

POLITECNICO DI MILANO  
Facoltà di ingegneria dell'Informazione  
Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica



# MISURATORE OTTICO DI LIVELLO PER FLEBOCLISI

---

**Relatore: Prof. Norgia Michele**

**Tesi di Laurea di  
Pirri Valentina  
Matr: 707698**

**Anno Accademico 2009-2010**



# *INDICE*

<b>ABSTRACT .....</b>	<b>5</b>
<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>6</b>
<b>CAPITOLO 1 – LA RADIAZIONE LUMINOSA:</b>	
<b>RIFLESSIONE E RIFRAZIONE.....</b>	<b>9</b>
1.1 LA RADIAZIONE LUMINOSA.....	9
1.2 RIFLESSIONE E RIFRAZIONE.....	11
<b>CAPITOLO 2 – SORGENTE LUMINOSA.....</b>	<b>13</b>
2.1 DIODI A EMISSIONE LUMINOSA: I LED.....	13
2.2 ASTABILE COMMERCIALE NE555.....	18
2.3 STADIO DI POTENZA.....	23
<b>CAPITOLO 3 – SISTEMA DI RILEVAZIONE DELLA LUCE.....</b>	<b>26</b>
3.1 FOTODIODI PIN.....	26
3.2 FILTRO PASSA ALTO.....	32
3.3 STADIO AMPLIFICANTE E ALLUNGATORE DI PICCO.....	37
3.4 FILTRO PASSA BASSO.....	40
3.5 CONFIGURAZIONE FINALE.....	44
<b>CAPITOLO 4 – CONFIGURAZIONE FLEBO, TARATURA E MISURE.....</b>	<b>46</b>
4.1 CONFIGURAZIONE DELLA FLEBO.....	47
4.2 ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DEI SEGNALI.....	52

---

4.3 TARATURA DELLO STRUMENTO.....	56
<b>CAPITOLO 5 - ELABORAZIONE FINALE E REIEZIONE AI DISTURBI.....</b>	<b>63</b>
5.1 PROGRAMMA LABVIEW FINALE.....	64
5.2 REIEZIONE AI DISTURBI.....	68
<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>76</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>77</b>
<b>RINGRAZIAMENTI.....</b>	<b>78</b>

## *Abstract*

La fleboclisi, comunemente detta flebo, è un dispositivo medico per la somministrazione di medicinali o altro, costituito da un flacone, un deflussore e un ago, collegati.

La parte di interesse della fleboclisi per lo studio eseguito è il deflussore. Il deflussore è un tubo composto di vetro o di plastica che viene collegato al flacone pieno che si vuole somministrare alla persona collegandolo poi alla vena.

Lo scopo del lavoro è la progettazione e la realizzazione di uno strumento di misura per il livello del liquido all'interno del deflussore, in modo tale da poter visualizzare istante per istante l'altezza del liquido all'interno del contenitore e controllare in questo modo l'esatto funzionamento della flebo. Tale strumento di misura è stato realizzato sfruttando i fenomeni fisici dell'ottica, una fonte di luce e due fotorivelatori. La sorgente del fascio luminoso che è stata scelta è un LED ad alta luminosità posizionato nell'angolo in basso del contenitore, i due fotodiodi vengono invece posizionati sulla parete opposta al LED. Il fascio di luce emesso andrà ad incidere sull'interfaccia liquido/aria e verrà riflesso e rifratto andando a colpire i due fotodiodi posti di fronte. La quantità di fotoni che incide sulla superficie fotosensibile dei due fotodiodi varia in funzione dell'altezza del liquido generando così un segnale che dipende dal livello del liquido.

# *Introduzione*

Lo studio svolto in questa tesi è stato effettuato ai fini della progettazione e della realizzazione di un sensore ottico che misuri il livello del liquido presente all'interno del deflussore di una fleboclisi. La specifica imposta dal costruttore è appunto la costruzione di un misuratore ottico che sfrutta una sorgente luminosa, rivelatori ottici e l'uso delle proprietà della luce. È inoltre richiesto che la soluzione risponda a requisiti di economicità e di robustezza; questi ultimi hanno spinto all'uso di un diodo a emissione luminosa, il LED, come sorgente. L'intero sistema deve essere portatile, cioè alimentato con le normali batterie stilo; a tale scopo è necessario il minimo dispendio in termini di potenza. Si è perciò scelta un'alimentazione di 3V DC.

Il dispositivo funziona direzionando il fascio luminoso emesso dal LED, opportunamente pilotato e posto al di sotto del deflussore, verso due fotorivelatori posti sulla parete opposta al LED.

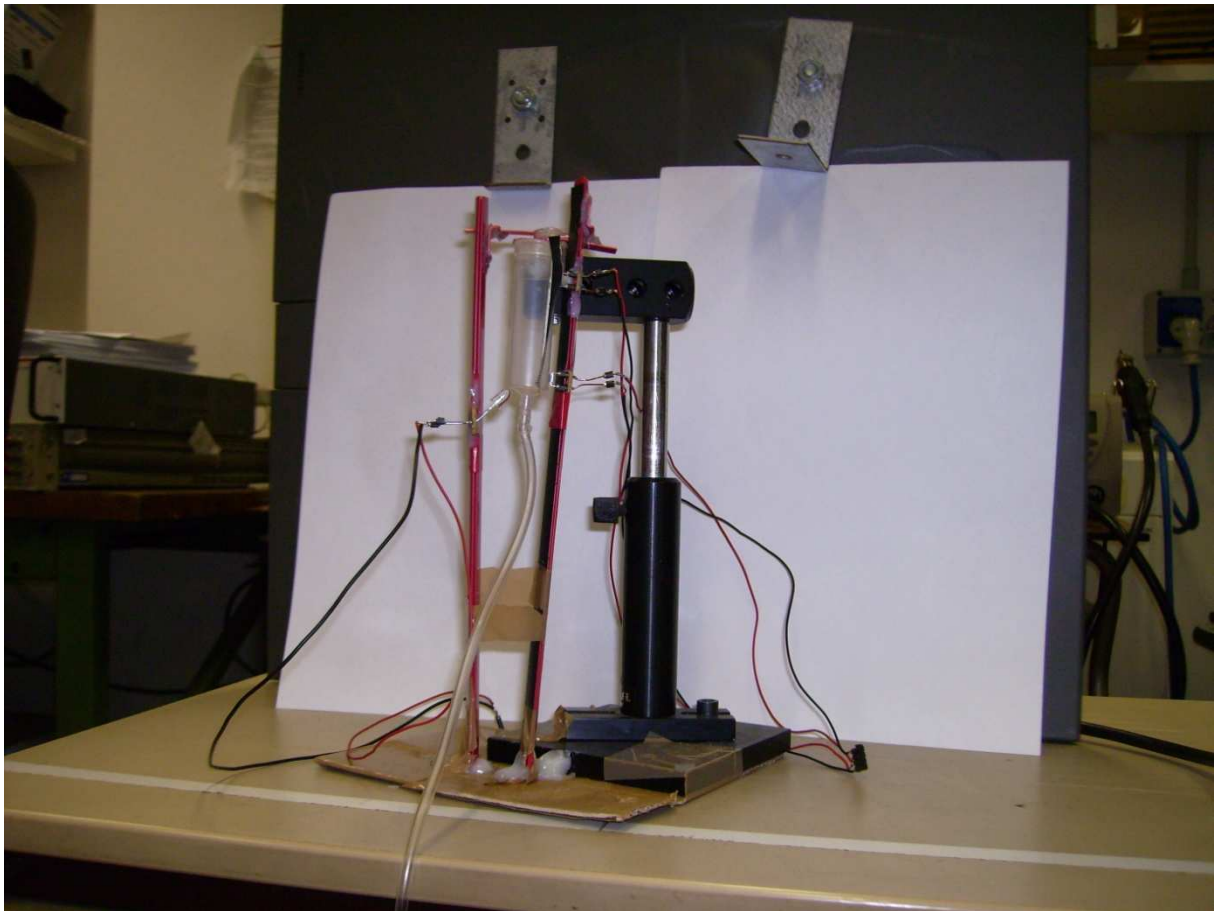
Il fascio luminoso attraverserà il liquido e, incidendo sull'interfaccia di separazione dei due mezzi aria/liquido o viceversa, verrà riflesso o rifratto seguendo la legge della riflessione e la legge di Snell.

Secondo l'altezza a cui si trova il liquido, più o meno fotoni raggiungeranno la superficie dei due fotorivelatori, generando così una corrente proporzionale ai fotoni assorbiti. I due segnali generati, opportunamente trattati, vengono acquisiti tramite una scheda di acquisizione, DAQ, e il rapporto tra la differenza dei due segnali e la loro somma viene visualizzata a schermo come indice di livello.

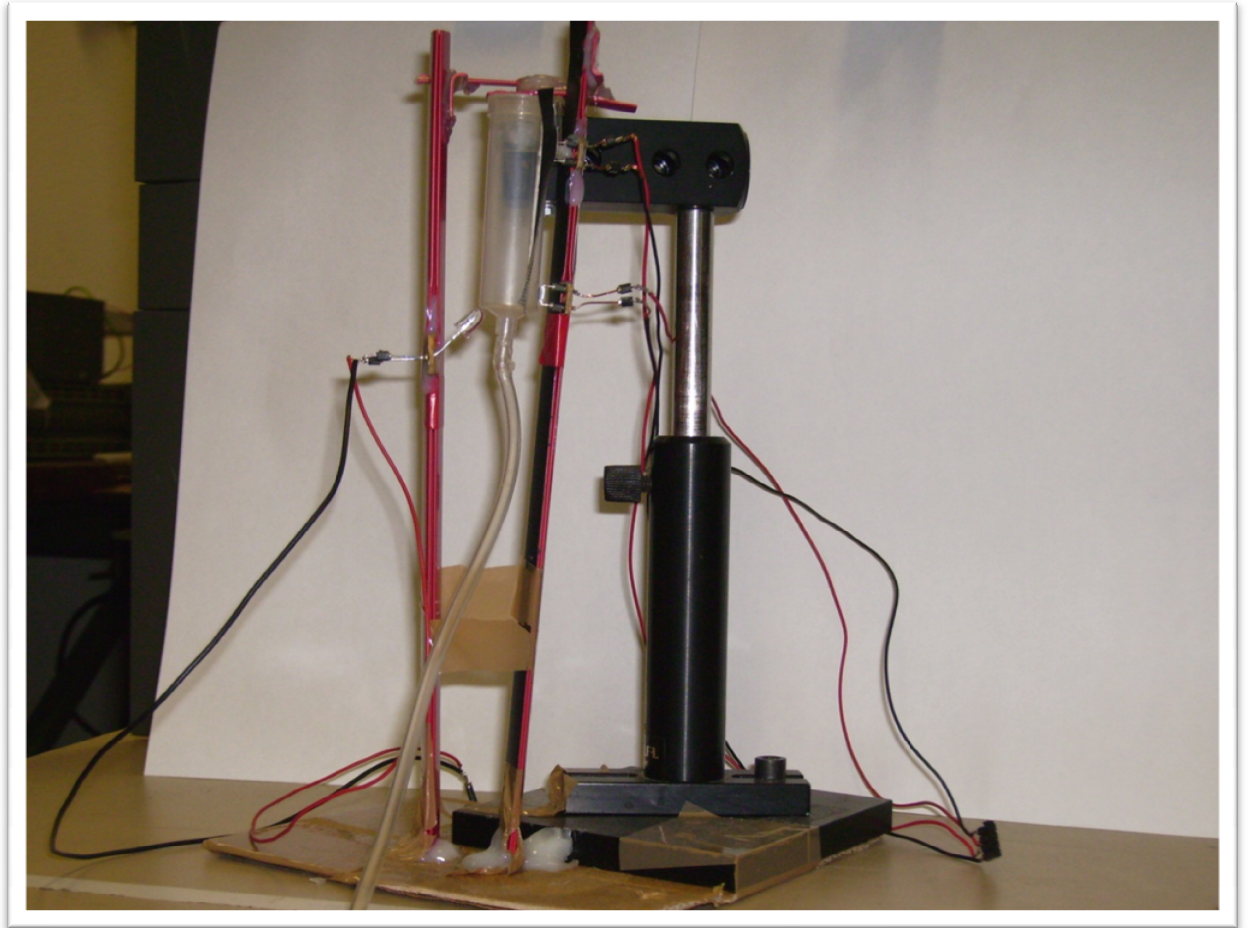
Ultimo passo è stato la taratura dello strumento.

Il lavoro è stato articolato in questo modo: prima di tutto ci si è occupati delle proprietà della luce e i principi su cui si fondano i fenomeni di riflessione e di rifrazione; poi si è passati alla trattazione e alla progettazione del circuito di pilotaggio del LED, soffermandoci sulla teoria che sta alla base di un diodo a emissione luminosa; successivamente si è parlato del circuito di lettura del segnale, esaminando anche qui la teoria alla base di un fotorivelatore ; in seguito è stato descritto il procedimento mediante il quale è stato effettivamente progettato e costruito il misuratore di livello. Altri dispositivi elettronici utilizzati sono poi descritti nel corso della trattazione.

