamente valori compresi nel range $0 - 5\text{ V}$ si è reso necessario il corretto condizionamento del segnale.

A tal fine si è scelto di simulare tramite NI Multisim [11] il seguente circuito:

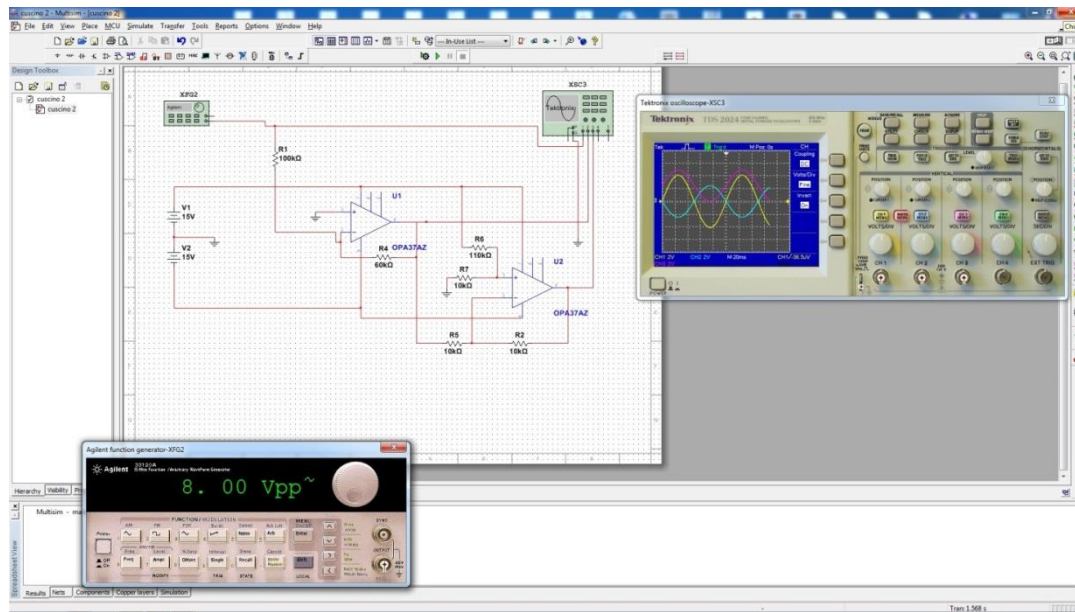


Figura 15: Simulazione del circuito adattatore di livelli

Il circuito è stato dimensionato in modo da limitare l'ampiezza del segnale e renderlo quindi compatibile con i valori di ingresso specifici dell'ADC mantenendo intatta la dinamica.

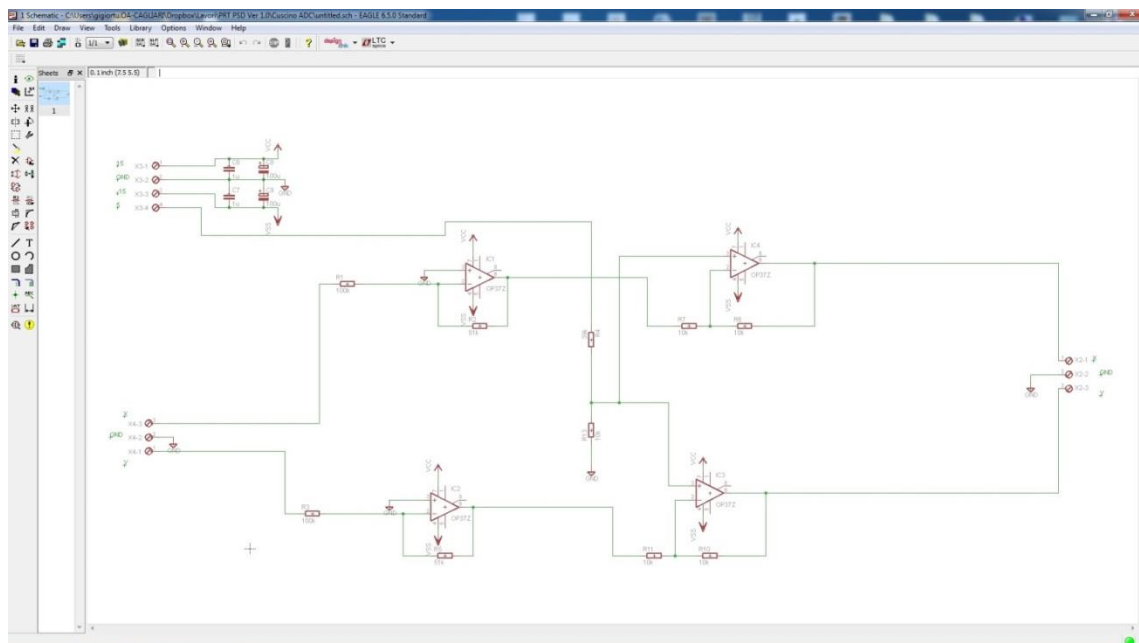


Figura 16: Schematico del circuito su Eagle

Relazione di progettazione e realizzazione Position Sensing Device

Come per la scheda di front-end, anche questa scheda è stata disegnata e progettata tramite Eagle. Viene eseguito lo sbroglio. In Figura 17 le piste rosse indicano il lato TOP mentre le blu indicano il lato BOTTOM.

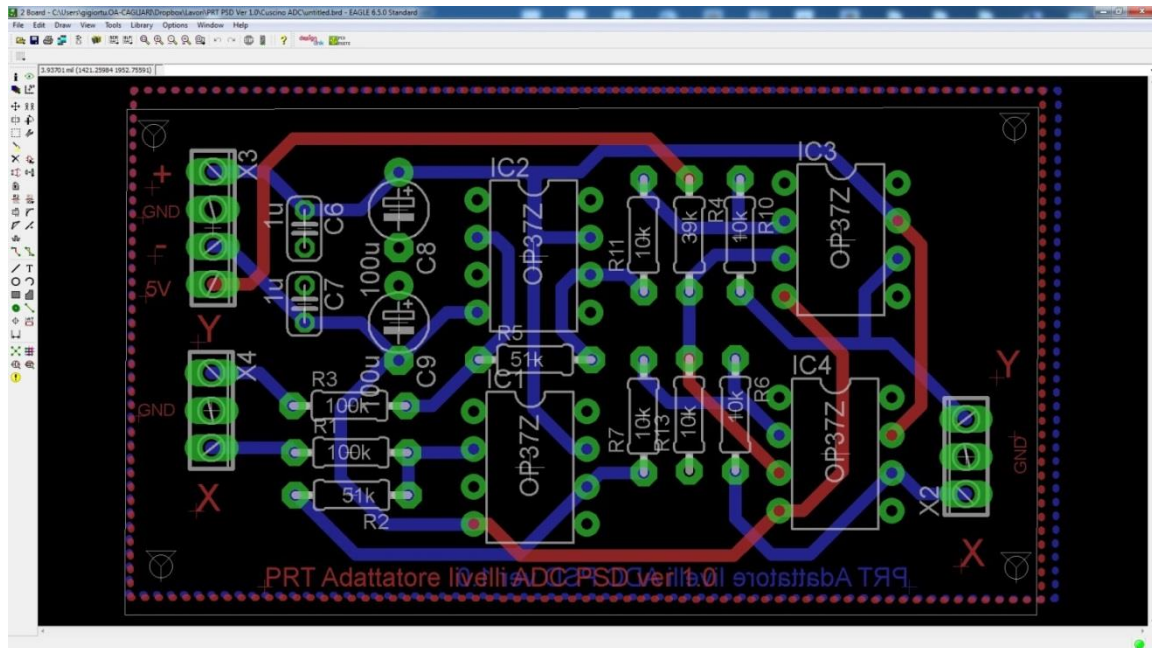


Figura 17. Board del circuito su Eagle

Anche in questo caso, gli ingombri e la posizione dei componenti sono stati da prima verificati tramite la simulazione 3D del modello finale della scheda.

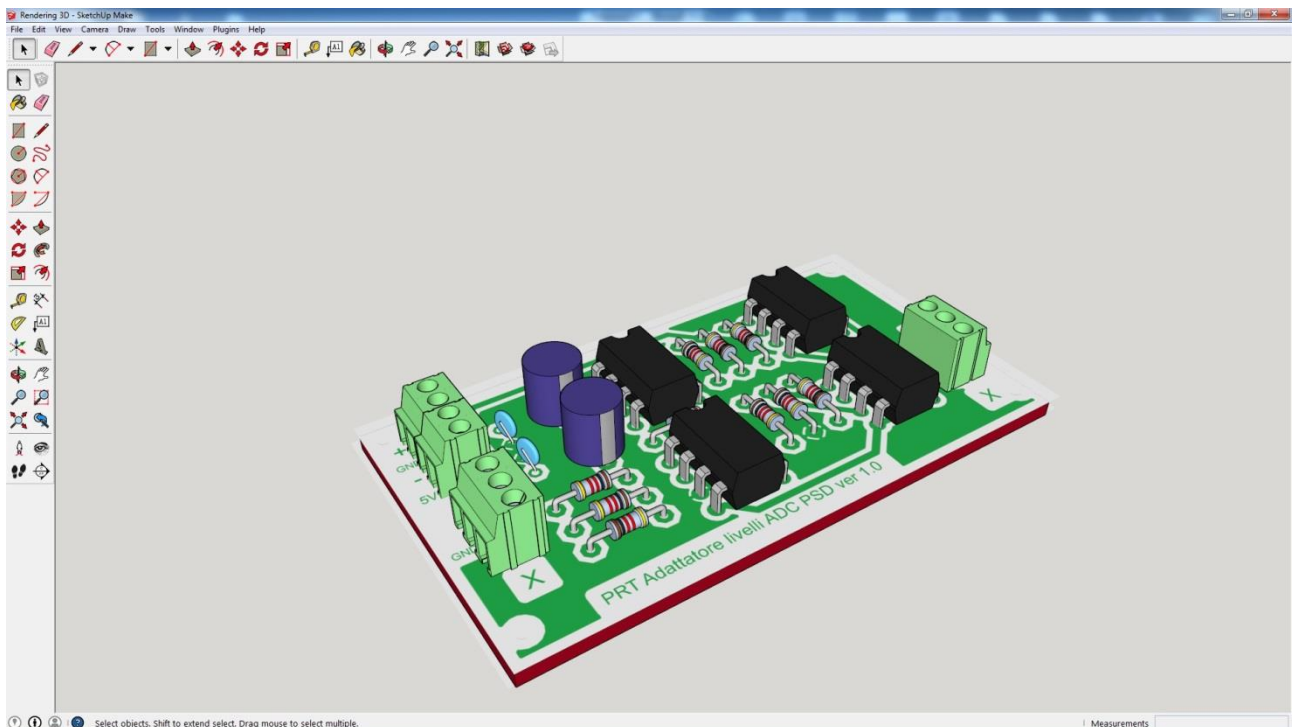


Figura 18: Rendering 3D

Relazione di progettazione e realizzazione Position Sensing Device

A questo punto le due schede, Front-end e adattatore di livelli, sono state collegate insieme per essere testate.

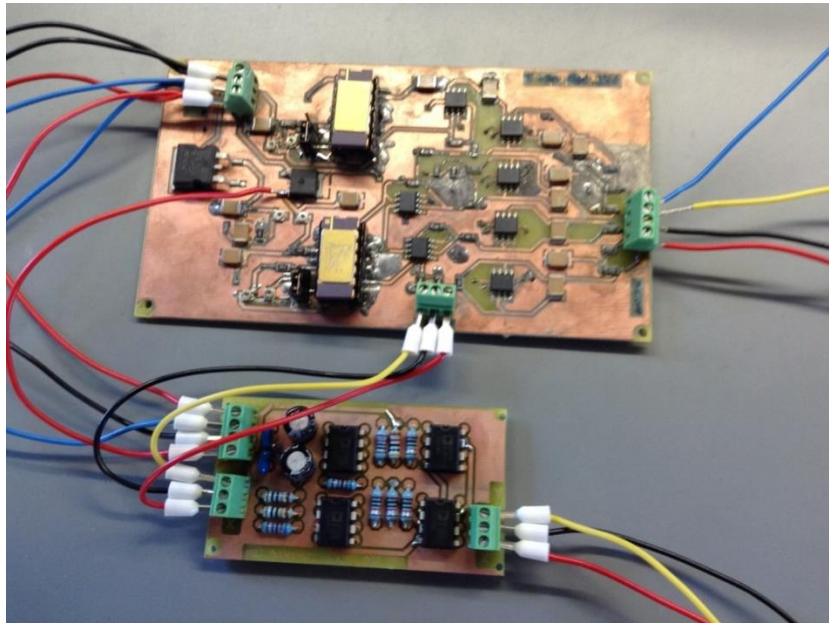


Figura 19: Collegamento tra stadio analogico e adattatore di livelli

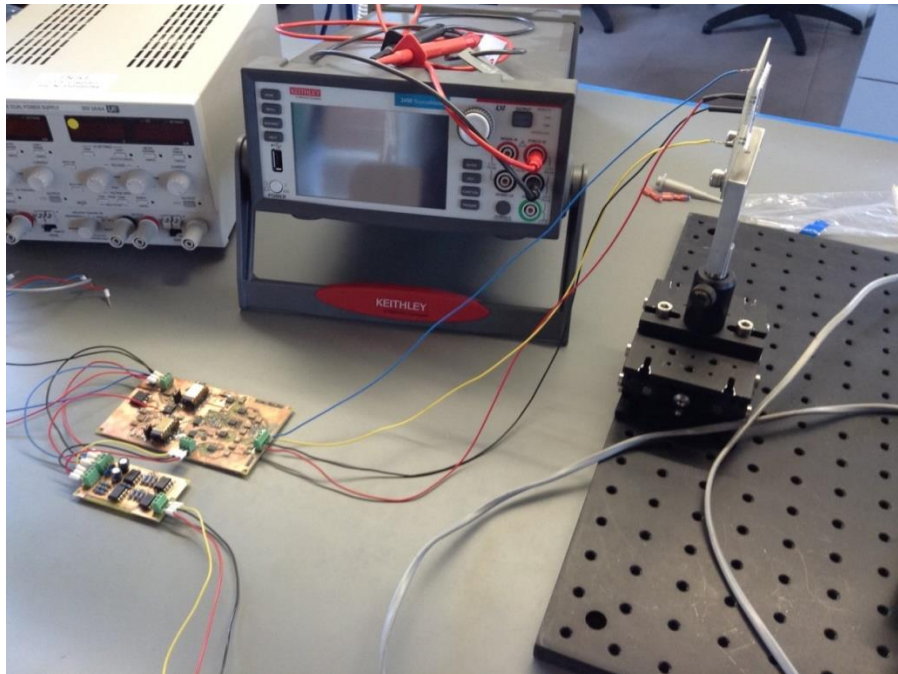


Figura 20: Test dei valori in uscita

Sono state effettuate delle misure col il sensore collegato e ci siamo spostati lungo i bordi degli assi x e y per poi leggere le tensioni di uscita e verificare che queste si mantenessero solo ed esclusivamente al di sotto dei 5V previsti. Al circuito sono stati inoltre aggiunti dei sistemi di protezione che verranno illustrati nella sezione successiva.