Nelle seguenti figure è mostrato il misuratore ottico realizzato nel laboratorio di misure.



**FIG. 1 MISURATORE OTTICO DI LIVELLO**



**FIG. 2 MISURATORE OTTICO DI LIVELLO**



# *Radiazione luminosa: Riflessione e Rifrazione*

Prima che ci si addentri in un'analisi puntuale dell'apparato sperimentale progettato e studiato, è bene soffermarsi su alcuni principi teorici che ne stanno alla base. Poiché il progetto del sistema di misura è basato sui fenomeni di riflessione, rifrazione e diffusione della luce che avvengono a seguito dell'interazione di questa con la soluzione fisiologica all'interno del deflussore di una flebo è opportuno spendere due parole sulla luce.

## **1.1 La radiazione luminosa**

La radiazione luminosa può essere trattata come una radiazione elettromagnetica che è un fenomeno ondulatorio dato dalla propagazione nello spazio del campo elettromagnetico. Si tratta della propagazione contemporanea di un campo elettrico e di un campo magnetico, oscillanti in piani tra loro ortogonali. La radiazione elettromagnetica si propaga in direzione ortogonale ai due campi. Essa viaggia nel vuoto alla velocità  $c = 3 \times 10^8 m/s$ .

Le onde elettromagnetiche sono descritte dalle *equazioni delle onde*:

$$\nabla^2(E, H) = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial}{\partial t^2}(E, H)$$

Questa è la relazione fondamentale che regola l'evoluzione spaziale e temporale del campo elettromagnetico in un mezzo lineare, omogeneo e isotropo.

I parametri che caratterizzano le radiazioni elettromagnetiche sono:

- **Lunghezza d'onda ( $\lambda$ )**, ovvero lo spazio percorso da un'onda per compiere un'oscillazione completa. Essa viene definita anche come distanza tra due creste vicine;
- **Frequenza ( $\nu$ )**, ovvero il numero di oscillazioni nell'unità di tempo;
- **Periodo ( $T$ )**, ovvero l'intervallo di tempo che intercorre tra due passaggi consecutivi della cresta in uno stesso punto;
- **Velocità dell'onda nel mezzo ( $v$ )**, velocità con cui si propaga l'onda in un mezzo calcolabile come:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0}}$$

in cui  $\epsilon_0$  è la costante dielettrica nel vuoto,  $\epsilon_r$  è la costante dielettrica del materiale in questione e  $\mu_0$  è la permeabilità magnetica del vuoto. Essendo  $\epsilon_{r,vuoto} = 1$  e  $\epsilon_r > 1$  ne consegue che l'onda che viaggia in un materiale acquista una velocità sempre minore di quella rispetto al caso in cui il mezzo è il vuoto.

Si definisce **indice di rifrazione** di un mezzo, indicato con la lettera  $n$ , il rapporto tra la velocità della luce nel vuoto e la velocità dell'onda elettromagnetica nel mezzo stesso:

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon_r}$$

## 1.2 Riflessione e Rifrazione

I fenomeni di riflessione e di rifrazione si verificano ogni qual volta che un raggio luminoso si propaga in un mezzo con indice di rifrazione  $n_1$  ed incide in un altro mezzo con indice di rifrazione  $n_2$  diverso: parte della luce viene riflessa nel primo mezzo e parte può essere trasmessa nel secondo mezzo come indicato in figura 1.1

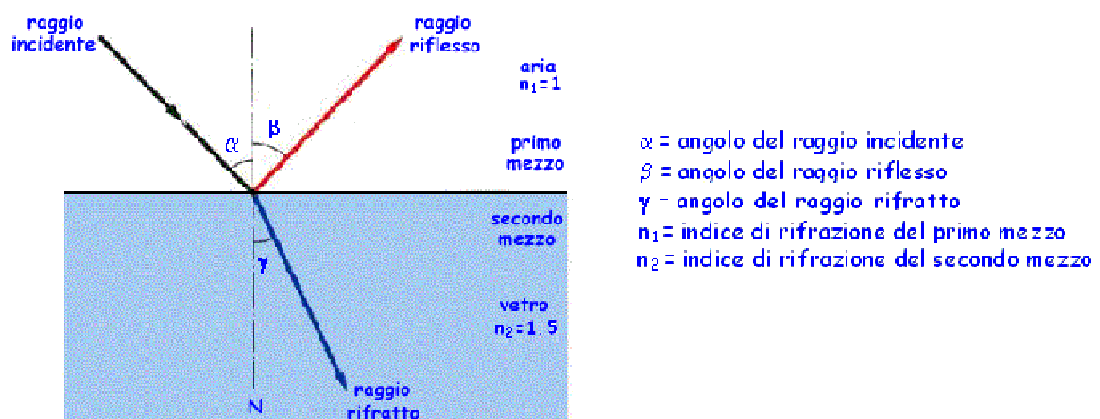


FIG. 3.1 FENOMENI DI RIFLESSIONE E RIFRAZIONE DELLA LUCE

Per la legge di conservazione dell'energia la somma delle quantità di energia rispettivamente assorbita, riflessa e trasmessa è uguale alla quantità di energia incidente. I due fenomeni sono descritti dalla legge della riflessione e dalla legge di Snell. La prima dice che il raggio incidente e il raggio riflesso giacciono sullo stesso piano e che l'angolo del raggio incidente e l'angolo del raggio riflesso sono equivalenti. La legge di Snell descrive invece il fenomeno della rifrazione ed esprime la seguente relazione:

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$$

Dove  $n_1$  e  $n_2$  sono rispettivamente gli indici di rifrazione del primo e del secondo mezzo,  $\theta_1$  e  $\theta_2$  i rispettivi angoli formati fra il raggio luminoso e la normale del punto di incidenza.

Risulta dunque che un raggio che passa da un mezzo di indice di rifrazione più basso ad uno di indice maggiore tende ad avvicinarsi alla normale.

# *Sorgente luminosa*

Nel presente capitolo si fornisce una precisa descrizione del circuito che genera il fascio di luce. Tale blocco di generazione è costituito da un led pilotato, in regime impulsato, da un circuito integrato, l'NE555 e dallo stadio in potenza che alimenta la sorgente luminosa.

## **2.1 Diodi a emissione luminosa: i LED**

Il termine LED è un acronimo che sta per “Light Emitting Diode”, ovvero un diodo che emette luce. I Led infatti sono costituiti da una giunzione P-N realizzata con materiali a gap diretto ( come ad esempio l'arseniuro di gallio, GaAs) in grado di emettere radiazioni luminose quando vengono polarizzati direttamente. Il funzionamento del LED si basa sul fenomeno detto **elettroluminescenza**, dovuto all' emissione di fotoni (nella banda del visibile) prodotti dalla ricombinazione degli elettroni e delle lacune poiché la giunzione è polarizzata in diretta.

La giunzione pn è formata da un materiale semiconduttore di tipo p posto a stretto contatto con un materiale semiconduttore di tipo n. Poiché la concentrazione delle lacune è elevata nella regione p e bassa nella regione n,esse diffondono attraverso la giunzione dal lato p verso il lato n; allo stesso modo gli elettroni diffondono attraverso la giunzione dal lato n verso il lato p. Queste due componenti di

corrente si sommano per formare la corrente di diffusione  $I_D$ , la cui direzione va dal lato p al lato n, come mostrato in Fig. 2.1

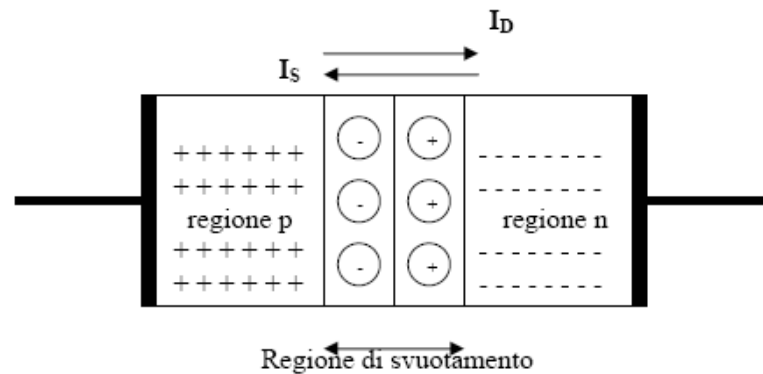


FIG. 4.1 GIUNZIONE PN

Le lacune che diffondono attraverso la giunzione verso il lato n si ricombinano rapidamente con gli elettroni, presenti in maggioranza da quel lato e scompaiono. Il processo di ricombinazione porta alla scomparsa di un certo numero di elettroni liberi dal materiale di tipo n. Dal momento che la ricombinazione avviene nei pressi della giunzione, ci sarà una regione che risulterà svuotata di elettroni liberi. Gli elettroni che diffondono attraverso la giunzione verso la regione di tipo p si ricombinano velocemente con le lacune e scompaiono. Ciò comporta anche la scomparsa di un certo numero di lacune facendo sì che altrettante cariche fisse negative risultino non compensate. Ne consegue che, nel materiale di tipo p nei pressi della giunzione, ci sarà una regione svuotata di lacune e contenente cariche fisse negative non compensate.

Da quanto detto ne consegue che da entrambi i lati della giunzione esisterà una **regione svuotata di cariche**, con il lato n di questa regione carico positivamente ed il lato p carico negativamente. Questa regione svuotata di cariche o semplicemente **regione di svuotamento** è anche detta **regione di carica spaziale**. Le cariche sui due lati della regione di svuotamento provocano la nascita di un campo elettrico ai suoi capi; qui esiste dunque una differenza di potenziale con il lato n ad una tensione

positiva rispetto al lato p. Il campo elettrico dunque si oppone alla diffusione delle lacune verso il lato n e degli elettroni verso il lato p. Infatti la differenza di potenziale ai capi della regione di svuotamento agisce come una barriera che deve essere superata dalle lacune per diffondere verso il lato n e dagli elettroni per diffondere verso il lato p.

Oltre alla componente di corrente  $I_D$  dovuta alla diffusione dei portatori maggioritari, esiste una componente dovuta al *drift* dei portatori minoritari attraverso la giunzione. In particolare alcune delle lacune generate termicamente nel materiale di tipo n diffondono attraverso il materiale di tipo n verso il confine della regione di svuotamento. Lì esse subiscono l'effetto del campo elettrico esistente nella regione di svuotamento che le spinge verso il lato p. Allo stesso modo alcuni degli elettroni generati termicamente nel lato p diffondono verso il confine della regione di svuotamento e vengono spinti dal campo elettrico verso il lato n. Queste due componenti di corrente, gli elettroni che si muovono per drift (cioè per effetto del campo elettrico) dal lato p verso il lato n e le lacune che si muovono per drift da n a p, si sommano per formare la corrente di drift  $I_S$ .

Quando alla giunzione non c'è tensione esterna applicata, si può mostrare che la tensione  $V_0$  detta **tensione di built-in** della giunzione pn è data da

$$V_0 = V_T \ln \left( \frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$$

Dove  $N_A$  e  $N_D$  sono rispettivamente le concentrazioni dei droganti nel lato p e nel lato n della giunzione. Quindi  $V_0$  dipende sia dalla concentrazione dei droganti che dalla temperatura.

Dal momento che di solito i drogaggi non sono uguali nel lato p e nel lato n, l'ampiezza della regione di svuotamento non sarà uguale sui due lati. Infatti, perché risulti non compensata la stessa quantità di carica, la regione di svuotamento deve estendersi più in profondità nel materiale drogato più

debolmente. In particolare se si indica con  $x_p$  l'ampiezza della regione di svuotamento nel lato p e con  $x_n$  quella nel lato n, l'espressione dell'ampiezza della regione di svuotamento  $W_{dep}$  è data da

$$W_{dep} = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q} \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) V_0}$$

Dove  $\varepsilon_s$  rappresenta la permittività elettrica del silicio.

Se alimentiamo la giunzione pn con un generatore di tensione V nella direzione diretta come mostrato in Figura 2.2 ciò comporta che i portatori maggioritari vengono forniti dal circuito esterno ad entrambi i lati della giunzione: lacune al materiale p ed elettroni al materiale n. Questi portatori maggioritari neutralizzeranno alcune delle cariche fisse non compensate, provocando la diminuzione della carica immagazzinata nella regione di svuotamento. Di conseguenza la regione di svuotamento si restringe e la barriera di potenziale si riduce. La riduzione della barriera di potenziale permette ad un maggior numero di lacune di attraversare la barriera dal lato p verso il lato n e ad un maggior numero di elettroni di attraversare la barriera dal lato n verso il lato p.

A causa della barriera di potenziale o, alternativamente, a causa della caduta di tensione diretta V, lacune vengono iniettate attraverso la giunzione nel lato n e elettroni vengono iniettati attraverso la giunzione nel lato p. Le lacune iniettate nella regione n provocano l'incremento della concentrazione dei portatori minoritari  $p_n$  al di sopra del loro valore di equilibrio  $p_{n0}$ . La concentrazione in eccesso  $(p_n - p_{n0})$  è più alta in prossimità del confine della regione di svuotamento, decresce esponenzialmente allontanandosi dalla giunzione e infine si annulla. Affermazioni simili possono essere fatte per gli elettroni minoritari nel lato p.