7. Il convertitore analogico-digitale

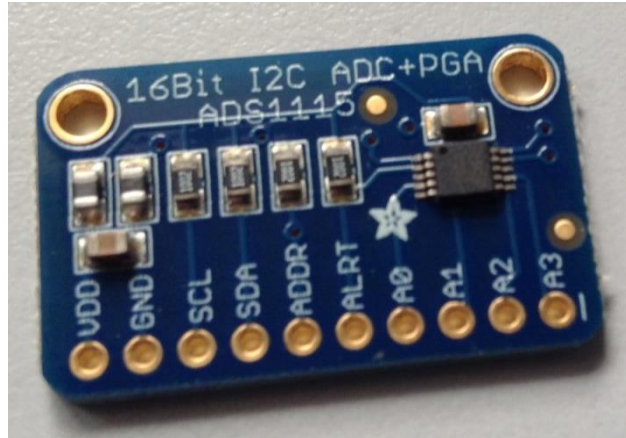


Figura 21: ADS1115

Come convertitore ADC si è scelto di utilizzare il modulo Adafruit a 16 bit con chip ADS1115 della Texas Instruments. Questo modulo campiona il segnale con risoluzione di 16 bit. Il segnale analogico potrà essere campionato in modo differenziale o *single mode* mentre l'uscita verrà fornita direttamente in I²C.

Questo convertitore offre il vantaggio di poter essere completamente configurato con Arduino [12]

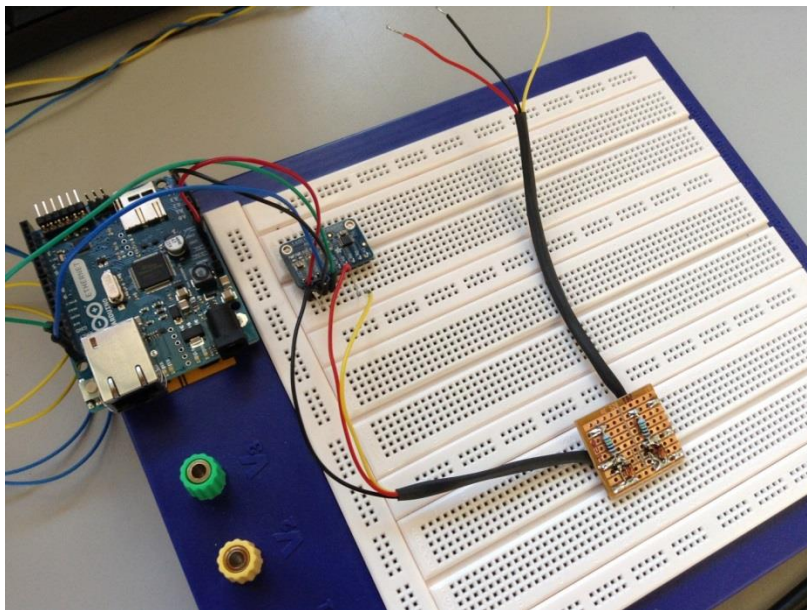


Figura 22: Test dispositivi

7.1 Diodi di protezione

In ingresso alla sezione digitale del prototipo sono stati posti dei diodi di protezione. Questo accorgimento protegge il convertitore analogico-digitale da eventuali sovra-elongazioni (overshoot).

Nonostante l'accorgimento dell'adattatore di livelli per limitare la dinamica di escursione della tensione in arrivo all'ADC, è possibile che per fattori esterni, come possibili scariche elettriche dovute alla rete, guasti

Relazione di progettazione e realizzazione Position Sensing Device

nel sistema, ecc. arrivi una tensione di gran lunga superiore ai 5V sui pin di ingresso all'ADC. Proprio per questo motivo è stato predisposto, in via cautelativa, un piccolo stadio di protezione tra l'adattatore di livelli e ADC composto da un diodo Zener per canale opportunamente polarizzato con la propria resistenza. Questo diodo Zener con tensione di soglia di 5V si accenderà se per qualche motivo dovesse verificarsi un incremento anomalo della tensione sul canale e quindi intervenendo prontamente e salvando l'ADC da possibili guasti. Il diodo Schottky invece proteggerà l'ADC da eventuali overshoot di segno negativo superiori a 0,2V in modulo.

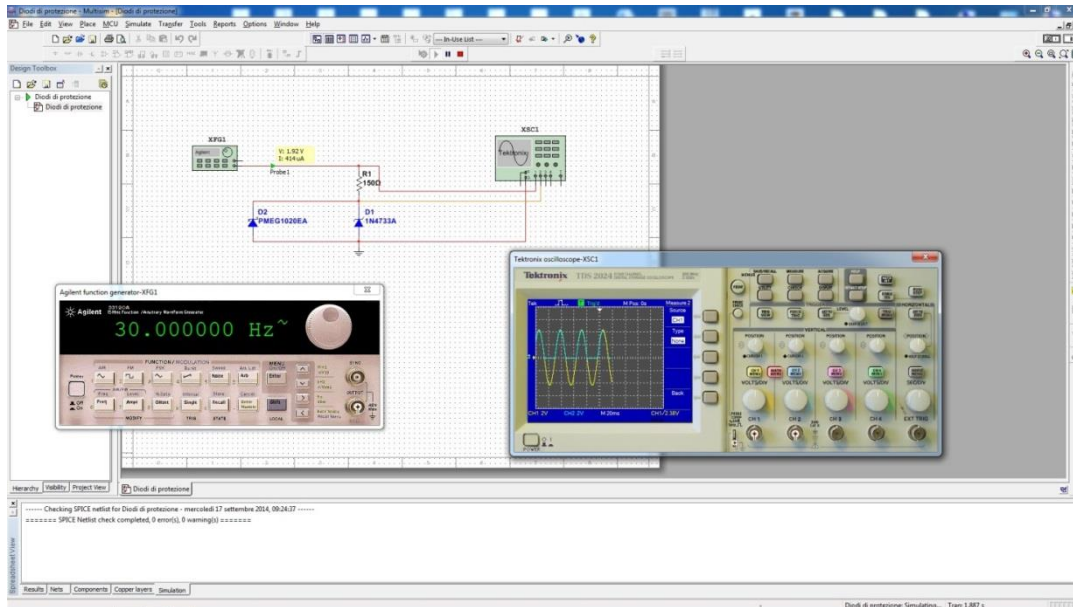


Figura 23: Simulazione dei diodi di protezione

Trattandosi di un prototipo si è scelto di realizzare questa rete di protezione su basetta millefori.

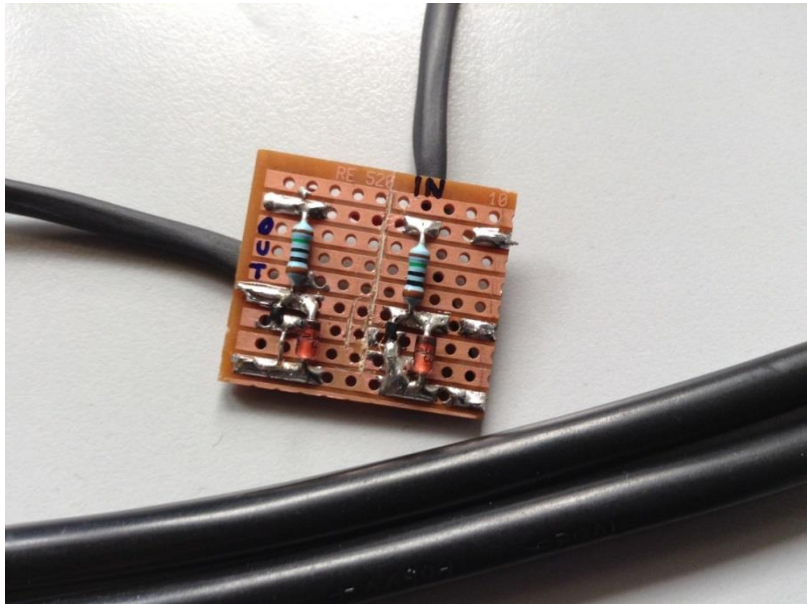


Figura 24: Rete di protezione completa

Come si può notare dalle Figura 24 sono stati utilizzati 2 diodi e un resistore per ogni canale. In questo modo avremo un diodo Zener³ che lavorerà in caso di sovra-elongazioni positive e un altro, Schottky⁴, che lavorerà in caso si verifichino sovra-elongazioni di segno negativo. Nella Figura 22 è possibile osservare la catena composta da stadio di protezione, ADC e Arduino.

Come controllore di base è stato scelto Arduino Ethernet il quale, adeguatamente programmato permette di monitorare via LAN i valori campionati dall'ADC e quindi di avere sempre in tempo reale la posizione dello spot laser che colpisce il PSD

³ Il diodo Zener è un tipo di diodo a giunzione p-n, il cui comportamento è determinato dalla combinazione dell'effetto Zener e dell'effetto di breakdown a valanga. (http://it.wikipedia.org/wiki/Diodo_Zener)

⁴ Il diodo Schottky (dal nome del fisico tedesco Walter Schottky) è un diodo con bassa tensione di soglia e alta velocità di commutazione. (http://it.wikipedia.org/wiki/Diodo_Schottky)

8. Realizzazione della parte meccanica

Per un corretto funzionamento del PSD si è resa necessaria la progettazione di una box di contenimento in Acrilnitrile butadiene stirene (ABS) atta a tenere ben fermi tutti i componenti che lo costituiscono, oltre che fornire una rigidità al sensore al fine di ottenere misurazioni il più accurate possibili. Tutti i componenti del prototipo sono stati realizzati nei nostri laboratori tramite stampante 3D Makerbot Replicator 2x [13] così da ridurre i tempi di fabbricazione. La progettazione è stata ottimizzata in base all'elettronica.

La box principale è formata da due parti separabili, la parte inferiore contiene la scheda analogica fissata al fondo e distanziata da esso mediante piedinatura, mentre la parte superiore sostiene il sensore stesso ancorato tramite due bulloni M3 che hanno anche il compito di sostenere l'interfaccia del filtro ottico. Nella parte inferiore sono stati realizzati, in fase di progettazione, delle aperture che permettono l'uscita dei cavi di alimentazione e dei dati.

Per la parte digitale si è scelto di realizzare una seconda box di dimensioni ridotte e al suo interno sono stati posizionati l'Arduino Ethernet, l'ADC e il circuito di protezione.

Il tutto è stato ancorato al piano ottico tramite un'apposita interfaccia meccanica in modo da poter eseguire le misure e la calibrazione del PSD.



Figura 25: Assi di riferimento

La creazione del modello 3D è stata eseguita con il software CAD Autodesk Inventor 2015 [14]. In una prima fase di lavoro è stata realizzata una box che ha permesso un primo collaudo del dispositivo nella sua versione 1.0. Successivamente, per garantire una maggiore accuratezza e stabilità nelle misure è stata realizzata una versione 1.1.

In quest'ultima versione si è aumentata la rigidità meccanica complessiva del dispositivo incrementando lo spessore delle pareti che compongono la box in ABS e aggiungendo un supporto in alluminio con fori filettati con lo stesso interasse di quelli presenti nelle box. L'interfaccia ha permesso di fissare sensore PSD, parte analogica e parte digitale secondo una sorta di *sandwich* il più possibile perpendicolare al piano ottico e al fascio laser.

Per procedere alla fase di caratterizzazione sono stati montati sul piano ottico dei traslatori lineari in X e Y in grado di apprezzare il centesimo di millimetro.