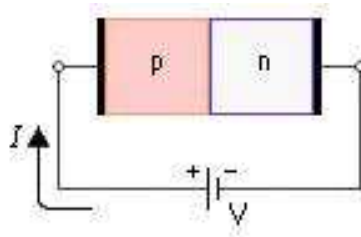


FIG. 2.2 GIUNZIONE PN POLARIZZATA IN DIRETTA

Quando i portatori minoritari diffondono e si ricombinano con i portatori maggioritari, tale ricombinazione nei semiconduttori a gap diretto provoca l'emissione di un fotone ossia di luce. Da un punto di vista energetico possiamo dire che quando un elettrone libero che si trova a livello energetico della banda di conduzione si ricombina con una lacuna posta a livello energetico della banda di valenza, ossia quando un elettrone decade dalla banda di conduzione a quella di valenza, emette un fotone con energia pari al gap del semiconduttore .

L'energia dei fotoni emessi dipende però sia dal gap energetico del materiale sia dalla distribuzione energetica degli elettroni in banda di conduzione e delle lacune in banda di valenza. La concentrazione di questi ultimi in funzione dell'energia è rappresentabile tramite una curva non simmetrica, che presenta il massimo situato a  $E_c + \frac{1}{2}kT$  per gli elettroni (dove  $E_c$  è il livello energetico della banda di conduzione), e  $E_v - \frac{1}{2}kT$  per le lacune (dove  $E_v$  è il livello energetico della banda di valenza). Una prima conseguenza di questo fatto è che esistono più transizioni possibili tra elettroni e lacune, quindi il salto energetico non è sempre lo stesso. Dunque l'intensità dei fotoni in uscita e anche la loro lunghezza d'onda , ottenibile mediante la formula

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \Rightarrow \lambda = h \frac{c}{E}$$

non ha la forma di un impulso, ma corrisponde a una distribuzione che copre un range di energie come mostrato in Figura 2.3. E' chiaro che non sono equiprobabili tutte le transizioni tra elettroni o

lacune poste a qualsiasi livello di energia, sono più probabili quelle che coinvolgono portatori posti a livelli di energia in cui è massima la loro concentrazione. Quindi lo spettro dell'intensità di uscita che deve coprire una gamma di energie (o lunghezze d'onda), avrà un picco in corrispondenza della transizione più probabile, mentre decrescerà nell'allontanarsi da tale valore. L'uscita del dispositivo non è dunque monocromatica ma comprende un insieme di lunghezze d'onda.

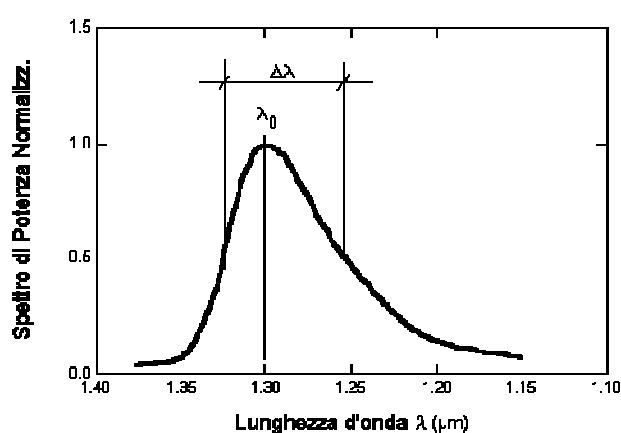


FIG. 2.3 SPETTRO DI EMISSIONE DI UN LED IN FUNZIONE DI  $\lambda$

## 2.2 Astabile Commerciale NE555

L'idea è quella di comandare l'interruttore di accensione del LED attraverso un generatore di onda quadra, in modo tale da far lavorare il LED in regime impulsato anziché continuo per ridurre i consumi. Considerando un singolo periodo  $T$  di funzionamento del LED e indicando con  $T_{on}$  il tempo in cui questo risulta acceso, si definisce il duty cycle  $D$

$$D = \frac{T_{on}}{T}$$

L' NE555 è un circuito integrato che contiene un multivibratore che può essere configurato come monostabile (timer), come astabile (oscillatore) e come bistabile (flip-flop) permettendo la realizzazione di diverse applicazioni. In Figura 2.4 è mostrato lo schema interno dell'NE555.

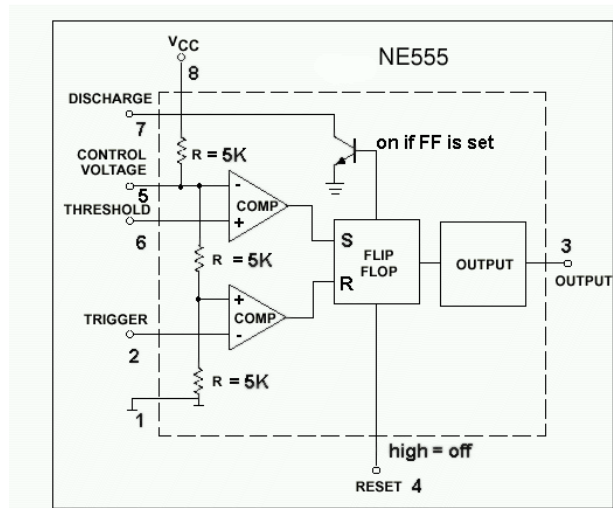


FIG. 2.4 SCHEMA INTERNO DELL'NE555

Lo schema interno dell'NE555 mostra un partitore di tensione composto da tre resistenze di  $5K\Omega$  ciascuna che generano le tensioni  $\frac{1}{3}V_{cc}$  e  $\frac{2}{3}V_{cc}$  (dove  $V_{cc}$  è la tensione di alimentazione). Ai capi delle resistenze sono collegati gli ingressi (invertente e non invertente) di due amplificatori operazionali, che fungono da comparatori, gli altri ingressi degli operazionali sono collegati ai piedini dell'integrato e possono essere connessi a piacimento a seconda della funzione che si vuole realizzare. Le uscite degli operazionali sono collegate al Set ed al Reset di un flip-flop S-R. L'uscita Q, amplificata da uno stadio di potenza che è in grado di fornire una sufficiente corrente, viene trasferita all'esterno dell'integrato tramite il piedino di uscita. L'uscita negata del flip-flop è connessa alla base di un BJT il cui emettitore è a massa, mentre il suo collettore è connesso ad un piedino per portarlo all'esterno.

---

Il flip-flop è un circuito bistabile in cui le due uscite Q e  $\bar{Q}$  nello stato di set corrispondono: Q “alta” (cioè alla tensione di alimentazione) e  $\bar{Q}$  “bassa” (cioè a 0V); nell’altro stato stabile, detto di reset, Q è bassa mentre  $\bar{Q}$  è alta. Il terminale di ingresso positivo del comparatore 1 (quello superiore) è collegato ad un terminale esterno etichettato *soglia*, il terminale di ingresso negativo del comparatore 2 (quello inferiore) è collegato ad un terminale esterno detto *trigger*.

Se la tensione all’ingresso del trigger è inferiore a  $\frac{1}{3}V_{CC}$  e contemporaneamente la tensione di soglia è inferiore a  $\frac{2}{3}V_{CC}$ , l’NE555 presenta l’uscita allo stato alto ed il BJT è interdetto. Se invece la tensione di soglia è superiore ai due terzi della tensione di alimentazione e quella di trigger è contemporaneamente maggiore di un terzo delle stessa, l’uscita allora scende allo stato basso e il transistore si accende. Le altre configurazioni possibili degli ingressi sono:  $V_{trigger} > \frac{1}{3}V_{CC}$  e  $V_{threshold} < \frac{2}{3}V_{CC}$ , non produce effetti e lascia il timer nella condizione precedente (stato di memoria); e  $V_{trigger} < \frac{1}{3}V_{CC}$  e  $V_{threshold} > \frac{2}{3}V_{CC}$ , questa configurazione non è operativa e quindi da evitare.

L’applicazione voluta nel progetto è quella di un comportamento astabile del circuito in modo da ottenere in uscita un onda quadra con duty-cycle programmabile.

La configurazione utilizzata, mostrata in Figura 2.5, fa sì che l’andamento del segnale in uscita dall’integrato dipenda dalle costanti di tempo con cui avvengono la carica e la scarica del condensatore C.

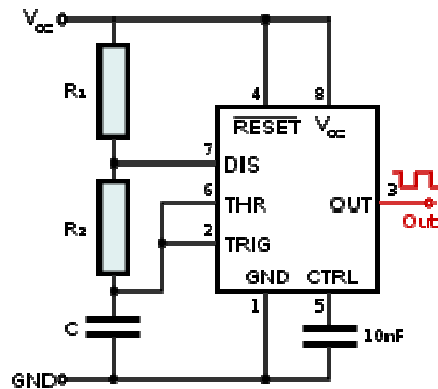


FIG. 2.5 CONFIGURAZIONE CIRCUITALE UTILIZZATA DEL NE555

All'accensione il condensatore C è scarico, essendo la tensione al terminale trigger e quella di soglia inferiori a un terzo di  $V_{cc}$ , l'uscita va alta e il BJT è spento: il condensatore incomincia a caricarsi tendendo al valore dell'alimentazione con costante di tempo dato da

$$\tau = (R_1 + R_2)C$$

quando però  $V_C = \frac{2}{3} V_{cc}$  si attiva la soglia che porta l'uscita del flip-flop bassa e il BJT si accende. Il condensatore C perciò si scarica su  $R_2$  e sul BJT (che presenta una resistenza trascurabile) con costante di tempo  $\tau$  data da

$$\tau = R_2C$$

Quando la tensione su condensatore C giunge a un terzo dell'alimentazione il trigger,attivandosi, riporta l'NE555 nella condizione iniziale e il ciclo riprende.

Per calcolare i periodi e le frequenze di oscillazione è possibile rifarsi all'andamento esponenziale della tensione sul condensatore. Tali dati sono indicati anche nel data sheet, dal quale si ottiene che il tempo  $t_1$ , ossia il periodo in cui l'uscita dell'NE555 rimane alta è pari a

$$t_1 = 0.693(R_1 + R_2)C$$

Mentre il tempo  $t_2$  in cui l'onda quadra di uscita rimane a livello basso è dato da

$$t_2 = 0.693R_2C$$

Il duty.cycle dell'onda quadra in uscita può essere ricavato dalla relazione:

$$D = \frac{t_1}{T} = \frac{t_1}{t_1 + t_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + 2R_2}$$

Come interruttore a cui si fornisce in ingresso l'onda quadra si utilizza un transistor a giunzione bipolare, BJT, che consente o meno il passaggio di corrente a seconda della tensione applicata alla sua base e va a pilotare il LED. Per diminuire il più possibile la potenza dissipata si è cercato di realizzare un circuito in cui il rapporto tra il tempo di accensione del LED e il periodo totale dell'onda sia di circa del 1%. Ecco perché si è deciso di utilizzare un BJT pnp che si trova in zona di conduzione (e quindi fa accendere il LED) quando la tensione applicata alla sua base è a livello basso, mentre non conduce (e quindi il LED è spento) quando la tensione in base è a livello alto.

Volendo rispettare le specifiche si devono dimensionare le resistenze  $R_1, R_2$  e il condensatore  $C$  per ottenere un rapporto tra tempo di accensione del LED e periodo dell'onda quadra pari a circa 1% e dunque porre un duty-cycle all'NE555 pari al 99% (ovvero il rapporto tra il periodo in cui l'onda quadra è alta e il periodo totale dell'onda); in tal modo il BJT si troverà in stato di conduzione per solo l'1% del periodo.

Si è deciso inoltre di lavorare ad una frequenza non troppo elevata di circa  $f = 1.38kHz$  sempre con l'obiettivo di avere uno strumento che dissipi poca potenza; ma al tempo stesso ad una frequenza che, come vedremo successivamente, ci permetta di poter filtrare il segnale eliminando le componenti della luce naturale che si trovano a bassa frequenza.

Si sono perciò scelti i seguenti componenti da collegare al circuito in Figura 2.5

$$R_1 = 15k\Omega$$

$$R_2 = 150\Omega$$

$$C = 68nF$$

In tal modo si sono ottenuti i seguenti valori

$$t_1 = 0.693(R_1 + R_2)C = 714\mu s$$

$$t_2 = 0.693R_2C = 7.068\mu s$$

$$T = t_1 + t_2 = 721\mu s \Rightarrow f = \frac{1}{T} = 1.38kHz$$

$$D = \frac{t_1}{T} = 0.99 \Rightarrow \frac{t_2}{T} \cong 1\%$$

### 2.3 Stadio di potenza

Il circuito collegato all'uscita dell'NE555 è stato progettato come indica la Figura 2.6: l'onda all'uscita dall'oscillatore viene fornita in ingresso, attraverso una resistenza  $R_A = 15k\Omega$ , al transistor pnp.

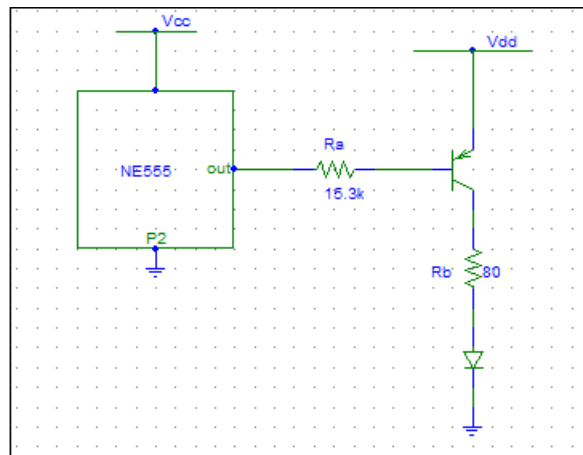


FIG. 2.6 CIRCUITO DI PILOTAGGIO DEL LED

Il transistore si accende quando l'uscita dell'NE555 si trova a livello basso, quindi inizia a scorrere una corrente nella base del transistore  $i_B$ . Poiché il BJT deve fungere da interruttore, la regione di funzionamento è quella di saturazione dove la relazione  $i_C = \beta i_B$  non è più valida. Dal momento che il valore di  $i_C$  viene da noi stabilito (come si vedrà in seguito), si dice che un transistore in saturazione lavora con un  $\beta$  forzato dato da  $\beta = \frac{i_C}{i_B}$ . La corrente di collettore attraversa la resistenza  $R_b$  e infine il LED accendendolo ad una frequenza  $f = 1.38kHz$ . Per il tipo di transistore si è optato per il BC557B, presente già in laboratorio.

Il LED utilizzato è un LED giallo ad alta intensità. La scelta è caduta su questo tipo di LED poiché si è rivelato il più efficace rispetto agli altri ai fini della rilevazione del segnale. Dal data sheet si è appreso che il LED ha una caduta di tensione in stato di conduzione pari a  $V_d = 2V$  e viene alimentato correttamente da una corrente pari a  $i_D = i_E = 10mA$ . La base del BJT si trova a 2.3V (0.7V al di sotto della tensione di emettitore), pertanto la corrente che scorre in base è data da:

$$i_B = \frac{v_B}{R_a} = \frac{2.3V}{15.3k\Omega} = 0.15mA$$



Dato che vogliamo che sul LED cadano 2V e che il transistor venga utilizzato da interruttore per attivare o disattivare il LED e quindi che funzioni in regione di saturazione ( $\Rightarrow V_{CE} = 0.2V$ ), sulla resistenza di collettore  $R_B$  cade una tensione  $V_R = 0.8V$ , perciò il valore della resistenza  $R_B$  è stata possibile calcolarla come

$$R_B = \frac{V_R}{i_D} = \frac{0.8V}{10mA} = 80\Omega$$

# *Sistema di rilevazione della luce*

Lo stadio di rilevazione della luce e di elaborazione del segnale deve essere particolarmente curato affinché vengano eliminate le componenti del segnale non desiderate, come ad esempio la luce ambiente.

Il sistema di ricezione è formato da un primo stadio, responsabile della rilevazione del segnale luminoso proveniente dal LED, realizzato tramite due fotodiodi; segue un secondo stadio responsabile della trattazione del segnale, composto da un filtro passa alto, un amplificatore, un allungatore di picco e un filtro passa basso. Quest'ultima parte si occupa di ottenere in uscita un segnale costante da inviare alla scheda di acquisizione.

## **3.1 Fotodiodo PIN**

Per quanto riguarda la rilevazione del segnale emesso dal LED operante a circa 1.38kHz, si è utilizzato un semplice circuito di lettura costituito dal fotodiodo, polarizzato in inversa, alimentato dalla batteria a tensione continua (3V) al cui anodo è stato collegato un resistore. Il fotodiodo utilizzato è un PIN con codice BPW34S, che presenta una responsività pari al 60% alle lunghezze d'onda comprese tra i 600nm e i 700nm.

La struttura base di un fotorivelatore integrato è una giunzione pn, la quale viene però utilizzata in modo sostanzialmente diverso rispetto ai LED. Infatti per rivelare la potenza ottica che incide sul fotorivelatore si utilizza una giunzione polarizzata in inversa: il segnale ottico assorbito nel materiale genera coppie di elettrone/lacune che all'interno della zona di carica spaziale, dove il campo elettrico è elevato, possono essere separate e generare così un segnale di corrente proporzionale al segnale ottico incidente.

I fotorivelatori PIN sono un'evoluzione della giunzione pn. Il loro principio di funzionamento può essere quindi illustrato partendo dal caso della semplice giunzione pn polarizzata in inversa. A seguito della polarizzazione applicata si ha una zona di carica spaziale all'interno della quale sussiste un elevato campo elettrico. Con l'assorbimento di un fotone in tale zona, con energia superiore dell'energy-gap del materiale, si viene a creare una coppia elettrone/lacuna fotogenerata. Il campo elettrico produce quindi lo spostamento dell'elettrone verso la zona quasi neutra n e lo spostamento della lacuna in direzione opposta, verso la zona quasi neutra p. Il dispositivo si comporta come un condensatore a facce piane parallele, con le armature localizzate sul bordo della zona di carica spaziale. La presenza di cariche internamente a tale regione induce delle corrispondenti cariche di segno opposto sulle "armature" di questo condensatore, ed il movimento delle cariche elettriche nella zona di carica spaziale, cambiando l'entità della carica indotta, genera una corrente elettrica. Il tempo di risposta per un elettrone generato a distanza  $x$  dalla regione quasi neutra n e che si muove con velocità  $v_e$  (velocità di deriva) è  $t = x/v_e$ . Espressione simile varrà per la lacuna. Si noti che il tempo di risposta dipende innanzitutto dalla posizione all'interno della zona di carica spaziale in cui viene generata la coppia elettrone/lacuna. Il caso pessimo è quindi dato dall'eventualità che la coppia si formi proprio al bordo di tale zona, per cui uno dei due portatori dovrà percorrere un cammino pari a  $W$ , con  $W$  estensione della zona di carica spaziale. Inoltre, maggiore è la velocità di transito dei portatori, minore è il tempo di transito. In prima approssimazione la velocità di transito è dovuta all'intensità del campo elettrico che trascina i portatori stessi. Tuttavia, superato un valore di campo

---

elettrico limite,  $E_{SAT} \cong 10 \text{ kV/cm}$ , dipende dal materiale e dal tipo di portatore, la velocità dei portatori satura ad un valore limite, detta velocità saturata  $v_{SAT} = 10^7 \text{ cm/s}$ . Per poter ottenere i minori tempi di risposta del dispositivo, esso è quindi polarizzato in inversain modo che nella zona di carica spaziale il campo elettrico sia superiore a  $E_{SAT}$ . Il tempo di transito risulta quindi  $t = x/v_{SAT}$ . Bisogna inoltre tenere presente che la velocità di saturazione è differente per elettroni e lacune, e la più lenta delle due limita la risposta totale del sistema.

Le coppie fotogenerate invece nelle zone neutre non sono altrettanto utili: ad esempio l'elettrone, portatore minoritario nella zona p, una volta generato si muove qui per diffusione ed ha un'alta probabilità di ricombinarsi con una lacuna, portatore maggioritario, vanificando l'avvenuta rivelazione del fotone; né la coppia in quanto tale genera corrente esterna perché non altera la neutralità di carica. Da questo punto di vista solo le coppie prodotte nella zona p vicino alla regione di svuotamento, entro la lunghezza di diffusione dei minoritari che rappresenta il libero cammino medio percorso dal portatore prima di ricombinarsi, possono essere raccolte. Infatti se il minoritario raggiunge per diffusione il bordo della regione svuotata esso viene immediatamente risucchiato dal campo elettrico e attraversa tutta la regione sino alla zona opposta. Questo contributo di corrente, detto di "diffusione", è molto più lento di quello di "deriva", perché mette in gioco i tempi di diffusione dei minoritari.

In una semplice giunzione pn l'estensione W della zona svuotata dipende sostanzialmente dai drogaggi utilizzati e dalle polarizzazioni applicate. Inoltre per avere zone svuotate di estensione della decina di  $\mu\text{m}$  (richiesta per l'assorbimento di una frazione considerevole della radiazione incidente) le polarizzazioni inverse da applicare sono esternamente elevate. Per ovviare a tali inconvenienti si ricorre all'utilizzo di giunzioni PIN, ovvero giunzioni in cui è presente una zona di materiale intrinseco i che separa le due giunzioni drogate p ed n (in realtà la regione i è a bassissimo drogaggio p o n). Questa struttura ha il vantaggio di avere una zona di carica spaziale di dimensioni W praticamente coincidente con l'estensione della zona intrinseca, la quale sarà totalmente svuotata con una minima polarizzazione applicata. Inoltre, in tale zona, il campo elettrico è pressoché costante e, scegliendo

opportunamente la tensione inversa da applicare, è possibile avere un campo elettrico superiore al valore di saturazione all'interno di tutta la zona svuotata.

Uno dei parametri caratteristici del fotorivelatore PIN è la responsività del dispositivo, definita come rapporto tra la corrente fotogenerata e la potenza ottica incidente sul dispositivo ovvero:

$$\mathcal{R} = \frac{I}{P}$$

Dove la corrente fotogenerata  $I$  è legata al flusso fotonico incidente  $\Phi$  dalla relazione:

$$I = e\eta\Phi = e\eta \frac{P}{h\nu}$$

Dove  $\eta$  è l'efficienza con cui i fotoni incidenti vengono convertiti in coppie elettrone/lacune.

Sostituendo quest'ultima relazione nella precedente otteniamo che la responsività di un fotorivelatore risulta data da:

$$\mathcal{R} = \frac{e\eta}{h\nu} = \eta \frac{\lambda[\mu m]}{1.24}$$

Dove si è fatto uso della relazione  $\lambda[\mu m] = hc/h\nu = 1.24/h\nu[EV]$  che lega la lunghezza d'onda e l'energia del fotone incidente.

Nella Figura 3.1(a) è mostrata la struttura schematica di un fotodiode PIN, mentre in Figura 3.1(b) e in Figura 3.1(c) sono mostrate rispettivamente la densità di carica spaziale nel dispositivo e l'andamento del campo elettrico nelle varie regioni del fotorivelatore.

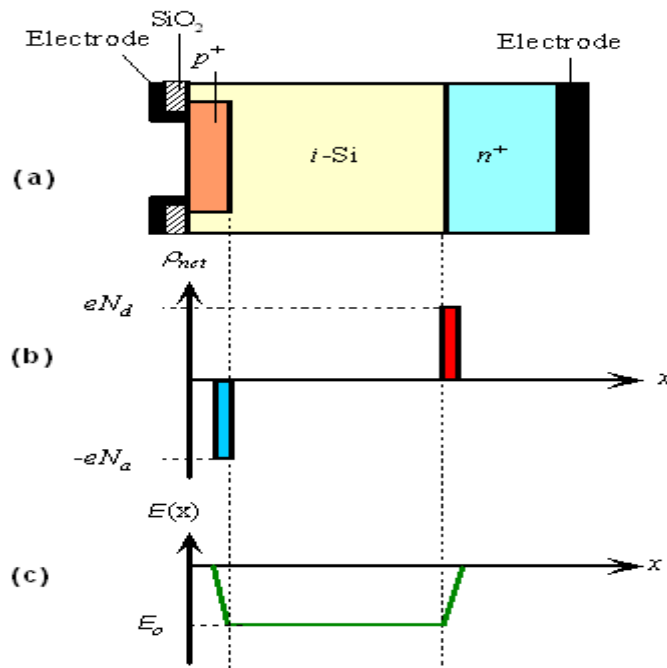


FIG. 5.1 (A) STRUTTURA SCHEMATICA DI UN FOTODIODO PIN - (B) DENSITÀ DI CARICA SPAZIALE -  
 (C) ANDAMENTO DEL CAMPO ELETTRICO

Affinché il fascio ottico generi un segnale elettrico di breve durata è necessario che i fotoni siano assorbiti nella zona di carica spaziale del dispositivo. Tuttavia i fotoni sono assorbiti anche nelle zone quasi neutre del dispositivo, per cui l'intensità ottica nel materiale ha andamento del tipo

$$I = I_0 \exp^{-\alpha x}$$

Dove  $\alpha$  è il coefficiente di assorbimento ed  $x$  rappresenta la direzione di propagazione della potenza ottica, ortogonale all'interfaccia semiconduttore/aria. Supponendo che la zona di carica spaziale si estenda tra le coordinate  $x_0$  e  $x_0 + W$ , la potenza ottica assorbita in questa regione è data dalla relazione :

$$P_{ass} = P_0 e^{-\alpha x_0} - P_0 e^{-\alpha(x_0+W)}$$

Da cui l'efficienza di assorbimento vale:

$$\eta = \frac{P_{ass}}{P_0} = e^{-\alpha x_0} (1 - e^{-\alpha W})$$

I fotoni assorbiti nelle zone quasi neutre danno invece luogo alle code di diffusione, migliorando l'efficienza di assorbimento dei fotoni e quindi la responsività del dispositivo ma solo a bassa frequenza. Questo miglioramento va però a discapito della velocità di risposta, in quanto in questo caso si deve attendere l'esaurimento delle code di diffusione, che avviene con tempi nettamente più lunghi di quelli richiesti per il solo attraversamento della zona di carica spaziale del dispositivo.