Relazione di progettazione e realizzazione Position Sensing Device

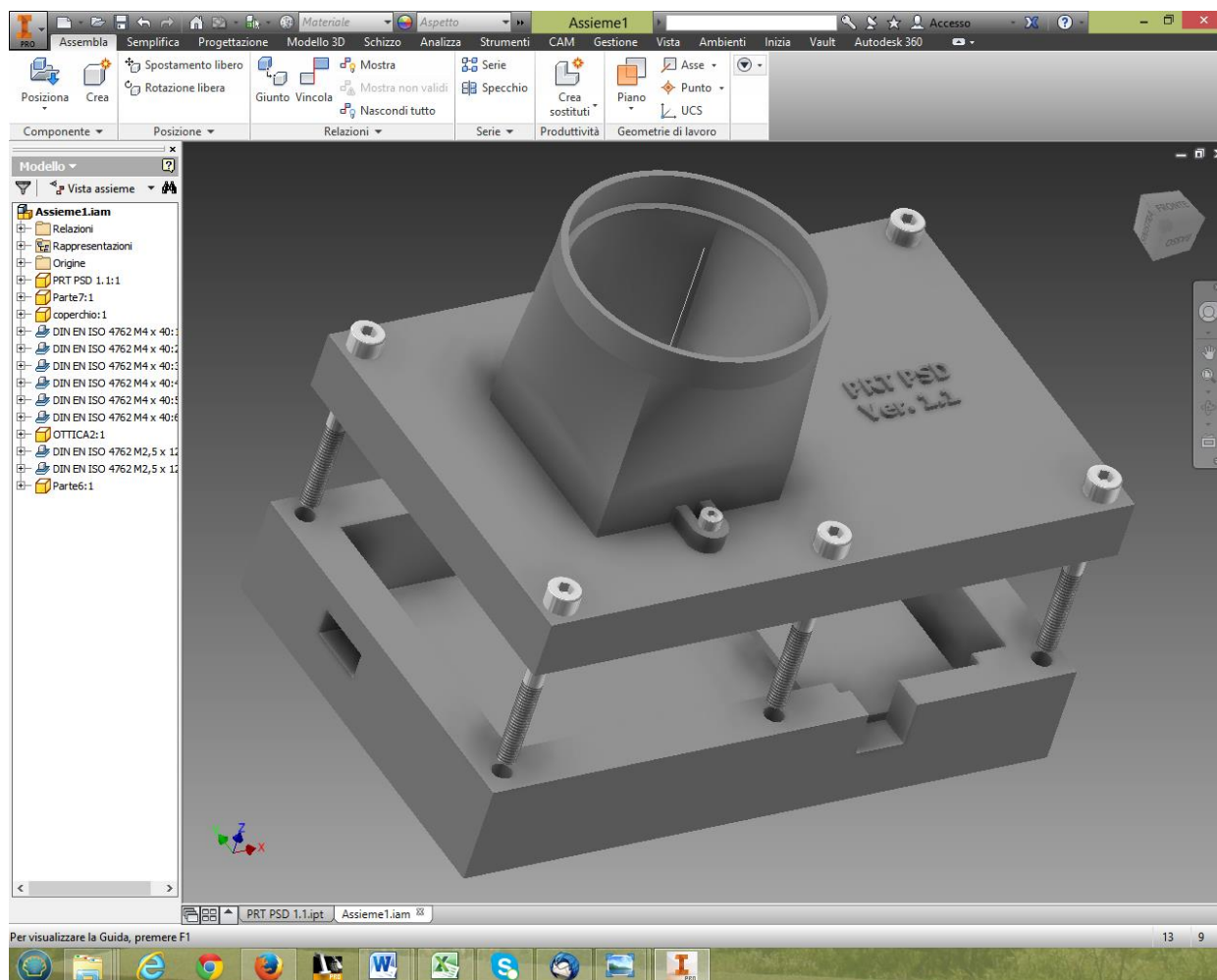


Figura 26: Disegno 3D della Box realizzato con Inventor

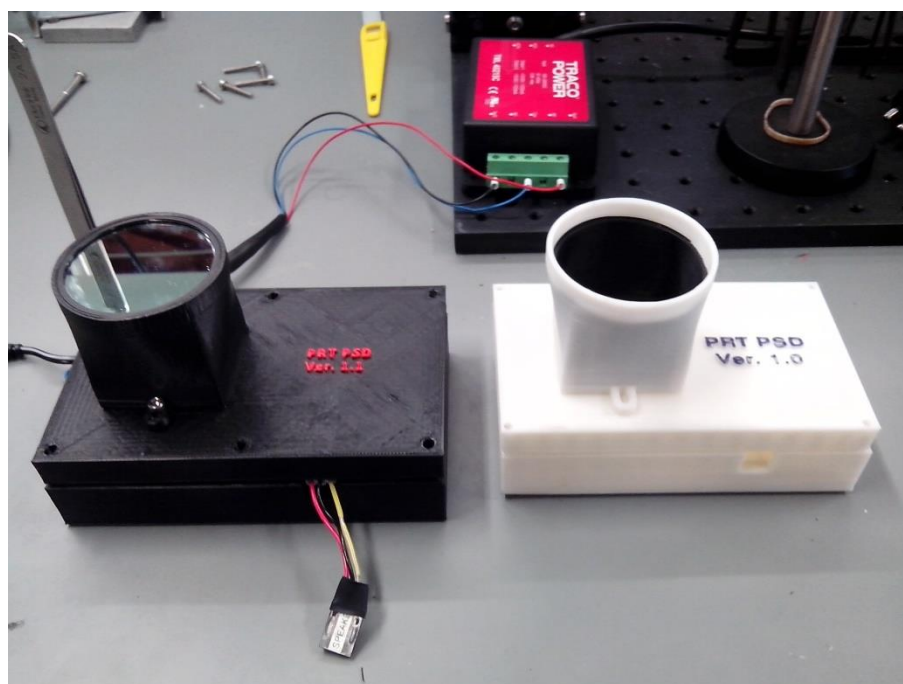


Figura 27: Versione 1.0 e 1.1 a confronto

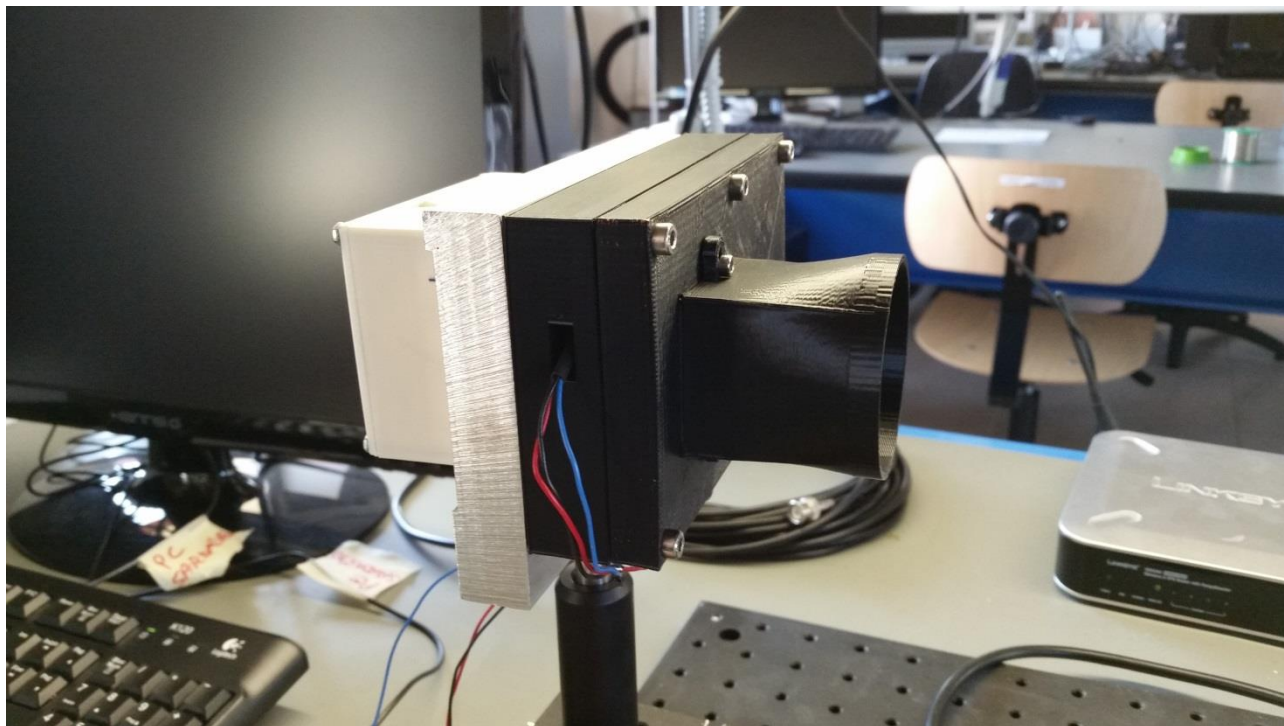


Figura 28: Versione 1.1 del dispositivo con ABS nero più spesso e supporto in alluminio con fori filettati

9. Cablaggio della parte analogica e risultato finale 1.0

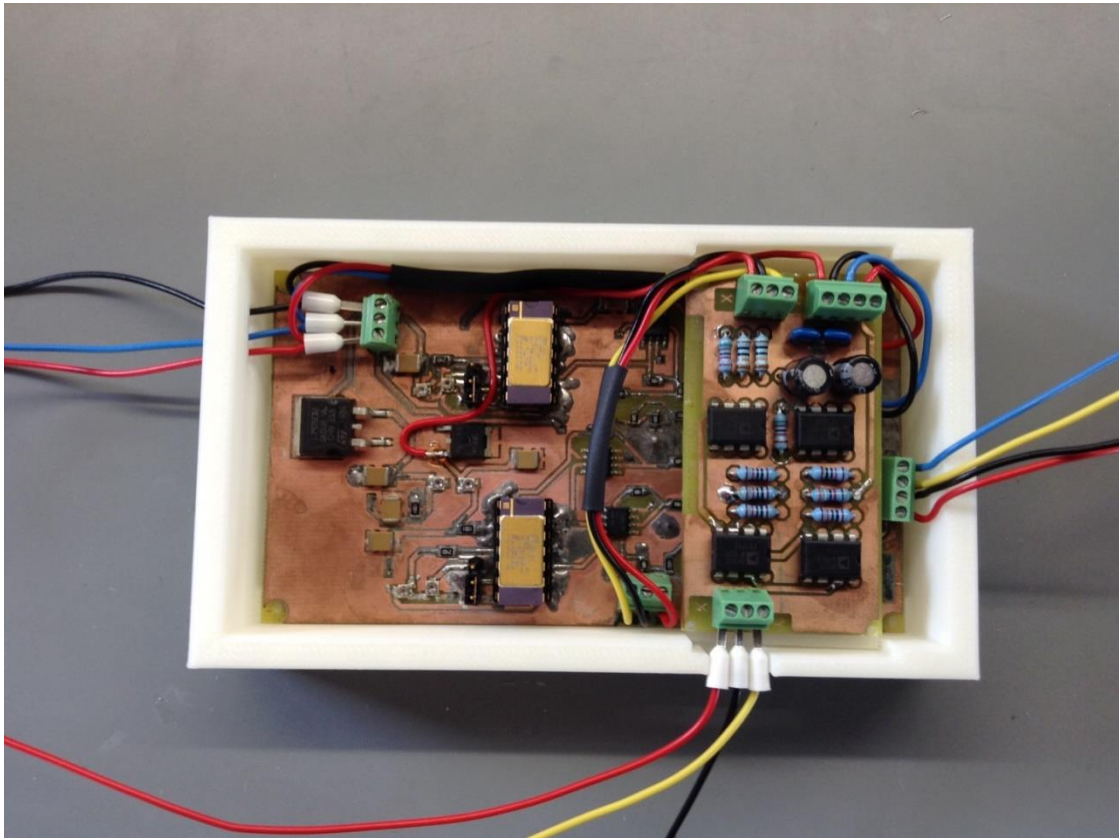


Figura 29: Cablaggio della sezione analogica

Il cablaggio della sezione analogica è stato effettuato in modo da limitare il più possibile lo spazio utilizzato e quindi ridurre la dimensione e gli ingombri.

L'intero cablaggio con il colore dei cavi utilizzati è rappresentato in Figura 30:

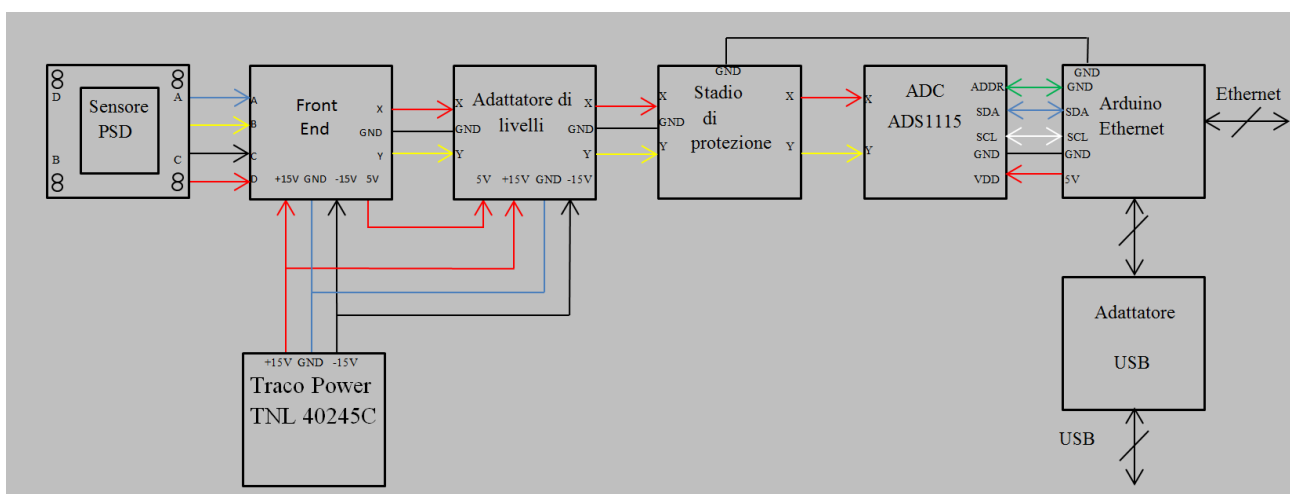


Figura 30: Schema a blocchi finale e cablaggio

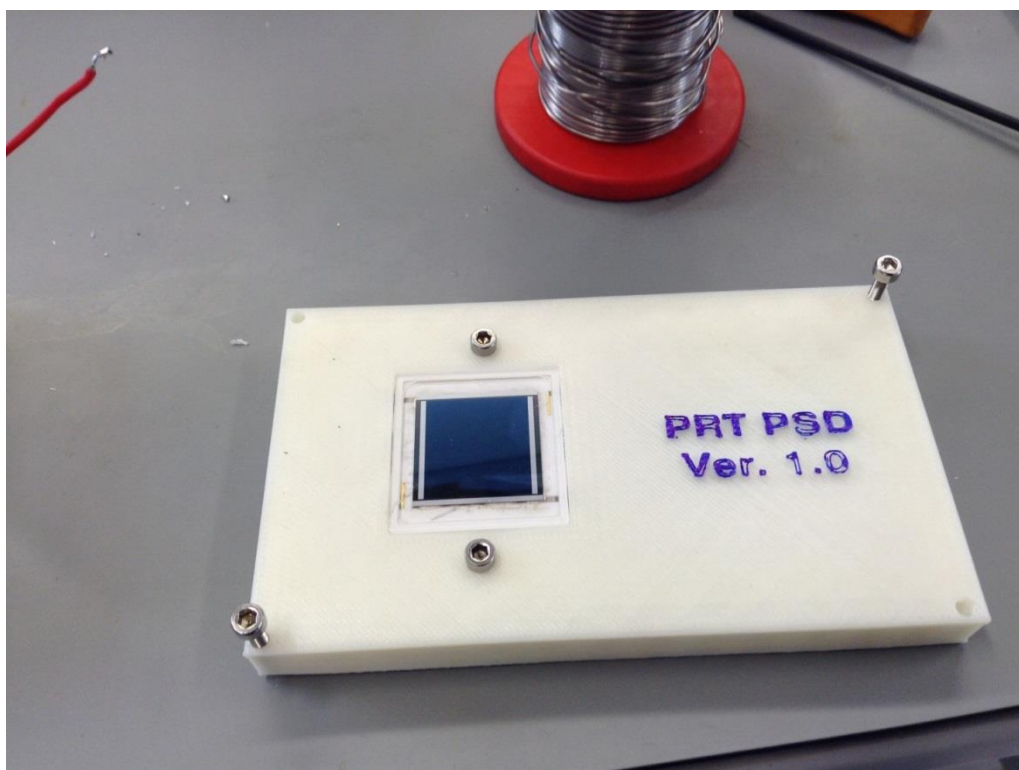


Figura 31: Parte anteriore lato anteriore

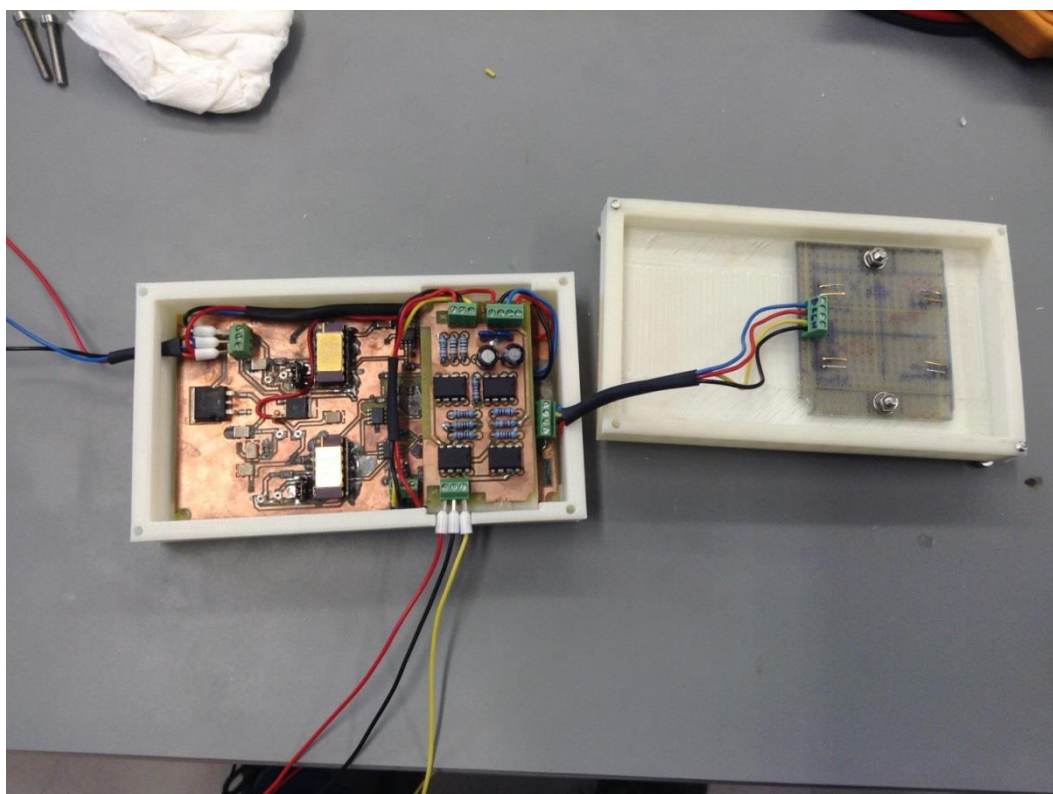


Figura 32: Collegamento tra parte anteriore e posteriore

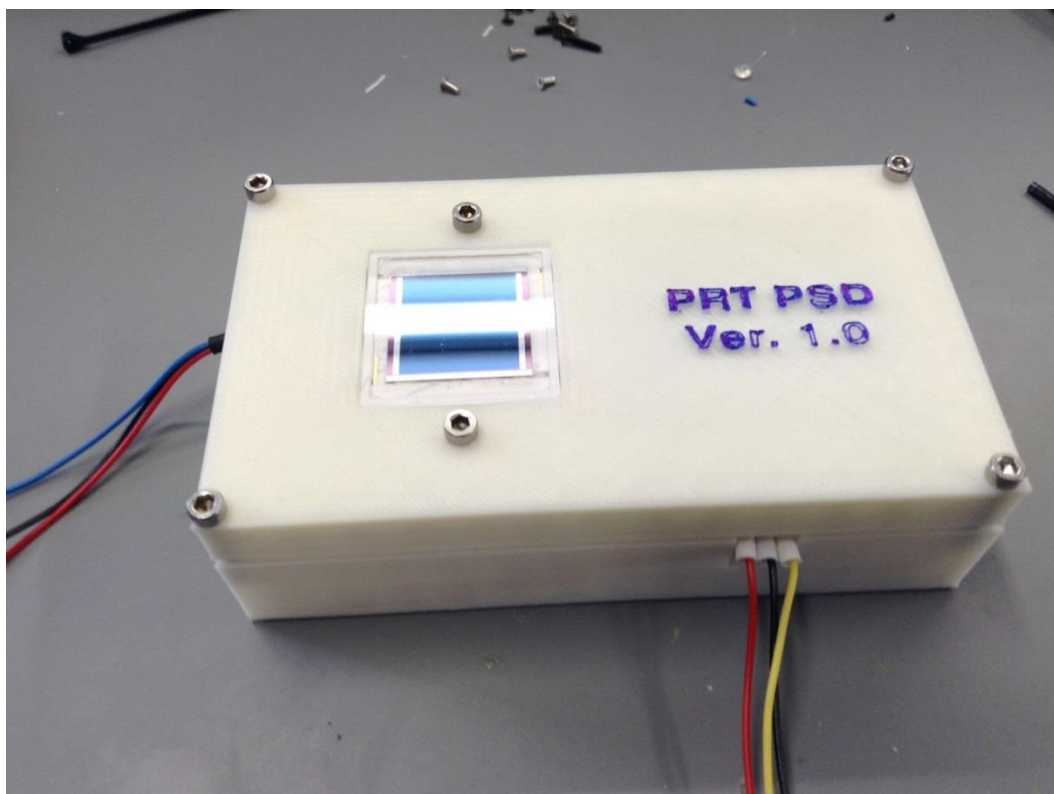


Figura 33: Box terminata

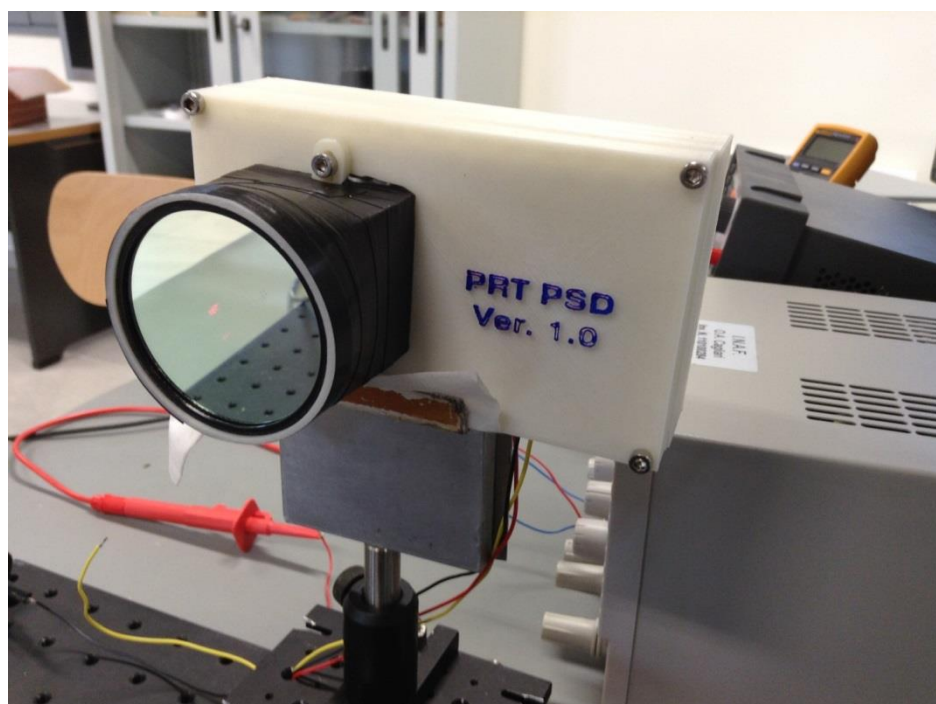


Figura 34: Aggiunta del filtro ottico

9.1 Cablaggio parte digitale

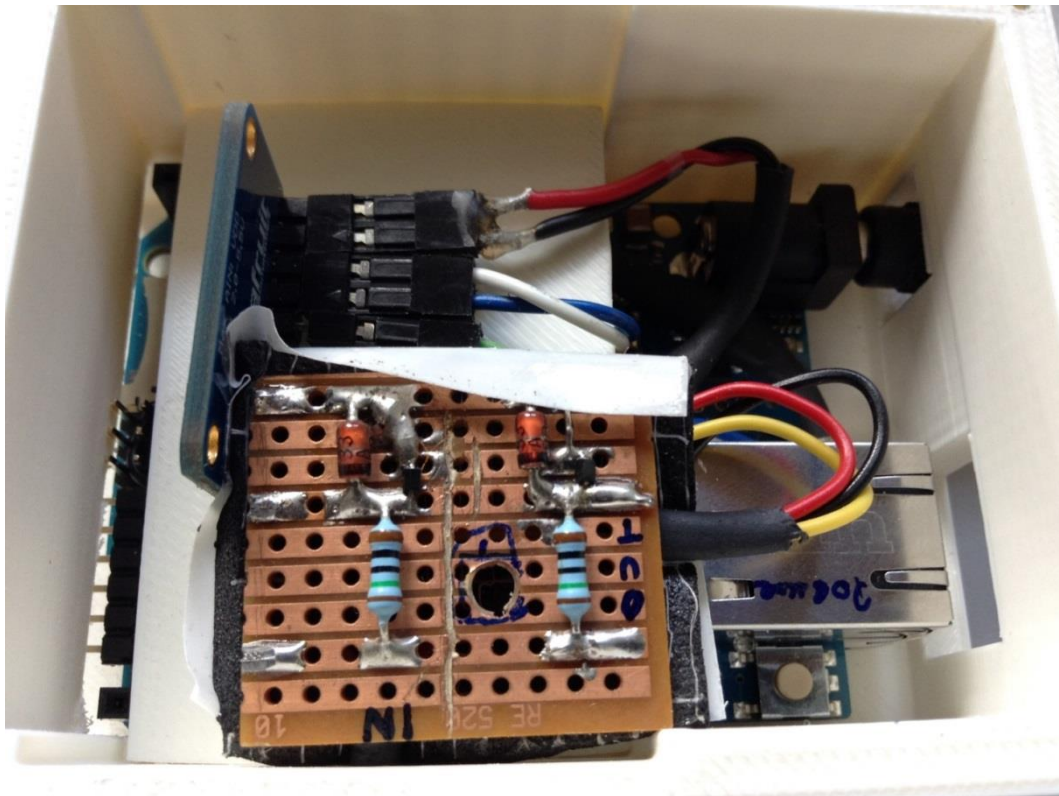


Figura 35: Interno della parte digitale

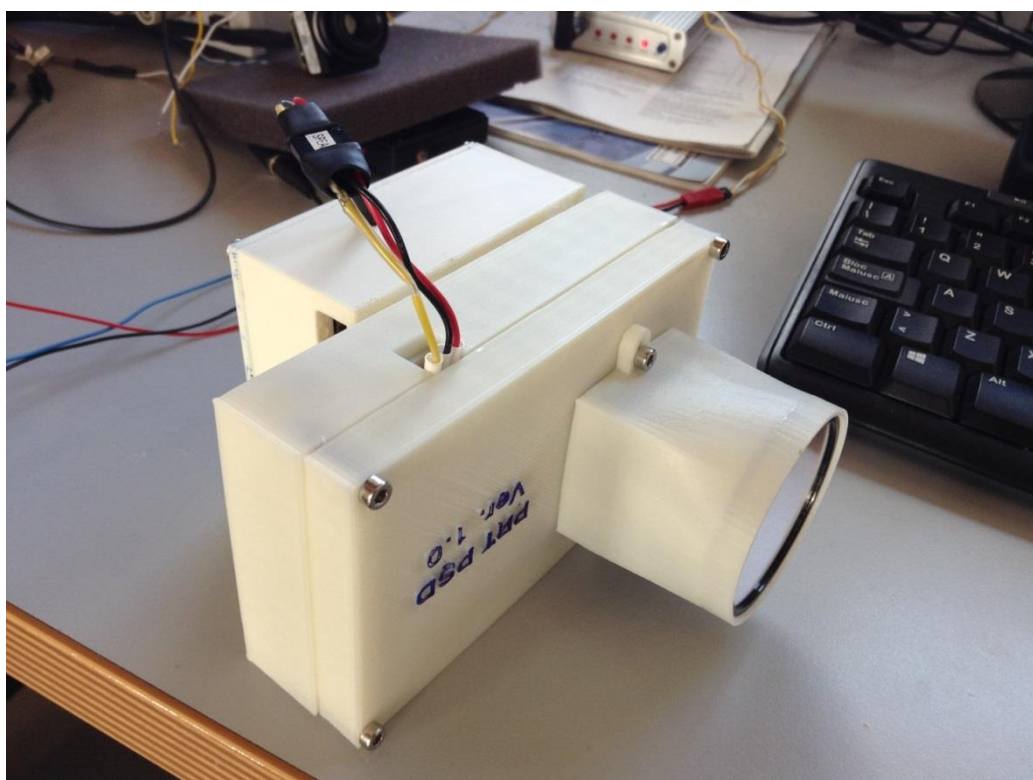


Figura 36: Unione dei due blocchi

10. Progettazione e sviluppo del firmware per Arduino

Arduino è un microcontrollore dotato di elettronica di contorno che permette in maniera relativamente semplice e veloce di collegare e controllare diversi tipi di dispositivi elettronici tramite sensori, attuatori, motori passo-passo, etc.

La sua maggiore flessibilità sta nel fatto che è possibile scrivere, compilare il codice del firmware e trasferirlo nel microcontrollore in maniera veloce e autonoma.

Nel caso specifico è stato necessario predisporre un firmware che permettesse di leggere i valori digitali restituiti dall'ADC ad una frequenza adeguata, elaborarli, e restituirli in formato XML tramite un server web. Inoltre è stato necessario predisporre il web server come una web application che fosse in grado di ricevere in modalità GET i comandi di calibrazione del sensore.

Il codice del firmware si compone quindi di 3 parti:

1. Gestione ed elaborazione dei dati in ingresso
2. Predisposizione del web server che restituisce i risultati.
3. Predisposizione della web application che accetta i comandi di configurazione e di richiesta dei dati.

La scelta della restituzione dei dati tramite un server web è stata fatta per permettere di collegare il PSD, per il trasferimento dei dati, solo tramite un cavo Ethernet e permettere la massima scalabilità del sistema al crescere dell'eventuale numero dei PSD da gestire.

Il formato XML è stato scelto come standard il più possibile flessibile, per compatibilità e sviluppi futuri.

10.1 Codice del Firmware

Il codice sorgente per il Firmware può essere sviluppato tramite l'IDE che fa parte del pacchetto di sviluppo di Arduino. Questo è scritto in un linguaggio C semplificato. Il codice per un firmware prende il nome di sketch. Uno sketch ha una struttura in cui sono sempre presenti due funzioni speciali che si chiamano `setup()` e `loop()`. La prima viene chiamata una sola volta subito dopo che il firmware viene caricato sul microcontrollore, e tutte le volte che il microcontrollore viene acceso. La seconda viene chiamata ripetitivamente senza interruzione fintanto che il microcontrollore è alimentato e alla ripresa dell'alimentazione del microcontrollore.

10.2 Gestione ed elaborazione dei dati in ingresso

Per la gestione dei dati sono state definite le variabili `adc0` e `adc1` che conterranno l'ultimo valore corretto delle coordinate della posizione del beam sul sensore.

I valori che possono assumere le variabili corrispondenti alle coordinate X e Y sono compresi tra 0 e 32767 essendo il valore restituito dall'adc a 16 bit.

Il PSD non restituisce una misura della posizione assoluta, ma una misura della posizione relativa a quella scelta e identificata come zero. Per calcolarla sono state definite due variabili che contengono il valore di zero e che sono `zero_x_correction` e `zero_y_correction`.

La funzione software di calibrazione permette di inizializzare queste due variabili a zero. In una prima versione del firmware, per stabilizzare i valori restituiti dal sensore erano state introdotte una frequenza di

campionamento *frequency* (in millisecondi) e il numero di campionamenti *sample*. Questi erano utilizzati per calcolare una media dei valori del numero di campioni estratti alla frequenza *frequency*.

Nella versione attuale si è invece preferito far restituire il solo valore istantaneo lungo l'asse X e lungo l'asse Y, lasciando al client che effettua l'interrogazione dei valori la possibilità di elaborare i dati secondo le necessità. Questa scelta è stata dettata anche dal fatto che l'ATMEGA328P non gestisce nativamente i calcoli in virgola mobile. Questi vengono emulati dal compilatore generando del codice poco efficiente. Un numero elevato di campionamenti e il calcolo della media avrebbe quindi introdotto un ritardo nell'elaborazione e l'introduzione di arrotondamenti non desiderati.

Il valore impostato delle variabili `adc0` e `adc1` corrispondenti alla posizione X e Y sono corretti tramite i due valori `zero_x_correction` e `zero_y_correction` di calibrazione.

Per poter utilizzare l'ADC Adafruit è necessario inoltre abilitarlo, come si può vedere dalle istruzioni presenti nella funzione `setup()`. La stessa funzione imposta il primo valore di zero del PSD al primo caricamento del firmware.

```
#include <Ethernet.h>
#include <Wire.h>
#include <SPI.h>
#include <Adafruit_ADS1015.h>
#include <WebServer.h>
#include <Streaming.h>

//define Adafruit ADC
Adafruit_ADS1115 ads; /* Use this for the 16-bit version */
```

Per configurare il web server e la web application è stato necessario importare le librerie del modulo Ethernet, del server web e quella di streaming per la costruzione dell'output del server.

Per configurare la scheda Ethernet è necessario impostare i parametri TCP/IP e il MAC Address: quindi