Tornando al circuito di fotorivelazione della luce, abbiamo detto che si è utilizzato un fotodiode alimentato da una batteria a tensione continua di 3V. Il fotodiode alimentato produce perciò una corrente proporzionale all'intensità luminosa che lo colpisce. Utilizzando una resistenza in serie al fotodiode, come mostrato in Figura 3.2, è possibile convertire il segnale di corrente generato in un segnale di tensione, anch'esso proporzionale all'intensità luminosa: la tensione ai capi della resistenza è quindi la variabile da elaborare.

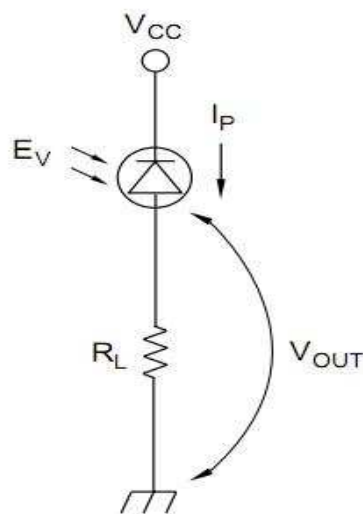


FIG. 3.2 CIRCUITO BASE PER LA FOTORIVELAZIONE

Il circuito però presentato ha la grossa limitazione dovuta al fatto che il fotodiiodo rileva qualunque tipo di frequenza incidente su di esso, anche ad esempio la luce naturale e quella emessa dalle sorgenti ad uso domestico. Ecco perché si è scelto di utilizzare un filtro passa alto.

### 3.2 Filtro passa alto

Come è stato già detto il LED opera in regime impulsato ad una frequenza di  $f = 1.38kHz$ , maggiore della frequenza della luce naturale. Per eliminare tali componenti in frequenza si è scelto di porre un filtro passa alto.

Il segnale di tensione prodotto ai capi della resistenza viene perciò filtrato passa alto, tramite un filtro passivo CR, per eliminare sia i disturbi a bassa frequenza sia quelli provenienti da altre sorgenti luminose, naturali o artificiali, come già osservato precedentemente.

In Figura 3.3 è mostrato lo schema elettrico del filtro passa alto applicato al circuito di lettura:

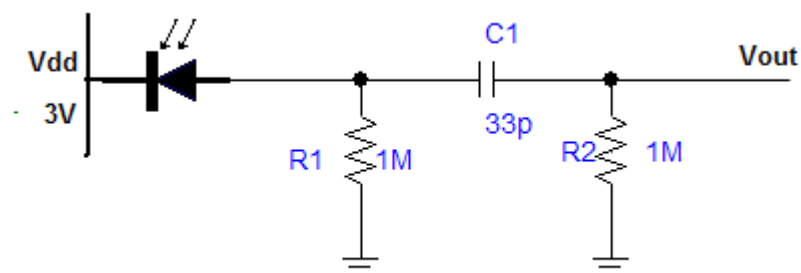


FIG. 3.3 SCHEMA ELETTRICO DEL FILTRO PASSA ALTO APPLICATO AL CIRCUITO DI LETTURA



Come abbiamo già detto, nel fotodiode, dato che la velocità del portatore è costante,  $v = v_{SAT}$ , l'impulso di corrente in uscita avrà un valore costante per tutto il tempo di transito del portatore, ed essendocene due, elettrone e lacuna, ognuno di essi dà luogo ad un impulso di corrente indotta, come mostrato in Figura 3.4

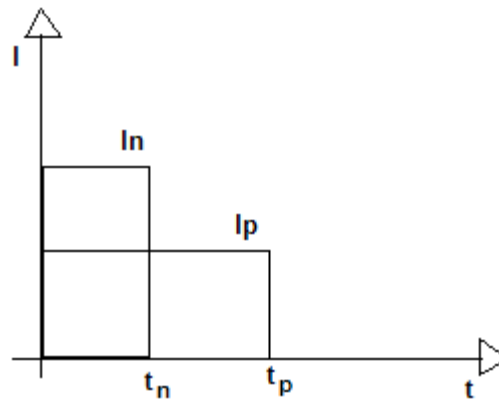


FIG. 3.4 IMPULSI DI CORRENTE PRODOTTI NEL FOTODIODO

I due impulsi di corrente hanno diversa ampiezza perché diverse sono le velocità di saturazione dell'elettrone e della lacuna, e hanno diversa durata sempre a causa della differente velocità.

Ovviamente i tempi di transito,  $t_n$  e  $t_p$  dipendono non solo dalle velocità di saturazione ma anche dalla posizione in cui la coppia elettrone lacuna viene generata. È bene sottolineare il fatto che dal punto di vista della carica indotta, il moto dell'elettrone e della lacuna equivale a quello di una sola carica che attraversa l'intera zona svuotata. Per tale motivo possiamo parlare di un impulso di corrente indotta equivalente, mostrata in Figura 3.5

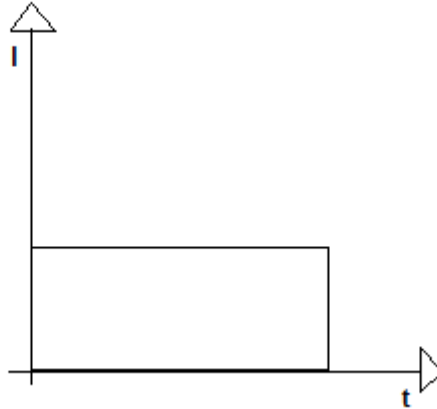


FIG.3.5 CORRENTE INDOTTA NEL FOTODIODO

Tale corrente in uscita al fotodiode scorre sul resistore  $R_1$ , come si può vedere dalla Figura 3.3, generando un segnale di tensione, che avrà la stessa forma della corrente. Il segnale infine viene filtrato passa alto.

Il filtro passa alto è un circuito elettrico che permette solo il passaggio di frequenze al di sopra di un dato valore detto *frequenza di taglio*. Quello che è stato utilizzato nel circuito è uno dei filtri passivi CR più semplici da realizzare, costituito dalla serie di un condensatore e un resistore.

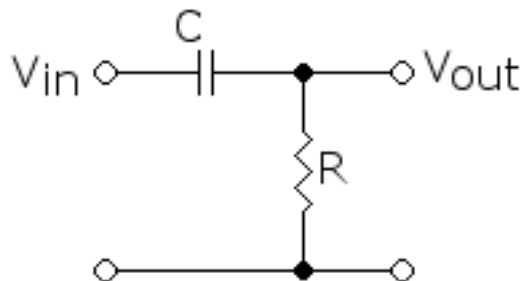


FIG. 3.6 SCHEMA DI FILTRO PASSA ALTO PASSIVO

Il segnale di uscita viene prelevato ai capi della resistenza e ha la caratteristica di far passare tutte le componenti di frequenza comprese tra la frequenza di taglio, che dipende dalle caratteristiche degli elementi, e la frequenza teoricamente infinita. Al di sotto della frequenza di taglio il filtro attenua le componenti in frequenza del segnale.

Per trovare la funzione di trasferimento di tale filtro, nel dominio della trasformata di Laplace  $H(s)$ , possiamo considerare il partitore di tensione:

$$H(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R}{R + \frac{1}{sC}} = \frac{sCR}{1 + sCR}$$

Dove il prodotto  $\tau = CR$  rappresenta la costante di tempo del filtro. Dalla  $H(s)$  risulta che il diagramma di Bode, mostrato in Figura 3.7, risulta avere una pendenza di  $20 \frac{dB}{dec}$  alle basse frequenze, dovuto allo zero nell'origine, mentre dopo l'intervento del polo a frequenza pari a

$$f_{HP} = \frac{1}{2\pi\tau}$$

segue un andamento piatto fino alle alte frequenze; una rappresentazione della funzione di trasferimento in funzione della variabile complessa  $s$  è presente in Figura 3.7

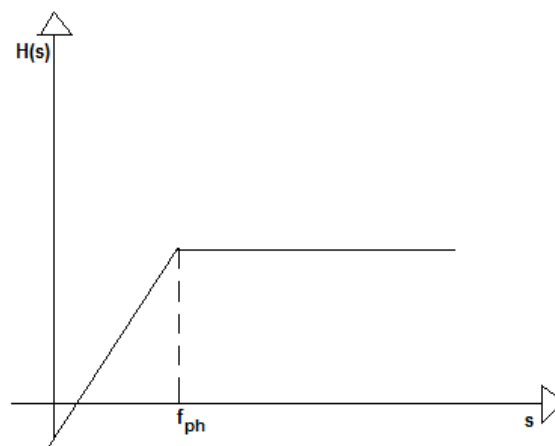
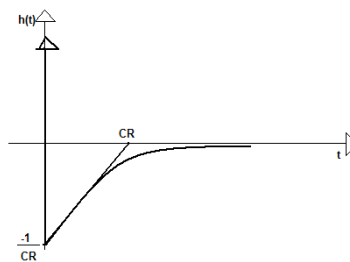


FIG. 3.7 DIAGRAMMA DI BODE DELLA FUNZIONE DI TRASFERIMENTO DI UN FILTRO PASSA ALTO

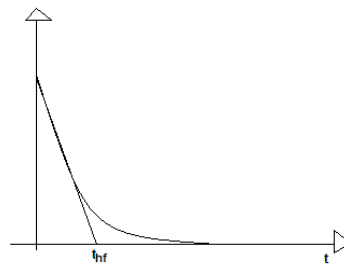
La risposta all'impulso del filtro passa alto nel dominio del tempo è invece data da:

$$h(t) = \delta(t) - \frac{1}{CR} e^{-\frac{t}{CR}} u(t)$$

In Figura 3.8 è mostrato l'andamento della funzione di trasferimento del filtro (a) e l'uscita del filtro quando all'ingresso è applicato un segnale di tensione costante (b).



**FIG. 3.8 (A) FUNZIONE DI TRASFERIMENTO  
DEL FILTRO NEL TEMPO**



**FIG. 3.8 (B) USCITA DEL FILTRO QUANDO IN INGRESSO  
È APPLICATO UN SEGNALE COSTANTE**

Potendo considerare la tensione all'uscita del fotodiodo come un impulso ed essendo interessati soltanto all'ampiezza dei fronti di salita è possibile dimensionare il filtro in modo che il taglio avvenga intorno ai 2.4kHz (nonostante la frequenza del segnale utile sia 1.38kHz), poiché come si vede dalle Figure 3.8 (a) e 3.8(b) il filtro passa alto lascia passare l'ampiezza del segnale. La frequenza di taglio del filtro è pari a

$$f_{HP} = \frac{1}{2\pi C_1(R_1 + R_2)} = 2.4kHz$$

Si utilizzano le resistenze uguali e pari a  $R_1 = R_2 = 1M\Omega$  e una capacità di  $C_1 = 33pF$ . Tenendo invece conto della capacità parassita del fotodiiodo,  $C_{ph} \cong 20pF$ , che, essendo in parallelo alla  $C_1$ , sposterà il polo leggermente più in alto in frequenza.

### 3.3 Stadio amplificante e allungatore di picco

Il segnale di uscita del filtro passa alto viene inviato ad uno stadio amplificante, realizzato con un amplificatore operazionale in configurazione non invertente come mostrato in Figura 3.9

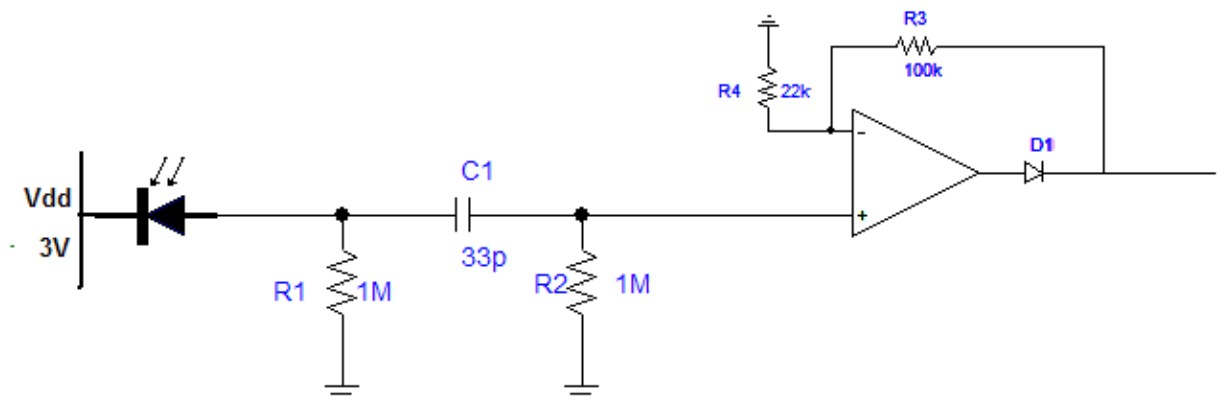


FIG. 3.9 CONFIGURAZIONE CIRCUITALE DELLO STADIO AMPLIFICANTE

L'amplificatore operazione essendo in configurazione non invertente ha guadagno costante pari a

$$G = 1 + \frac{R_3}{R_4}$$

e va dimensionato in modo che non faccia saturare l'operazionale stesso. Sperimentalmente si è trovato che il guadagno che si addiceva meglio allo strumento è  $G=5.5$ . Si è scelto di amplificare il segnale perché quello all'uscita del filtro passa alto risultava troppo piccolo per essere visualizzato, ma si è visto che un' amplificazione elevata dava in uscita un segnale troppo sporco sovrapposto da un eccessivo rumore. Stabilendo dunque un guadagno pari a  $G=5.5$  si sono utilizzate le seguenti resistenze:

$$R_3 = 100k\Omega$$

$$R_4 = 22k\Omega$$

Non essendo richieste particolari prestazioni in termini di banda e tensione di uscita, si utilizza il MCP601, prodotto da Microchip, sufficiente per gli scopi del progetto, economico e di facile reperibilità.