- MAC Address
- IP
- gateway (opzionale)
- subnet mask
- porta

Questo viene fatto tramite i seguenti parametri e funzioni:

```
// assign a MAC address for the ethernet controller.
// fill in your address here:
byte mac[] = {
  0xDE, 0xAD, 0xBE, 0xEF, 0xFE, 0xED};
// assign an IP address for the controller:
IPAddress ip(192,168,145,202);
IPAddress gateway(192,168,145,1);
IPAddress subnet(255, 255, 255, 0);

//create Webduino object
WebServer webserver("", 80);

//AdaFruit Data
int16_t adc0, adc1;

int16_t zero_x_correction = 16384;
```

```
int16_t zero_y_correction = zero_x_correction;

void getCurrentValues()
{
    adc0 = ads.readADC_SingleEnded(0) - zero_x_correction;
    adc1 = ads.readADC_SingleEnded(1) - zero_y_correction;
}
```

La funzione `makeZero()` si occupa banalmente di impostare i valori di correzione dello zero tramite la lettura attuale dei valori del sensore.

```
void makeZero()
{
    //set actual values of x and y as zero position
    zero_x_correction = 0;
    zero_y_correction = zero_x_correction;
    getCurrentValues();
    zero_x_correction = adc0;
    zero_y_correction = adc1;
}
```

Di seguito la funzione `Start` che si occupa sia di ricevere le richieste al web server che di costruire le risposte da dare al client. Le richieste hanno il seguente formato:

```
http://192.168.145.202/index.html
```

```
//Start function
void Start(WebServer &server, WebServer::ConnectionType type, char
*url_param, bool param_complete)
{
    //output example
    //<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
    //<PSD_outputs>
    //  <PSD_output>
    //    <coordinate>X</coordinate>
    //    <value>000</value>
    //  </PSD_output>
    //  <PSD_output>
    //    <coordinate>Y</coordinate>
    //    <value>000</value>
    //  </PSD_output>
    //</PSD_outputs>

    //return the header http 200 OK
    server.httpSuccess();
    P(strMsg) = "<?xml version=\"1.0\" encoding=\"UTF-
8\"?><PSD_outputs><PSD_output>";
    //Manage GET request
    if (type == WebServer::GET)
    {
        server.printP(strMsg);
        //if there are some parameters
        if (param_complete == true)
        {
```

```
String parametri = url_param;
//search managed parameters
int zero = parametri.indexOf("ZERO=TRUE");

if (zero >= 0)
{
    //Calibration
    makeZero();
}
//Return X, Y values
server << "<coordinate>X</coordinate>";
writeXMLvalue(server, adc0);
server << "</PSD_output><PSD_output>";
server << "<coordinate>Y</coordinate>";
writeXMLvalue(server, adc1);
server << "</PSD_output></PSD_outputs>";
}

}

void writeXMLvalue(WebServer &server, int value) {
    server << "<value>";
    server << String(value);
    server << "</value> ";
}

int returnparamvalue(WebServer &server, String full_param_string, int
param_index) {
    server << full_param_string.substring(param_index,
full_param_string.length());
    server << String(param_index);
    int equal_index = full_param_string.indexOf("=", param_index);
    server << String(equal_index);
    int separator_index = full_param_string.indexOf("&", param_index);
    server << String(separator_index);
    if (separator_index == -1)
    {
        separator_index = full_param_string.length();
    }
    String param_str = full_param_string.substring(param_index,
separator_index);
    server << param_str;
    int str_len = param_str.length() + 1;
    char char_array[str_len];
    param_str.toCharArray(char_array, str_len);
    return atoi(char_array);
}
```

Nella funzione `setup()` viene abilitata la porta Ethernet con lo specifico MAC Address e l'IP e viene definita la funzione che risponderà alle chiamate del web server sulla pagina di root.

Inoltre viene specificata la funzione che verrà invocata per la chiamata alla specifica pagina `index.html`

Il server web viene quindi avviato.

```
void setup() {
```

```
//initialize Adafruit
ads.begin();

//set Adafruit gain
ads.setGain(GAIN_ONE); // 1x gain +/- 4.096V 1 bit = 2mV 0.125mV

// start the Ethernet connection and the server:
Ethernet.begin(mac, ip);

//set default function for call of root web server root page
webserver.setDefaultCommand(&Start);
//set function for specific web page
webserver.addCommand("index.htm", &Start);

//start web server
webserver.begin();

// give the sensor and Ethernet shield time to set up:
delay(1000);
//set zero
getCurrentValues();
makeZero();
}

void loop() {

    getCurrentValues();

    //listen for incoming Ethernet connections:
    webserver.processConnection();
}
```

La funzione restituisce al client un messaggio di OK e di seguito costruisce la stringa XML corrispondente alla lettura dei valori attuali. Nella clausola "if" si verifica prima se sono stati passati dei parametri GET insieme alla richiesta e, se questi corrispondono a quelli gestibili, viene eseguita l'operazione corrispondente. Nel nostro caso l'unico parametro gestito è quello della calibrazione.

Il formato XML dell'output permette di predisporre un'interrogazione di più PSD in maniera automatica da parte di un server o di una applicazione.

10.3 PSD Reader

Per effettuare l'interrogazione del PSD è stata realizzata un'applicazione in Microsoft Visual Studio .NET. Questa applicazione permette di inviare una richiesta alla porta 80 del server web all'interno dell'Arduino nel formato:

```
http://192.168.145.202/index.html
```

A questa richiesta il server web Arduino risponde con una pagina in format XML nella forma

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<PSD_outputs>
```



```
<PSD_output>
  <coordinate>X</coordinate>
  <value>000</value>
</PSD_output>
<PSD_output>
  <coordinate>Y</coordinate>
  <value>000</value>
</PSD_output>
</PSD_outputs>
```

Mentre alla richiesta della pagina:

<http://192.168.145.202/index.html?ZERO=TRUE>

Il server web Arduino procede ad eseguire operazioni di calibrazione prima di restituire il file xml con i valori delle due variabili.

Il programma PSD Reader ha le seguenti funzioni:

- inviare il link web della pagina corrispondente al comando di calibrazione
- impostare il fattore moltiplicativo per ottenere il corrispondente valore in micron dello spostamento del beam sul sensore
- effettuare letture continue dei valori X e Y del sensore per visualizzarli
- effettuare una serie di letture continue ad intervalli regolari per ottenere delle informazioni log del comportamento del PSD

Inoltre, poiché l'indirizzo IP assegnato al PSD potrebbe essere modificato aggiornando il firmware, nel PSD Reader è possibile impostare l'IP per instaurare una comunicazione.

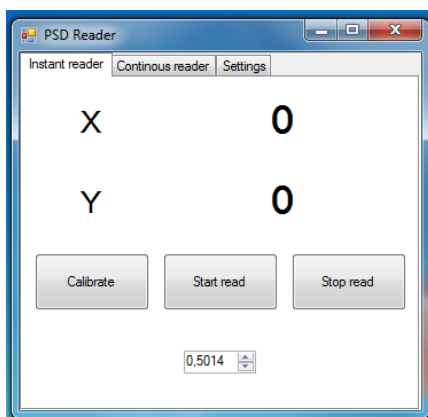


Figura 37: PSD Instant Reader

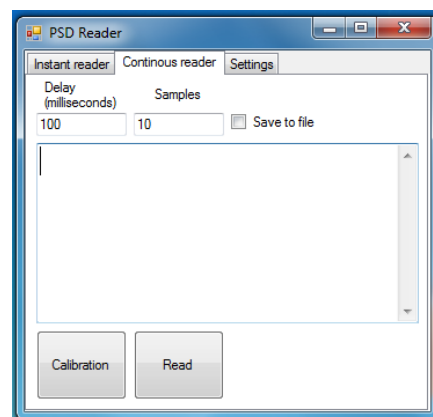


Figura 38: PSD Continuous Reader

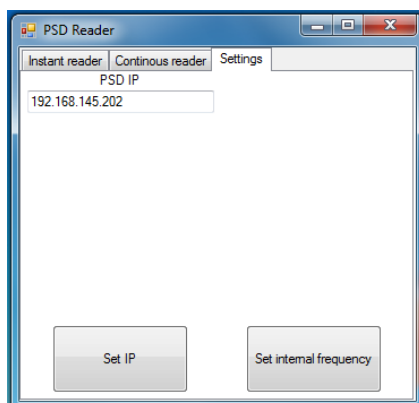


Figura 39: PSD Settings

11. Misure effettuate

Per caratterizzare il PSD è stata effettuata una campagna di misure per calcolare gli eventuali coefficienti di correzione da applicare ai valori restituiti dal sensore. Per fare questo è stato utilizzato un piano micrometrico che ha consentito spostamenti con precisione di 1 micron lungo l'asse X. Le misure lungo l'asse Y, invece non sono state trattate in questa relazione poiché non è presente nei nostri laboratori un sistema in grado di fornirci uno spostamento lungo questo asse con la precisione necessaria.

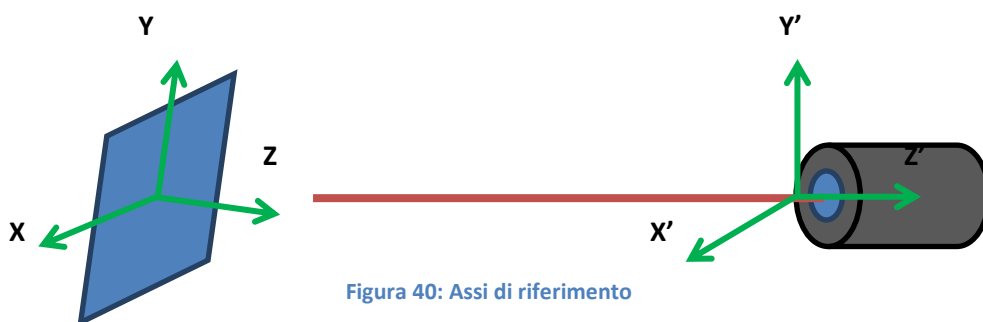
Dall'immagine in Figura 40 si può notare che, in generale, il fascio laser non è perpendicolare al piano del sensore PSD e questo causa una deformazione della forma del punto di incidenza. Questo non può essere misurato dal sensore ed è quindi indispensabile posizionare il più possibile il sensore su un piano ortogonale al fascio laser.

Le misurazioni si sono svolte posizionando il fascio laser il più possibile al centro del sensore ed utilizzando la funzione di calibrazione che ha impostato a zero i valori restituiti per X e Y. Di seguito, spostando il fascio laser lungo l'asse X con degli spostamenti regolari di 1 mm sono state effettuate per ogni punto 26 misure con un frequenza di 10 Hz.

La risoluzione del sensore è data dal valore digitale restituito dall'ADC, ed è quindi compreso tra 0 e 32767 per ognuna delle coordinate. Essendo il sensore quadrato e avendo una larghezza di 20000 μm il valore in micron delle letture è dato dalla formula

$$X_{\mu} = X_d \frac{20000\mu\text{m}}{32767}$$

dove X_{μ} indica il valore in micron e X_d indica il valore digitale restituito dal sensore per una delle due coordinate.



Come viene evidenziato dalla Figura 40 i sistemi di riferimento del sensore (XYZ) e quello del piano micrometrico (X'Y'Z') su cui è fissato il laser non coincidono. Nella Figura 41 i due valori restituiti dal sensore per le coordinate X e Y giacciono idealmente su una retta che passa per il centro di calibrazione con un inclinazione α .

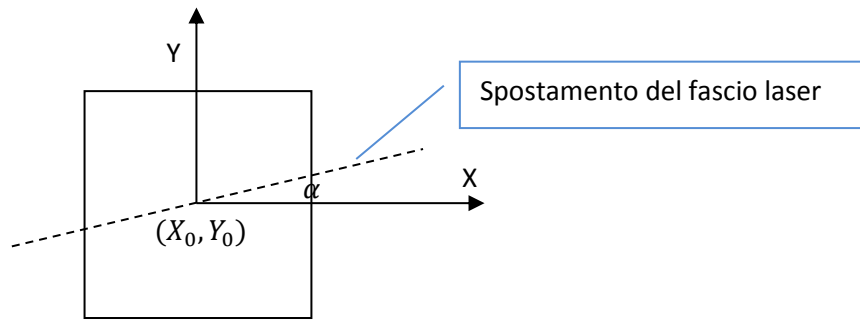


Figura 41: Spostamento ideale del fascio laser sul sensore PSD

Per ogni punto preso in considerazione il sensore ha restituito i valori x e y per ognuna delle 26 misure. Di questi è stata fatta la media \bar{x} e \bar{y} ed è stata quindi calcolata la distanza dal centro di calibrazione con la seguente formula.

$$D = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}$$

I valori ottenuti sono:

Valore atteso δ (μm)	\bar{x} (μm)	\bar{y} (μm)	D (μm)	Calibrazione ($\frac{D}{\delta}$)
0	2,70	-0,15	2,71	
1000	-1129,92	6,31	1129,94	0,885
2000	-2251,38	17,35	2251,45	0,888
3000	-3370,46	28,38	3370,58	0,890
4000	-4528,54	28,77	4528,63	0,883
5000	-5679,00	33,12	5679,10	0,880
6000	-6854,73	42,92	6854,87	0,875
7000	-8145,23	48,08	8145,37	0,859
8000	-9437,00	81,58	9437,35	0,848