Il diodo D1, posto in serie all'uscita dell'amplificatore operazionale, ha il compito di disaccoppiare quest'ultimo dal condensatore  $C_2$  del circuito RC parallelo posto subito dopo lo stadio amplificante. Infatti è necessario disporre di un circuito raddrizzatore di precisione a singola semionda, costituito da un diodo che si trova nel ramo di retroazione negativa dell'amplificatore operazionale, detto *superdiodo*. Il superdiodo ha l'effetto di raddrizzare l'onda in ingresso al morsetto positivo dell'amplificatore operazionale: quando la tensione di ingresso  $V_{in}$  si trova alla sua massima ampiezza anche l'uscita dell'operazionale risulta massima e il diodo si trova in polarizzazione diretta e conduce. Quando invece la tensione di ingresso comincia a scendere il diodo risulta polarizzato in inversa e non conduce : l'operazionale viene sganciato da ciò che si trova a valle e la retroazione non è più valida.

Il segnale all'uscita dell'amplificatore operazionale è quasi impulsivo, per renderlo il più costante possibile si è scelto di introdurre un allungatore di picco seguito da un filtro passa basso.

Si vuole, come già detto, fornire in ingresso alla DAQ (scheda di acquisizione) un segnale a livello costante. Si è deciso di utilizzare a valle dell'amplificatore operazionale un circuito RC parallelo, che insieme al superdiiodo costituiscono l'*allungatore di picco*, illustrato in Figura 3.10, che ha il compito di livellare i picchi del segnale in uscita all'operazionale.

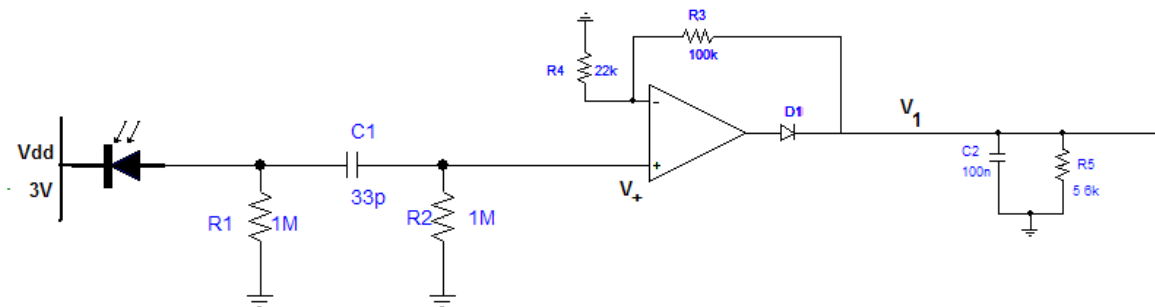


FIG. 3.10 CONFIGURAZIONE CIRCUITALE CON L'ALLUNGATORE DI PICCO

Questo circuito RC si comporta nel modo seguente: quando la tensione  $V_+$  si trova al suo massimo valore, il superdiiodo è in conduzione e la tensione  $V_1$  è massima e vale  $V_1 = G * V_+$ , il condensatore si carica istantaneamente fino al livello massimo; quando invece  $V_+$  comincia a scendere, il diodo si trova in stato di interdizione e la retroazione si sgancia e il condensatore si scarica sul parallelo delle resistenze  $R_5$  e la serie delle resistenze  $R_4$  e  $R_3$ . In tal modo la tensione di uscita  $V_1$  risulta sempre pari al valore precedente (a meno di piccole scariche del condensatore): il condensatore funge da immagazzinatore di carica quando il diodo è in funzione e cede la carica acquistata per far rimanere la tensione di uscita a un livello circa costante quando il diodo è interdetto. La costante di tempo  $\tau$  del circuito RC deve essere molto alta in modo che il condensatore, una volta caricato al valore massimo della tensione, non si scarichi e mantenga tale valore. Inoltre è necessario scegliere una costante di tempo per l'allungatore di picco non troppo grande poiché non si riuscirebbe ad inseguire le variazioni di ampiezza degli impulsi provenienti dall'uscita dell'amplificatore operazionale. La costante di tempo

di scarica di  $C_2$ , molto maggiore di quella di carica, è data da:

$$\tau = C_2(R_5 \parallel (R_3 + R_4))$$

Fissate  $R_3$  e  $R_4$  dal dimensionamento precedente e desiderando avere  $\tau \cong 0.5ms$  si scelgono:

$$R_5 = 5.6k\Omega$$

$$C_2 = 100nF$$

Con questi valori si ottiene una costante di tempo pari a  $\tau \cong 0.535ms$

### 3.4 Filtro passa basso

Infine il segnale ai capi del rivelatore di involuppo viene filtrato passa basso, tramite un circuito passivo RC, attenuando così il ripple residuo del segnale di uscita, infatti un filtro passa basso attenua le alte frequenze (quelle del rumore) ed esalta le basse frequenze.

In Figura 3.11 è mostrato il circuito completo di rilevazione del segnale.

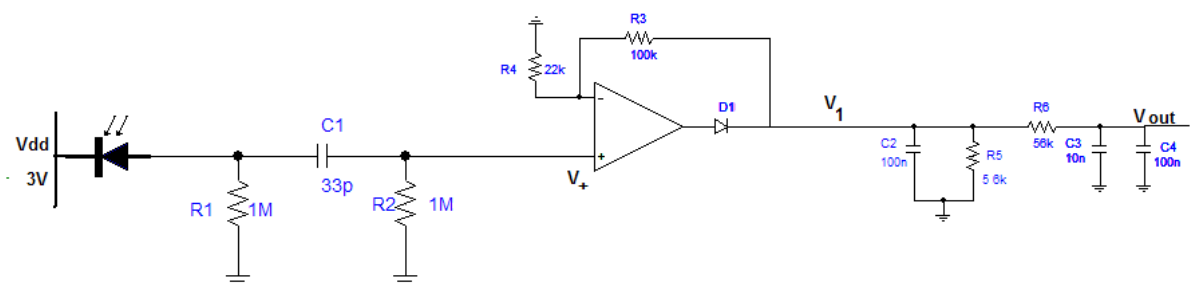


FIG. 3.11 CIRCUITO DI RILEVAZIONE DEL SEGNALE



Dunque il filtro passa basso passivo è formato dalla serie di un resistore e di un condensatore. Possiamo calcolare la funzione di trasferimento  $H_{LP}$ , nel dominio della trasformata di Laplace, sfruttando il partitore di tensione:

$$H_{LP}(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{1/sC}{R + 1/sC} = \frac{1}{1 + sCR}$$

Il diagramma di Bode, mostrato in Figura 3.12, avrà a basse frequenze un guadagno costante pari a uno, mentre dopo l'intervento del polo la funzione di trasferimento diminuisce con pendenza pari a  $-20 \frac{dB}{dec}$

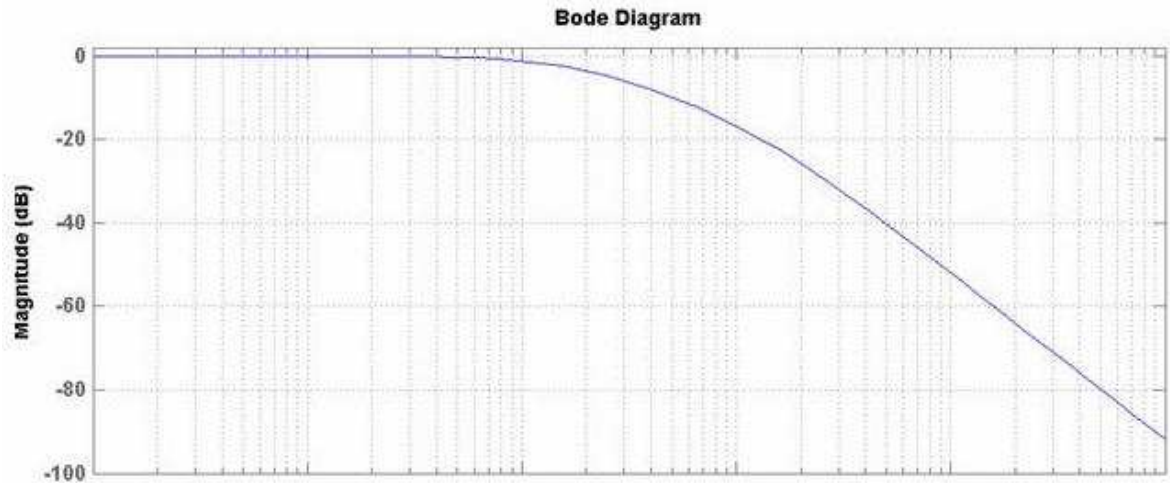


FIG. 3.12 DIAGRAMMA DI BODE DI UN FILTRO PASSA BASSO PASSIVO

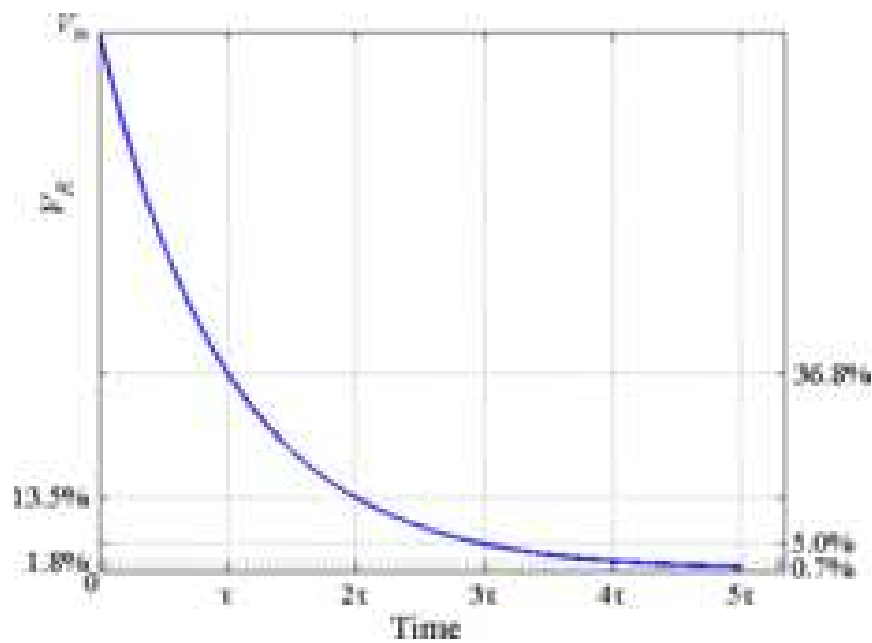
Il polo può essere calcolato come:

$$f_{LP} = \frac{1}{2\pi\tau_{LP}} = \frac{1}{2\pi CR}$$

La risposta all'impulso del filtro passa basso nel dominio del tempo ha la seguente forma:

$$h_{LP}(t) = \frac{1}{RC} \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) u(t)$$

Nella Figura 3.13(a) e nella Figura 3.13(b) sono mostrati rispettivamente l'andamento della risposta all'impulso nel dominio del tempo e l'uscita del filtro passa basso quando in ingresso viene applicato un segnale di tensione costante.



**FIG. 3.13 (A) RISPOSTA ALL'IMPULSO NEL DOMINIO DEL TEMPO  
DI UN FILTRO PASSA BASSO**

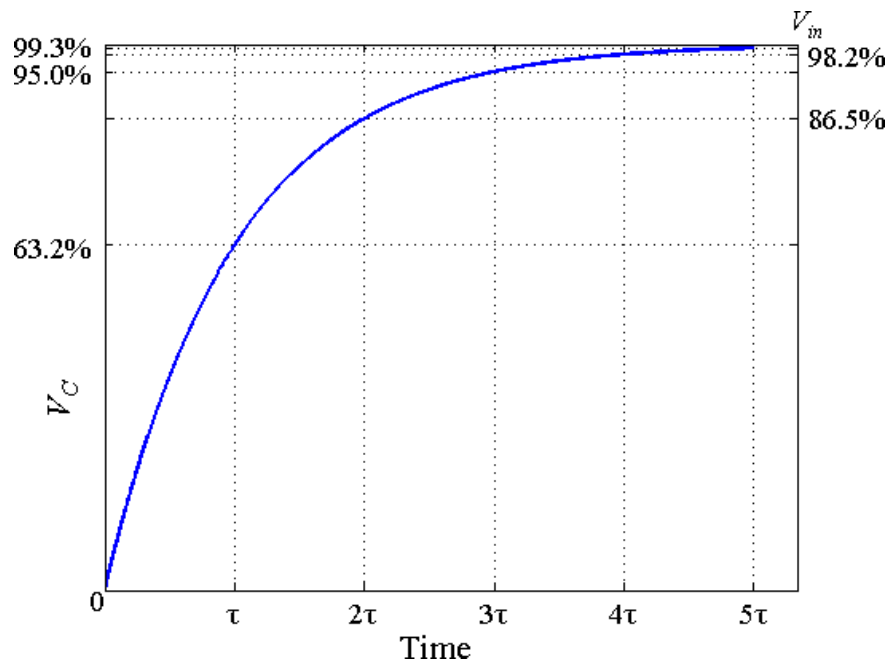


FIG. 3.13 (B) USCITA DEL FILTRO QUANDO IN INGRESSO  
È APPLICATO UN SEGNALE COSTANTE

La scelta dei componenti del filtro passa basso è stata effettuata in modo che la costante di tempo introdotta dal condensatore  $C_{tot} = C_3 + C_4$  corrisponda a una frequenza di taglio del filtro relativamente bassa ma che rispetti il requisito di risposta alle variazioni di livello già discusso in precedenza per l'allungatore. Il filtro passa basso deve operare in maniera indipendente dall'allungatore di picco.

Per questi motivi si sono scelti come valori i seguenti:

$$R_6 = 56k\Omega$$

$$C_3 = 10nF$$

$$C_4 = 100nF$$

Con tali valori otteniamo una frequenza di taglio del filtro pari a:

$$f_{LP} = \frac{1}{2\pi R_6(C_3 + C_4)} \cong 26Hz$$

### 3.5 Configurazione finale

Come si è già detto il dispositivo funziona direzionando il fascio di fotoni emesso dal LED verso due fotorivelatori posti sulla parete opposta. I segnali elettrici emessi dai due fotorivelatori vengono trattati dal circuito analizzato in questo capitolo allo stesso modo come mostrato in Figura 3.14

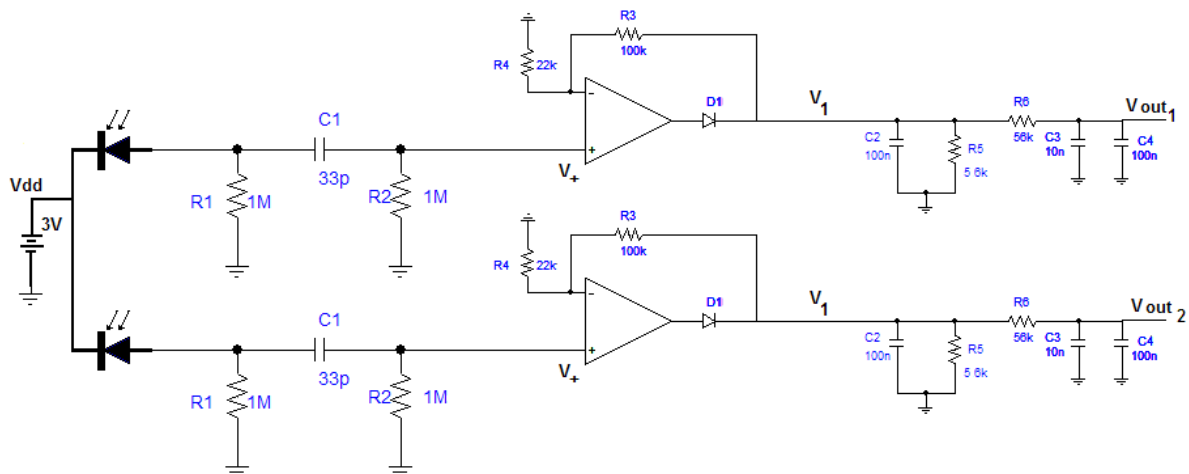


FIG. 3.14 CONFIGURAZIONE FINALE

I segnali  $V_{out_1}$  e  $V_{out_2}$  sono due segnali a bassa frequenza che verranno acquisiti tramite una scheda di acquisizione (DAQ) e verranno elaborati tramite il software LabView. Dopo averli campionati, verrà

effettuata la somma e la sottrazione dei due segnali e il rapporto di questi verrà utilizzato come indice di livello.

# *Configurazione flebo, taratura e misure*

Una volta ottenuti i segnali costanti, prima di passare alla loro acquisizione, è necessario disporre i dispositivi di emissione e lettura della luce intorno al deflussore della fleboclisi entro cui sarà posto il liquido.

In questo capitolo verrà prima spiegata la soluzione utilizzata che mostra schematicamente come vengono posizionati il LED e i due fotodiodi attorno al deflussore; successivamente viene mostrato come, una volta costituiti i circuiti elettrici e disposti i fotorivelatori ed il LED nella configurazione ottimale, vengono acquisiti i segnali per visualizzarli a schermo per operare matematicamente su di essi; infine, montato lo strumento, occorre tararlo, e quindi viene spiegato come si è trovata la caratterizzazione metrologica che definisce le caratteristiche dello strumento stesso, in modo tale da poter convertire i segnali di tensione ottenuti in un numero che rappresenti il livello del liquido che è presente nel contenitore.

## 4.1 Configurazione della flebo

Per quanto riguarda il posizionamento del LED e dei due fotodiodi attorno al deflussore della fleboclisi si è partiti da una soluzione utilizzata da una tesi precedente dove si è dimostrata la validità di tale configurazione, migliorando il range di livelli rilevabili.

La Figura 4.1 mostra schematicamente come avviene il posizionamento

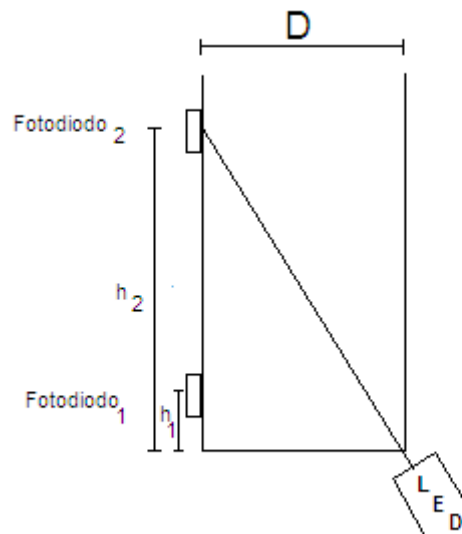


FIG. 6.1 CONFIGURAZIONE FLEBO

Il LED è posto al di sotto della base della flebo e i due fotorivelatori appoggiati alla parete verticale della stessa. L'intero sistema funziona sfruttando sia la legge della riflessione che la legge di Snell (o legge della rifrazione). Il fotodiode inferiore rimane sempre sommerso dal liquido e varia quindi la sua

intensità secondo la legge della riflessione: all'interfaccia acqua/aria infatti parte della luce viene riflessa e quindi colpisce il fotodiode sommerso. All'aumentare dell'altezza del liquido la quantità di fotoni che colpisce la superficie del fotodiode 1 è sempre minore generando in questo modo un segnale sempre più basso. Il fotodiode superiore invece segue la legge di Snell: quando la flebo è piena il raggio luminoso immesso nella flebo non subisce variazioni direzionali e va a colpire solo il fotodiode superiore. In questa trattazione si è supposto di trascurare lo spessore della parete della flebo. Tale approssimazione nella realtà risulta pienamente giustificata in quanto lo spessore della parete, di circa 1 mm, contribuisce in maniera irrisoria allo spostamento del raggio. Al diminuire dell'altezza del liquido, la parte di raggio inviato che arriva al fotodiode 2 è quella rifratta, che diminuisce gradualmente.

In Figura 4.2 sono mostrate le due configurazioni limite.

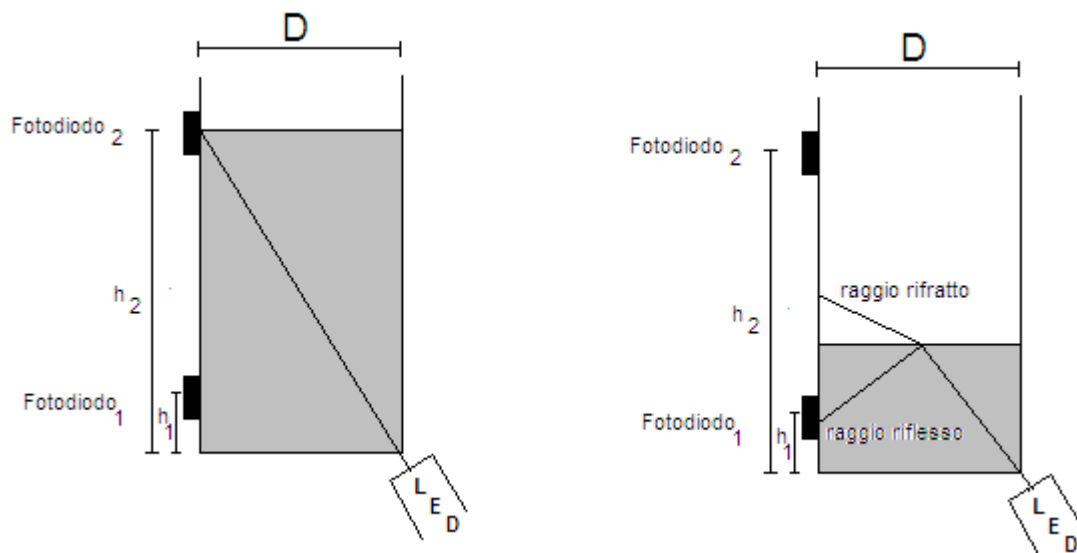


FIG. 4.2 CONFIGURAZIONE FLEBO NE CASO DI ALTEZZA MASSIMA DEL LIQUIDO RILEVABILE (A DESTRA)

E NEL CASO DI MINIMA ALTEZZA RILEVABILE (A SINISTRA)



Una volta posizionati i fotodiodi in modo da rispettare quanto appena detto, si inviano i segnali rivelati dai fotodiodi stessi (trattati secondo quanto esposto nel capitolo precedente) ad una scheda di acquisizione, che visualizza a schermo il livello di tensione registrato da ognuno dei due rivelatori.

Verrà poi effettuata la somma e la differenza tra il segnale di tensione rivelato dal fotodiodo superiore e quello rilevato dal fotodiodo inferiore e successivamente verrà effettuato il rapporto differenza/somma in modo da ottenere una caratteristica il più possibile lineare e monotona.

Sperimentalmente si è provato che, a causa dei menischi che si formano sulla superficie del liquido, il segnale rilevato dai fotodiodi può essere disturbato e in particolare questo disturbo è avvertibile con maggiore entità in corrispondenza del passaggio del liquido davanti ad essi. La superficie, che può essere più o meno concava a seconda che il livello stia salendo oppure scendendo, causa infatti una deflessione dei raggi che non può essere predeterminata e che porta a forti non linearità della caratteristica del misuratore.

Dato che ci vorrebbe una caratteristica monotona e abbastanza lineare, bisognerebbe pertanto evitare il passaggio del livello del liquido davanti a fotorivelatori. Questo fatto comporta due possibili conseguenze: la prima è che si rinunci a rivelare livelli che stiano al di sotto del fotodiodo inferiore; la seconda è quella di rivelare solo altezze di liquido comprese tra il fotodiodo inferiore e quello superiore.

Pertanto non potendo risolvere tutti i livelli di liquido a causa delle non linearità presenti al passaggio dell'interfaccia acqua/aria davanti ai fotodiodi, si è deciso di impostare un livello minimo rivelabile sotto il quale non si è in grado di ottenere una misura precisa, ma in corrispondenza del quale è possibile ottenere un robusto segnale di allarme (funzione svolta dal fotodiodo inferiore). Sopra tale livello si è ancora in grado di ottenere una misurazione accurata del livello del liquido (funzione svolta da entrambi i fotodiodi) fino ad un livello massimo di liquido scelto.

Il fotorivelatore superiore vede variare la propria intensità incidente sempre secondo la legge della rifrazione; quello inferiore non può invece registrare intensità incidenti variabili a causa dello stesso fenomeno, in quanto rimane sempre sommerso. Tale fotodiodo vede variare il numero dei fotoni che incidono grazie alla riflessione: dopo infatti che l'onda emessa dal LED raggiunge l'interfaccia acqua/aria, una frazione di essa viene riflessa tornando verso il basso e andando potenzialmente a colpire il fotorivelatore sommerso.