9000	-10532,69	92,23	10533,10	0,854
10000	-10671,42	97,15	10671,87	0,937
11000	-11619,50	127,42	11620,20	0,947
12000	-11318,15	201,73	11319,95	1,060

Tabella 1: Media della posizione dei punti misurati durante la calibrazione e relativa distanza dal centro.

I valori indicati in rosso, molto lontani da quelli attesi, sono stati misurati all'approssimarsi del beam al bordo del sensore, e quindi non sono stati presi in considerazione. L'aumentare dell'errore all'allontanarsi dal centro del sensore è un comportamento atteso in base alle specifiche indicate dal costruttore nel datasheet.

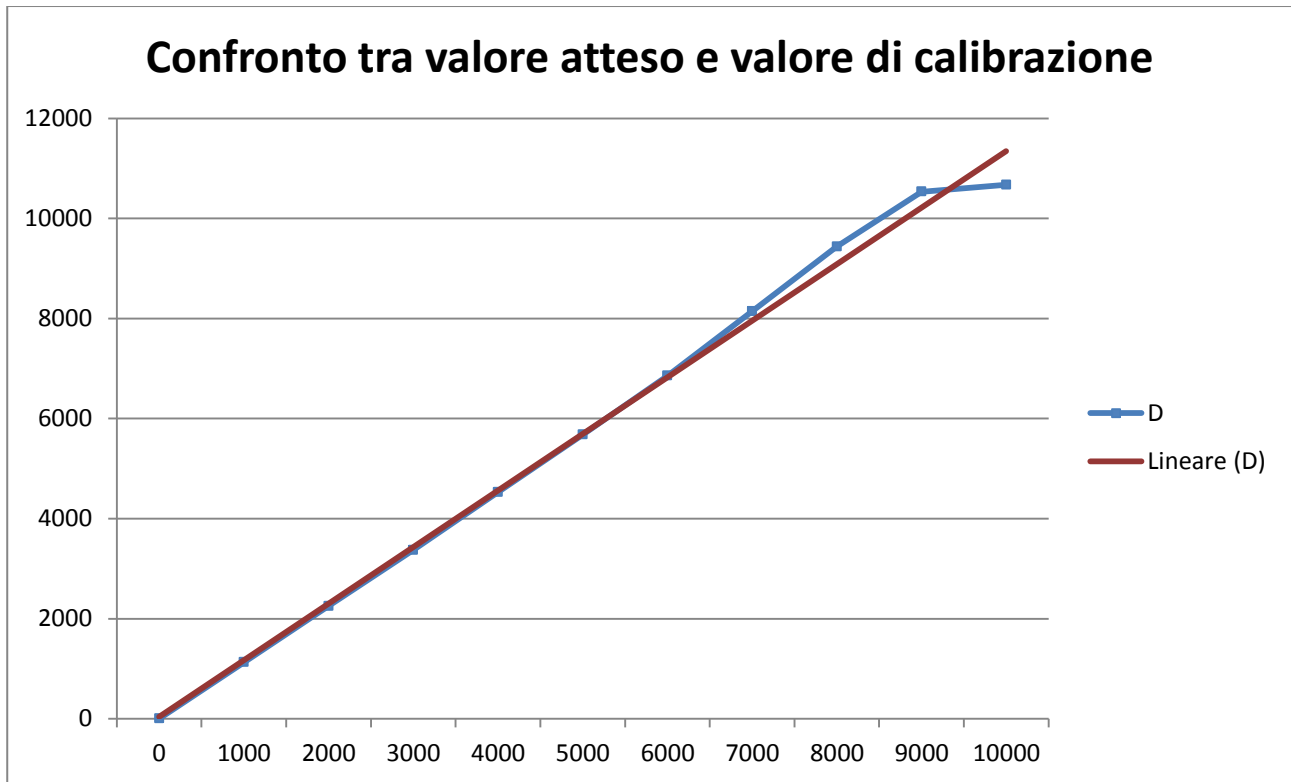


Figura 42: Grafico del confronto tra valore atteso e di calibrazione

Nella Figura 42 si può notare che l'andamento del valore atteso rispetto a quello misurato per la calibrazione è approssimabile con una retta (in rosso). Per correggere il valore letto è quindi possibile applicare un fattore moltiplicativo calcolato come la media del valore di calibrazione ed uguale a 0.87376; questo è stato utilizzato nel programma PSD Reader per ottenere i valori della misura riportata nella Tabella 2.

Valore atteso δ (μm)	\bar{x}_ω (μm)	\bar{y}_ω (μm)	D_ω (μm)	Calibrazione ($\frac{D_\omega}{\delta}$)
0	-6,27	-0,65	6,30	
1000	-1153,81	7,35	1153,83	0,867
2000	-2270,81	3,77	2270,81	0,881
3000	-3346,27	4,50	3346,27	0,897
4000	-4397,81	10,88	4397,82	0,910
5000	-5402,23	5,85	5402,23	0,926
6000	-6381,19	8,35	6381,20	0,940
7000	-7382,23	19,12	7382,26	0,948
8000	-8378,27	37,54	8378,35	0,955
9000	-9416,65	42,31	9416,75	0,956
10000	-10424,54	44,12	10424,63	0,959
11000	-11501,08	66,62	11501,27	0,956
12000	-12598,88	95,69	12599,25	0,952
13000	-13763,92	131,69	13764,55	0,944

Tabella 2: Media della posizione dei punti misurati dopo aver applicato il fattore moltiplicativo di calibrazione



Figura 43: Grafico del confronto tra valore atteso e valore misurato dopo la calibrazione

Il risultato, come si può vedere dal grafico Figura 43, è quello di un rapporto lineare tra valore atteso e valore restituito.

Nel grafico in Figura 44 si può confrontare la posizione dei punti sul sensore prima e dopo l'applicazione del fattore di correzione, considerando che il datasheet del sensore PSD dichiara "Position Detection Error" di $200\mu\text{m}$ nel 64% dell'area sensibile, l'errore di posizione dei punti risulta essere inferiore rispetto alle aspettative.

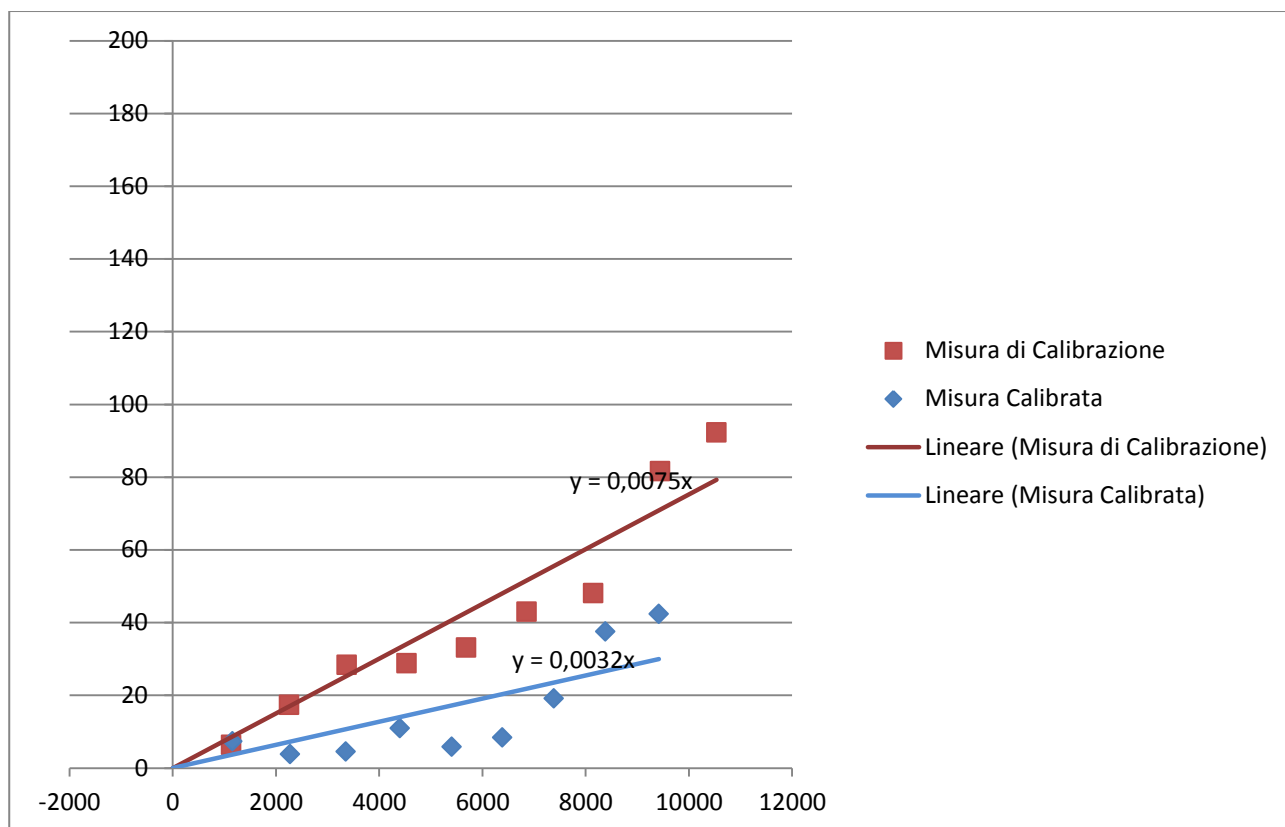


Figura 44: Grafico a della posizione dei punti misurati prima e dopo la calibrazione

12. Conclusioni e sviluppi futuri

Il sensore utilizzato per la realizzazione del PSD è soggetto, da specifiche, ad un errore del 25% sul valore restituito. Inoltre è possibile notare un diverso comportamento delle aree centrali rispetto a quelle periferiche. La risoluzione viene data dal costruttore pari a 200 μ m. Prendendo in considerazione questi due aspetti si può considerare accettabile un utilizzo dello strumento per letture con una precisione dell'ordine del centesimo di millimetro, comunque oltre il valore imposto dalle specifiche. Tale valore tende a peggiorare per misure effettuate a lunga distanza poiché il beam del fascio laser tende a subire dei disturbi dovuti a un effetto lente creato dall'aria calda e all'aumento delle dimensioni del beam che dovrà essere opportunamente collimato.

Va sottolineato l'aspetto sperimentale dell'attuale versione del PSD non ancora adatto a misure stabili di alta precisione. Con le versioni successive è previsto infatti un sostanziale incremento della stabilità grazie ad un'elettronica meno soggetta ad interferenze legate alla realizzazione in laboratorio della PCB. Questa verrà realizzata da un centro specializzato garantendo una meccanica più robusta ed affidabile. La versione successiva, in avanzato stadio di realizzazione, verrà testata anche in ambiente non controllato e in situazioni più simili al suo reale utilizzo, sarà inoltre possibile pianificare una campagna di misure più intensa in modo da poter ottenere più dati utili alla calibrazione dello strumento. Andrà inoltre affrontato il problema relativo alla calibrazione sul campo dello strumento prima di ogni misura che dovrà il più possibile tener conto dell'inclinazione rispetto al fascio laser.

Sempre per aumentare la stabilità delle misure su un più ampio arco di tempo, la nuova box, che conterrà l'elettronica, verrà realizzata in alluminio e non più in ABS in modo da non subire deformazioni a causa di sollecitazioni meccaniche e garantendo una maggiore dissipazione del calore generato dai componenti elettronici.

13. Bibliografia

- [1] Tonino Pisanu ; Franco Buffa ; Raimondo Concu ; Pasqualino Marongiu ; Mauro Pili ; Sergio Poppi ; Giampaolo Serra ; Enrico Urru ; Gianpaolo Vargiu; "A PSD (position sensing device) to map the shift and tilt of the SRT secondary mirror" Proc. SPIE 9145, Ground-based and Airborne Telescopes V, 91454U (July 22, 2014); doi:10.1117/12.2055849.
- [2] <http://www.osioptoelectronics.com/Libraries/Product-Data-Sheets/Duo-Lateral-Linear-Photodiodes.sflb.ashx>
- [3] https://it.wikipedia.org/wiki/Giunzione_p-n
- [4] <http://www.treccani.it/enciclopedia/fotocorrente/>
- [5] <http://www.tek.com/sites/tek.com/files/media/media/resources/2450%20DataSheet.pdf>
- [6] <http://www.osioptoelectronics.com/application-notes/AN-Position-Sensing-Photodiodes.pdf>
- [7] <http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/opa27.pdf>
- [8] <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD534.pdf>
- [9] <http://www.cadsoftusa.com/>
- [10] <http://www.sketchup.com/it/products/sketchup-pro>
- [11] <http://www.ni.com/multisim/i/>
- [12] <http://arduino.cc/en/guide/introduction/>
- [13] <http://www.makerbot.com/>
- [14] <http://www.autodesk.it/products/inventor/overview/>

14. Tavole

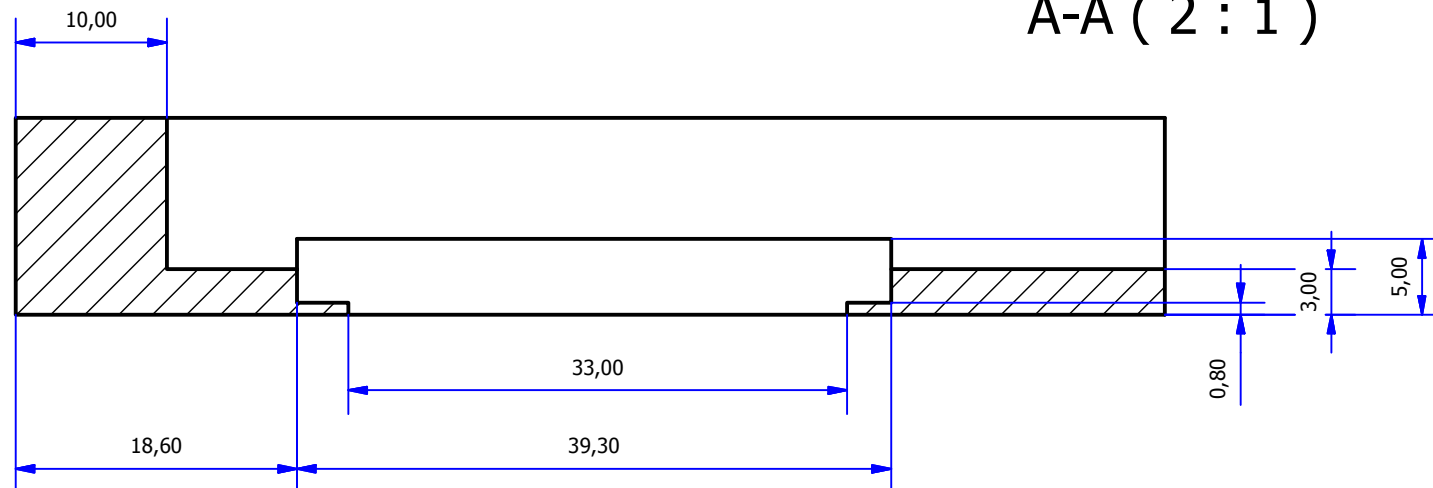
Si allegano le tavole della realizzazione meccanica.

15. Ringraziamenti

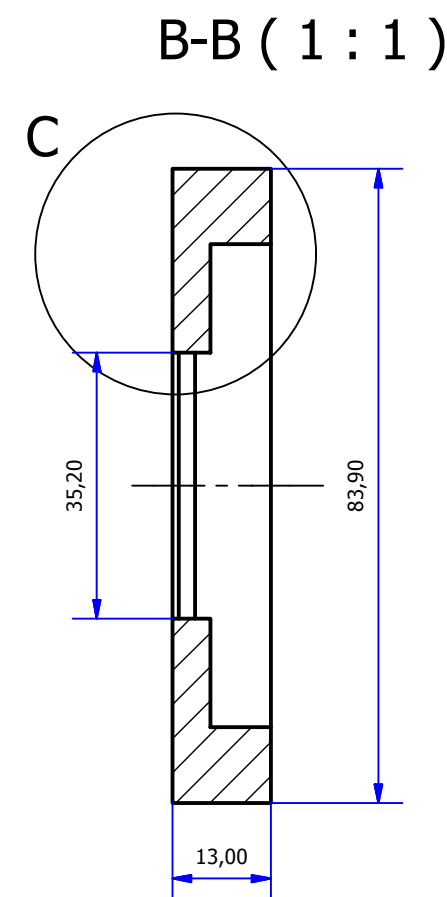
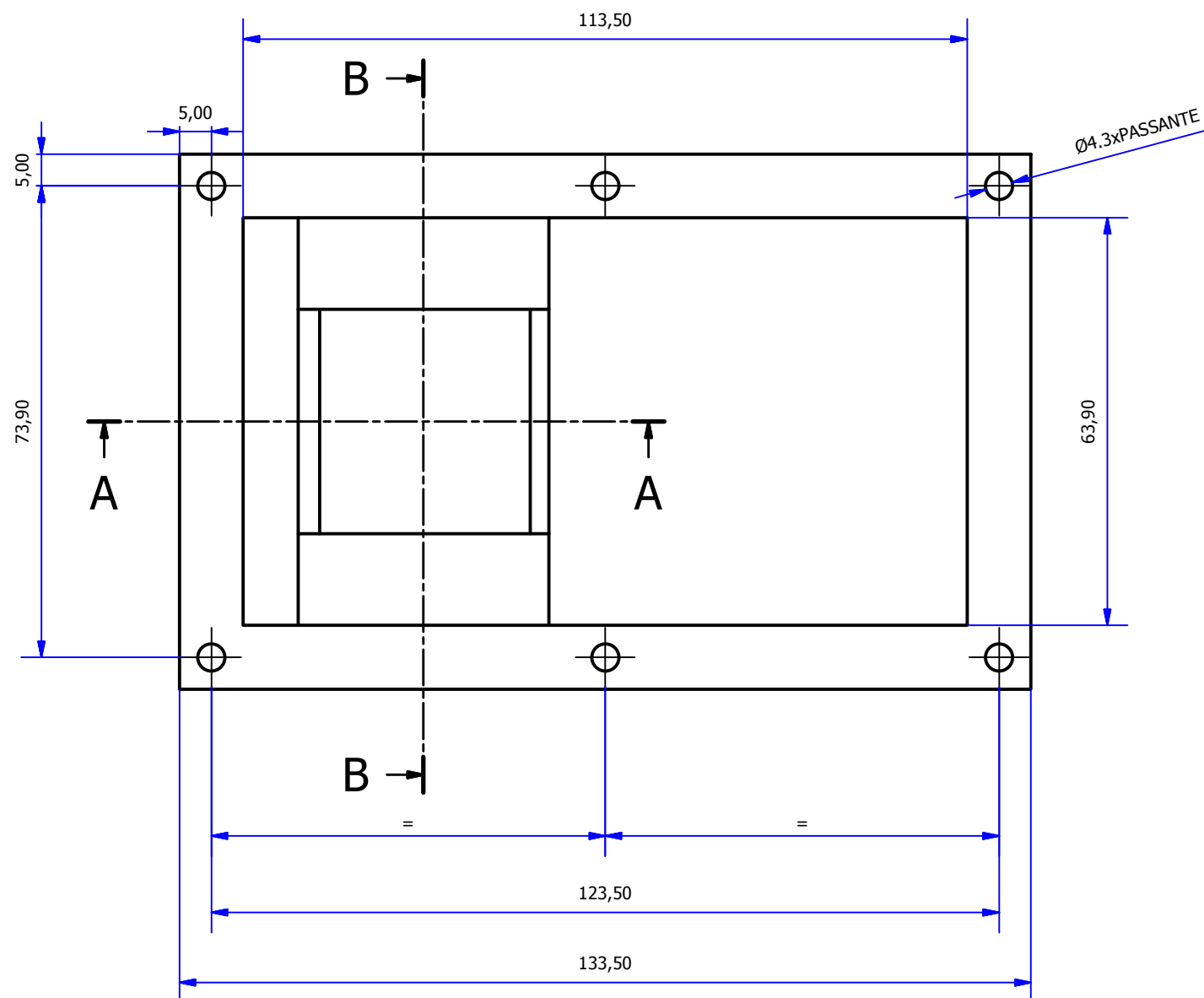
Un ringraziamento particolare a Franco Buffa e Pasqualino Marongiu per il contributo e il supporto dato.

Progetto finanziato tramite POR FESR Sardegna 2007/2013 Asse VI Competitività Linea di Attività 6.1.1.a "Promozione e sostegno all'attività di RSI dei Poli di Innovazione e dei progetti strategici" – Avviso Pubblico Progetti Cluster Top-Down.

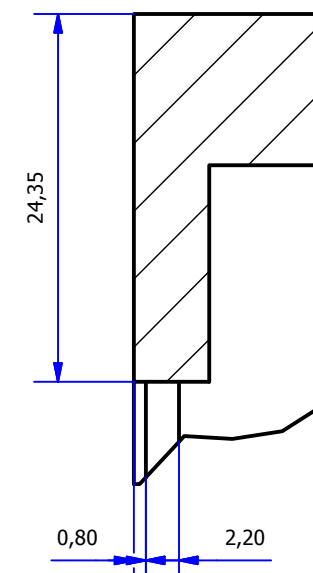
Il progetto è sostenuto dal Dipartimento di Ingegneria Elettrica ed Elettronica dell'Università degli Studi di Cagliari.



A-A (2 : 1)

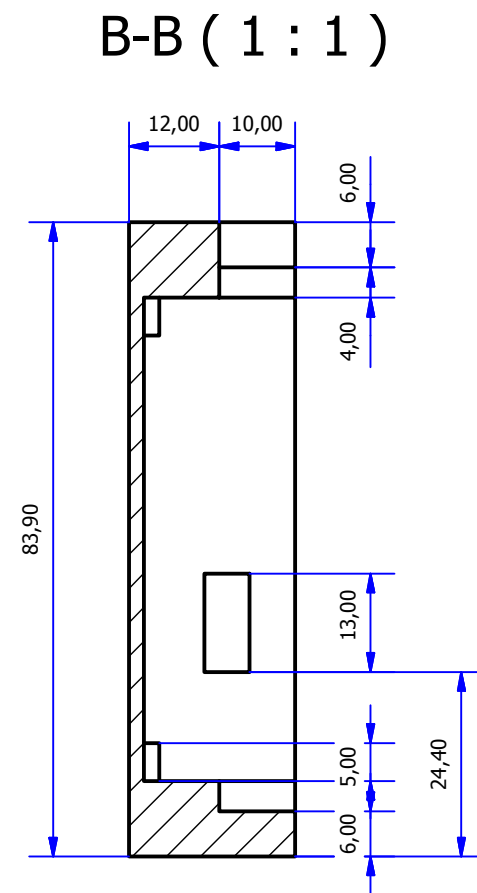
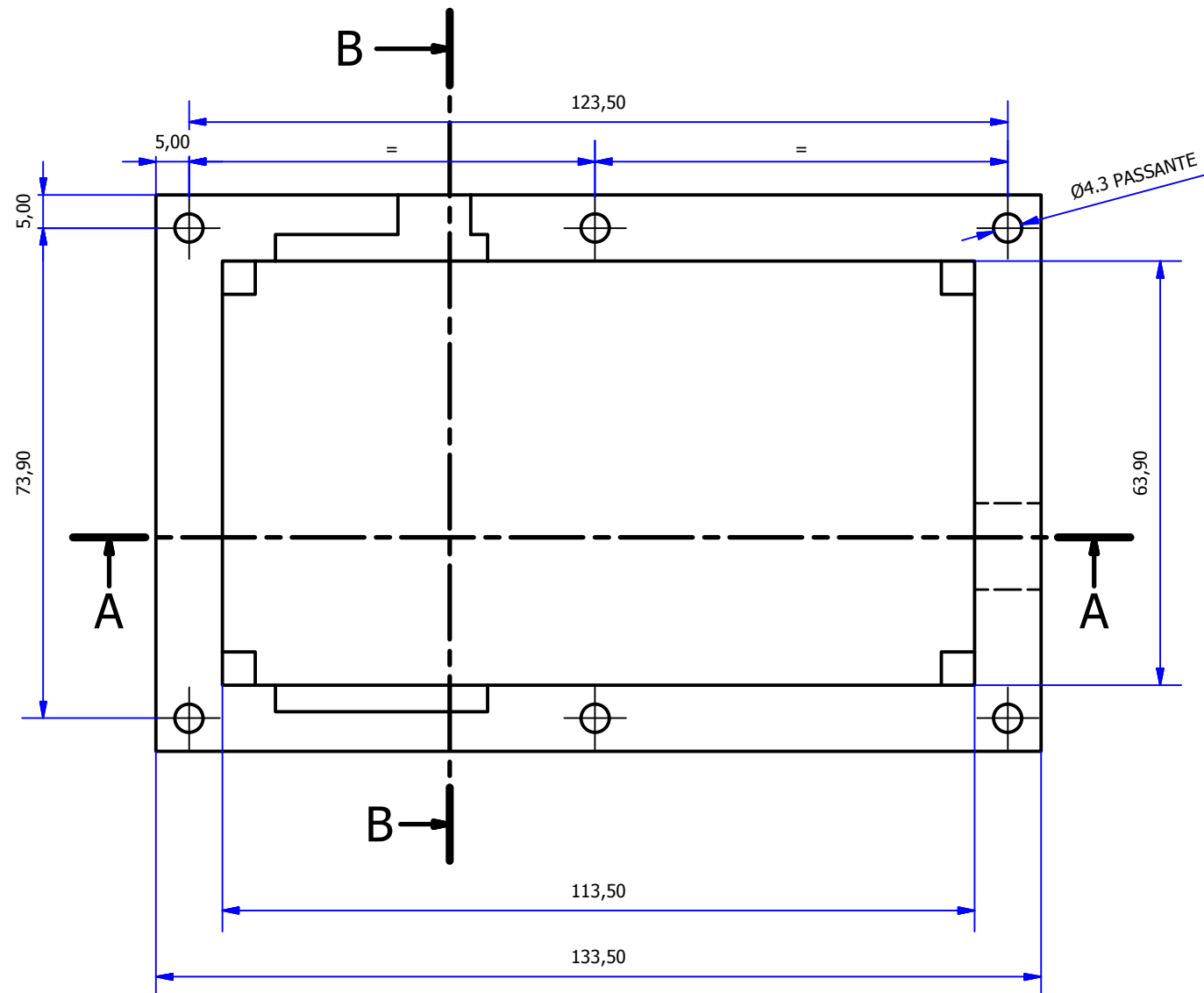
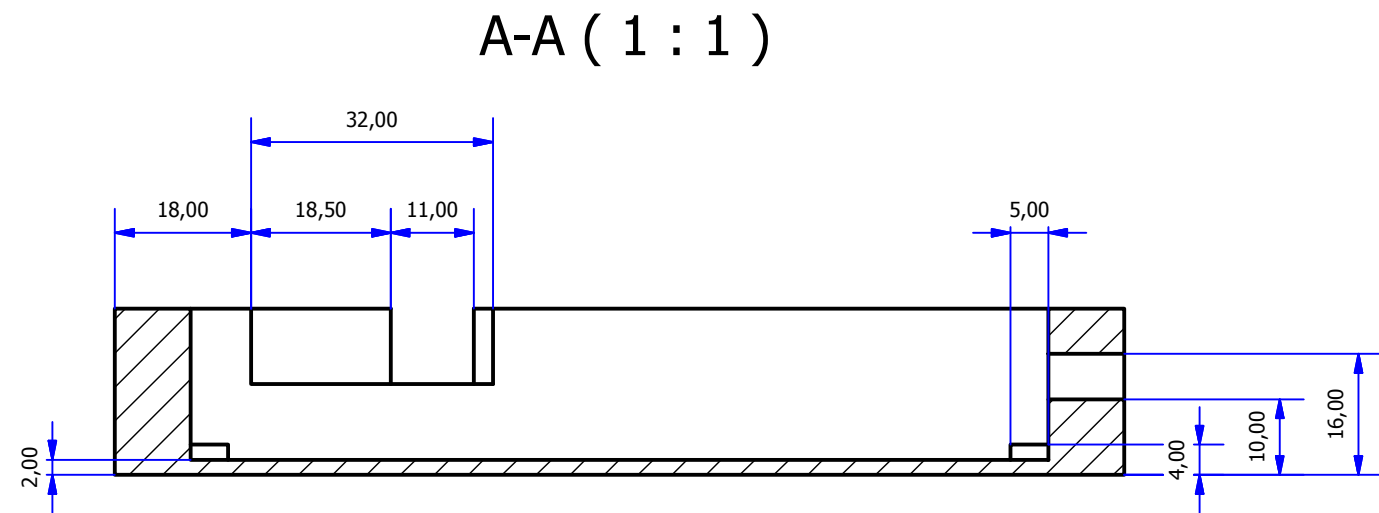


B-B (1 : 1)

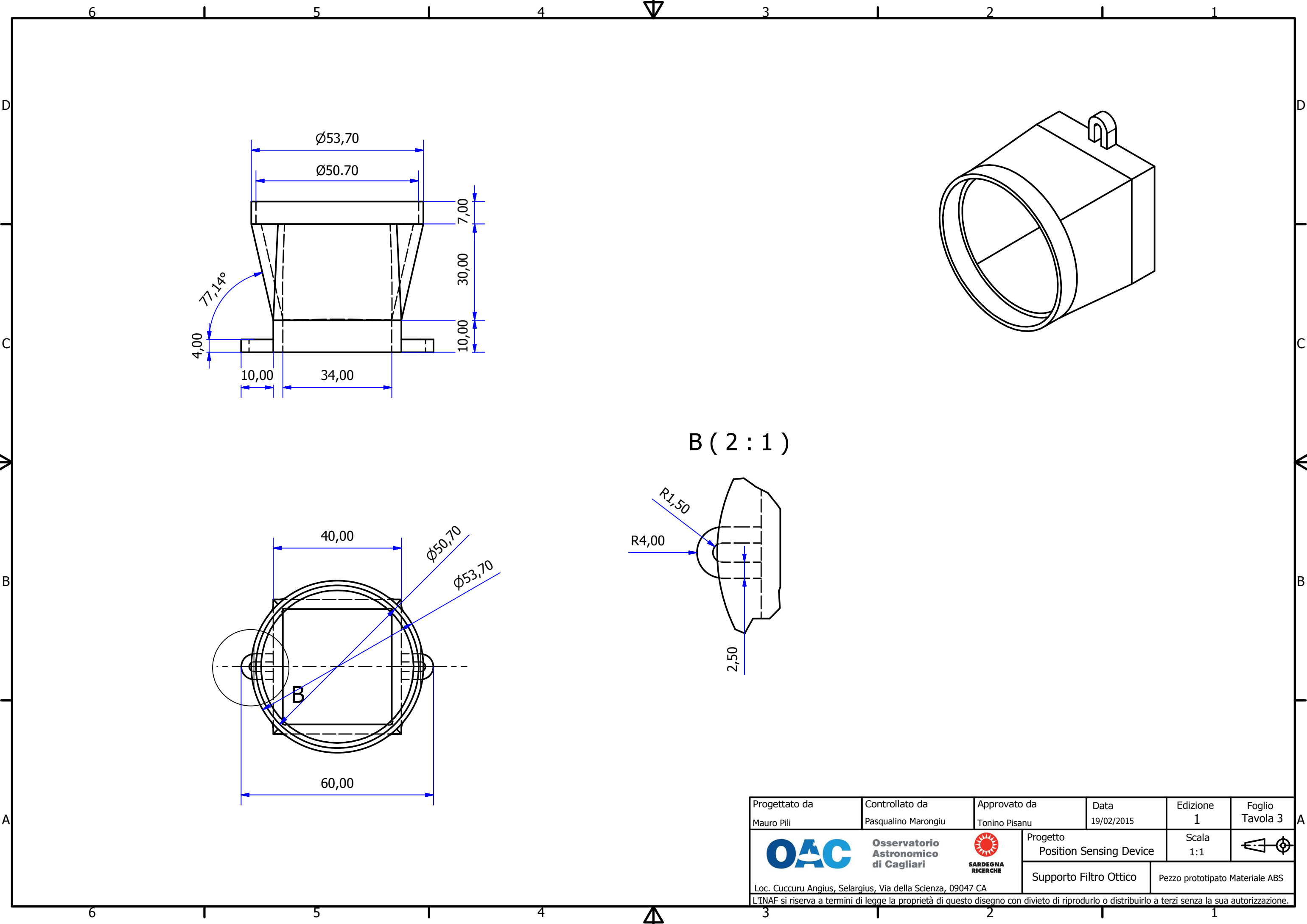


C (2 : 1)

Progettato da Mauro Pili	Controllato da Pasqualino Marongiu	Approvato da Tonino Pisanu	Data 19/02/2015	Edizione 1	Foglio Tavola 2	
<div><div>Osservatorio Astronomico di Cagliari</div><div>SARDEGNA RICERCHE</div></div>			Progetto Position Sensing Device		Scala 1:1	
			Coperchio Box		Pezzo prototipato Materiale ABS	
Loc. Cuccuru Angius, Selargius, Via della Scienza, 09047 CA						
L'INAF si riserva a termini di legge la proprietà di questo disegno con divieto di riprodurlo o distribuirlo a terzi senza la sua autorizzazione						



Progettato da Mauro Pili	Controllato da Pasqualino Marongiu	Approvato da Tonino Pisanu	Data 19/02/2015	Edizione 1	Foglio Tavola 1	
<div><div><div>Osservatorio Astronomico di Cagliari</div></div><div><div>SARDEGNA RICERCHE</div></div></div> <td colspan="2">Progetto Position Sensing Device</td> <td>Scala 1:1</td> <td></td>			Progetto Position Sensing Device		Scala 1:1	
Loc. Cuccuru Angius, Selargius, Via della Scienza, 09047 CA			Base Box		Pezzo prototipato Materiale ABS	
L'INAF si riserva a termini di legge la proprietà di questo disegno con divieto di riprodurlo o distribuirlo a terzi senza la sua autorizzazione.						



Progettato da Mauro Pili	Controllato da Pasqualino Marongiu	Approvato da Tonino Pisanu	Data 19/02/2015	Edizione 1	Foglio Tavola 3	
<div><div>Osservatorio Astronomico di Cagliari</div></div> <div><div>SARDEGNA RICERCHE</div></div>			Progetto Position Sensing Device		Scala 1:1	
Loc. Cuccuru Angius, Selargius, Via della Scienza, 09047 CA			Supporto Filtro Ottico		Pezzo prototipato Materiale ABS	
L'INAF si riserva a termini di legge la proprietà di questo disegno con divieto di riprodurlo o distribuirlo a terzi senza la sua autorizzazione.						