Il LED si trova ad una distanza di circa 1.7cm dalla parete con i fotodiodi, essendo questa la larghezza D del deflussore. Per stabilire la posizione approssimata del fotorivelatore superiore si sono effettuati calcoli di massima, in quanto non è possibile stabilire esattamente l'entità delle misure a causa dei menischi presenti.

Si è imposta, per scelta di progetto, la posizione del fotodiodo superiore pari a 4cm dal fondo della flebo, imponendo in questo modo l'altezza massima di liquido rilevabile. A questo punto si è imposta l'inclinazione del LED in modo che il fascio di luce uscente dal LED, con angolo di apertura di  $\pm 20^\circ$  per ogni lato, attraversando l'interfaccia aria/acqua venga rifratto e vada a colpire principalmente il fotodiodo superiore e più debolmente il fotodiodo inferiore quando il livello di liquido è massimo. In Figura 4.3 viene mostrato l'andamento del raggio riflesso e del raggio rifratto.

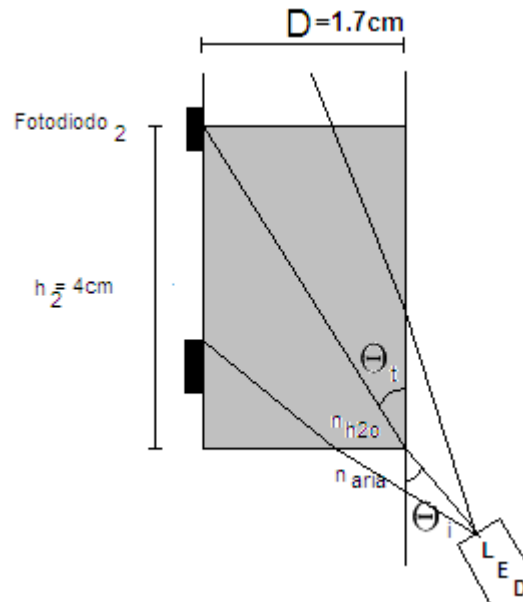


FIG. 4.3 RAPPRESENTAZIONE DELLA FLEBO PER IL CALCOLO DELL'ANGOLO INCIDENTE  $\theta_i$

Per il calcolo di  $\theta_i$  sono state effettuate le seguenti operazioni. Per prima cosa si è calcolato l'angolo  $\theta_t$  sfruttando il triangolo rettangolo avente come cateti  $D$  e  $h_2$ . Ne segue che:

$$D = h_2 \tan \theta_t \Rightarrow \theta_t = \tan^{-1} \frac{D}{h_2} = 23^\circ$$

Si può ora calcolare l'angolo di incidenza, cioè l'angolo di ingresso della luce sfruttando la legge di Snell:

$$n_{aria} * \sin \theta_i = n_{H_2O} * \sin \theta_t \Rightarrow \theta_i = \sin^{-1} \left( \frac{1.33}{1} * \sin \theta_t \right) = 31.3^\circ$$

Per calcolare la posizione del fotodiodo inferiore non sono stati effettuati calcoli. Si è partiti dalla posizione scelta nella tesi di riferimento, in cui il fotodiodo inferiore viene posizionato a 0.5cm dal fondo della flebo per rilevare un'altezza minima di 1.2cm. Si è visto sperimentalmente che posizionando il fotodiodo inferiore ad un'altezza pari a 0.3cm dal fondo della flebo si riesce a rilevare

un'altezza minima di livello di liquido pari a 0.8cm. Sotto questo valore la misura risulta non essere più attendibile dato che cominciano ad essere presenti le non linearità dovute al passaggio dell'interfaccia acqua/aria davanti al fotodiodo in basso. Lo stesso discorso vale anche per il fotodiodo superiore dove non si riesce ad avere una stima attendibile dell'altezza del liquido quando quest'ultimo supera i 4cm dal fondo della flebo.

## **4.2 Acquisizione ed elaborazione dei segnali**

Come si è già detto, una volta costruiti i circuiti elettrici e disposti i fotorivelatori ed il LED nella configurazione ottimale, è necessario acquisire i segnali per visualizzarli a schermo per operare matematicamente su di essi.

L'acquisizione avviene tramite una scheda di acquisizione DAQ (data acquisition).

La scheda di acquisizione DAQ è ciò che rappresenta l'interfaccia tra il segnale e il calcolatore. Al proprio interno una DAQ è costituita da una catena di acquisizione formata da un multiplexer, che opera una selezione tra i vari ingressi disponibili (questa funzione può essere effettuata in modalità single-ended oppure differenziale); segue un amplificatore per strumentazione, che amplifica il segnale in modo da sfruttare appieno la dinamica del convertitore analogico-digitale (ADC). A seguito dell'amplificazione avviene il campionamento e la conversione analogico-digitale, che trasforma il segnale continuo in valori numerici. Segue infine una porta FIFO (first in, first out) che permette di inviare al PC il dato acquisito.

Considerando le rilassate specifiche relative alla frequenza di acquisizione, dettate prevalentemente dalla frequenza del segnale generato dai fotorivelatori di circa 1.38kHz, si decide di utilizzare la

scheda di acquisizione della National Instruments NI USB-6008. Essa è caratterizzata da 8 canali analogici, 12 canali digitali, risoluzione di 12 bit in grado di acquisire fino a 10kSample/s.

Nel caso in esame si utilizzano due ingressi analogici in modalità differenziale per l'acquisizione dei segnali filtrati e amplificati all'uscita dei fotodiodi.

Per acquisire correttamente i dati, si fissa una frequenza di campionamento intorno a 1000sample/s e si fissa il numero di campioni acquisiti a 100.

Effettuati i collegamenti tra le uscite del circuito e la scheda di acquisizione in maniera opportuna, impostati correttamente la frequenza di campionamento e il numero di campioni da acquisire, il programma LabView elaborato permette di stimare l'altezza del liquido all'interno del deflussore della flebo.

L'acquisizione dati è affidata al DAQ Assistant, mostrato in Figura 4.4, correttamente impostato per quanto riguarda la frequenza di campionamento e il numero di campioni acquisiti.

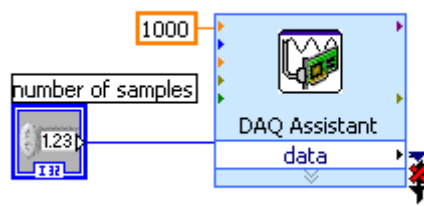


FIG. 4.4 BLOCCO LABVIEW: DAQ ASSISTANT

I dati acquisiti tramite la scheda, come si è detto, devono essere sottratti e sommati in modo da ottenere un segnale “differenza delle tensioni” e “somma delle tensioni” che ognuno dei due

---

fotorivelatori riceve e successivamente si può effettuare il rapporto  $\frac{\text{differenza}}{\text{somma}}$  grazie al quale è possibile ottenere una stima corretta dell'altezza del liquido all'interno del deflussore.

Il programma LabView utilizzato per visualizzare a schermo il rapporto  $\frac{\text{differenza}}{\text{somma}}$  è mostrato in

Figura 4.5.

Tale programma si articola in diversi passi: inizialmente il segnale viene acquisito dalla DAQ, i cento campioni acquisiti da ognuno dei due ingressi vengono inseriti in due array differenti e viene effettuata la media su ogni ingresso. I segnali così ottenuti vengono mostrati su un grafico. Tali segnali poi vengono sottratti e sommati e infine si effettua il rapporto  $\frac{\text{differenza}}{\text{somma}}$ , anch'essa mostrata su un grafico. Tali operazioni vengono inserite in un ciclo *for* ripetuto due volte. All'esterno del ciclo *for* i segnali "tensione fotodiodo superiore", "tensione fotodiodo inferiore", "differenza tensioni" e "rapporto differenza/somma" vengono nuovamente mediati per ottenere un valore più stabile, e registrati su file di tipo txt, in modo da poterli successivamente utilizzare nel programma Matlab.

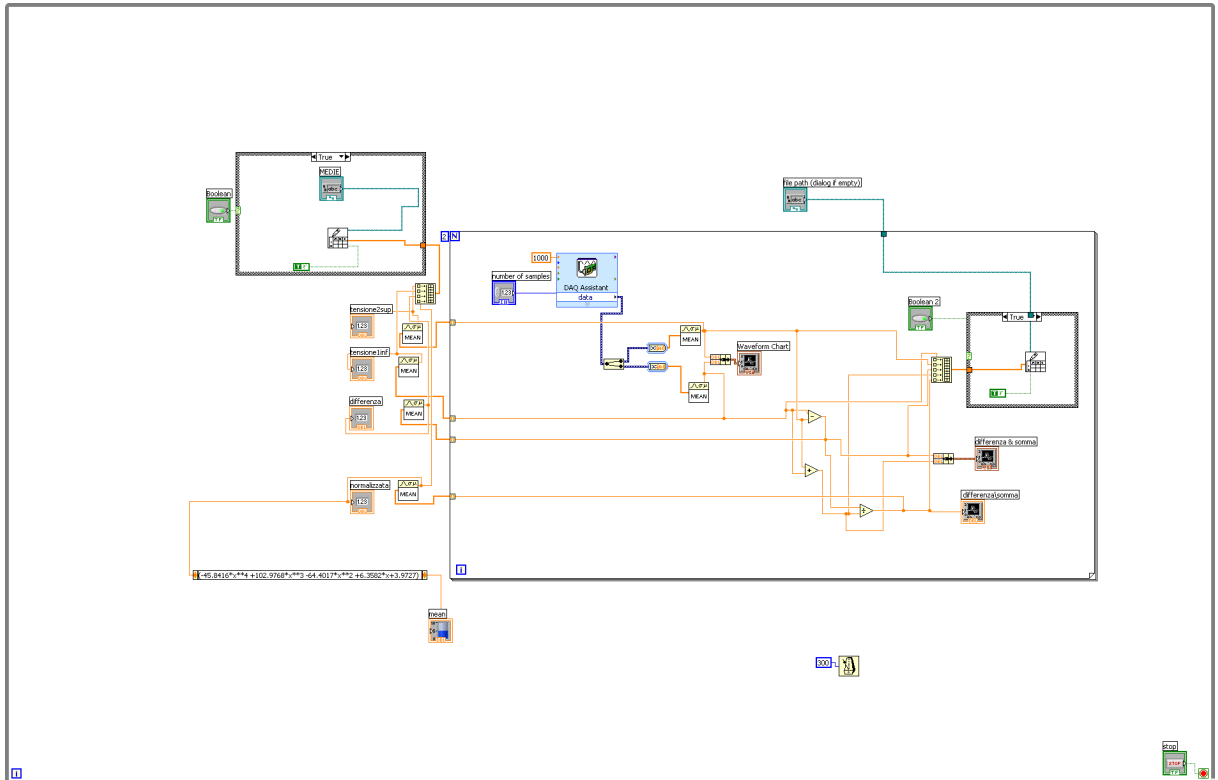


FIG. 4.5 PROGRAMMA LABVIEW

Grazie alla taratura dello strumento si è arrivati ad ottenere una funzione  $h = f(V)$ , cioè una funzione che calcola l'altezza del liquido in funzione del rapporto  $\frac{\text{differenza}}{\text{somma}}$ . Tale funzione viene inserita nel programma LabView . Collegando in ingresso il rapporto  $\frac{\text{differenza}}{\text{somma}}$ , in uscita si ottiene il livello del liquido visualizzato a schermo. Il tutto si trova all'interno di un ciclo while che può essere fermato dall'utente.

### 4.3 Taratura dello strumento

Una volta montato lo strumento, occorre tararlo, ossia trovarne la caratterizzazione metrologica che definisca le caratteristiche dello strumento stesso, in modo tale da poter convertire i segnali di tensione ottenuti in un numero che rappresenti il livello del liquido che è presente nel contenitore.

Si è proceduto alla misurazione ottenendo sperimentalmente l'ampiezza del segnale rapporto

$\frac{\text{differenza}}{\text{somma}}$  in corrispondenza di alcune altezze del liquido. Questo procedimento è stato svolto due

volte: la prima aumentando regolarmente l'altezza del liquido all'interno del contenitore con passo di circa 1mm, mentre la seconda diminuendo l'altezza del liquido sempre con un passo di circa 1mm. È stato applicato tale procedimento in quanto, come si è detto, nella flebo in uso si formano dei menischi dovuti alla conformazione della sua base che comportano un livello non orizzontale del liquido.

Misurando pertanto due volte il livello, una volta con il liquido in salita e una volta con il liquido in discesa e facendo la media tra i risultati ottenuti, si potrebbe avere infatti un risultato migliore e più accurato.

I risultati ottenuti sono mostrati nella Tabella 4.7 e riportati in un grafico mostrato in Figura 4.6; in Tabella 4.8 si è quindi proceduto con la determinazione del valore medio relativa alla tensione rilevata in corrispondenza ad ognuna delle altezze del liquido. I punti sulla Tabella 4.8 sono stati tracciati, tramite Matlab, in un grafico riportato in Figura 4.10.



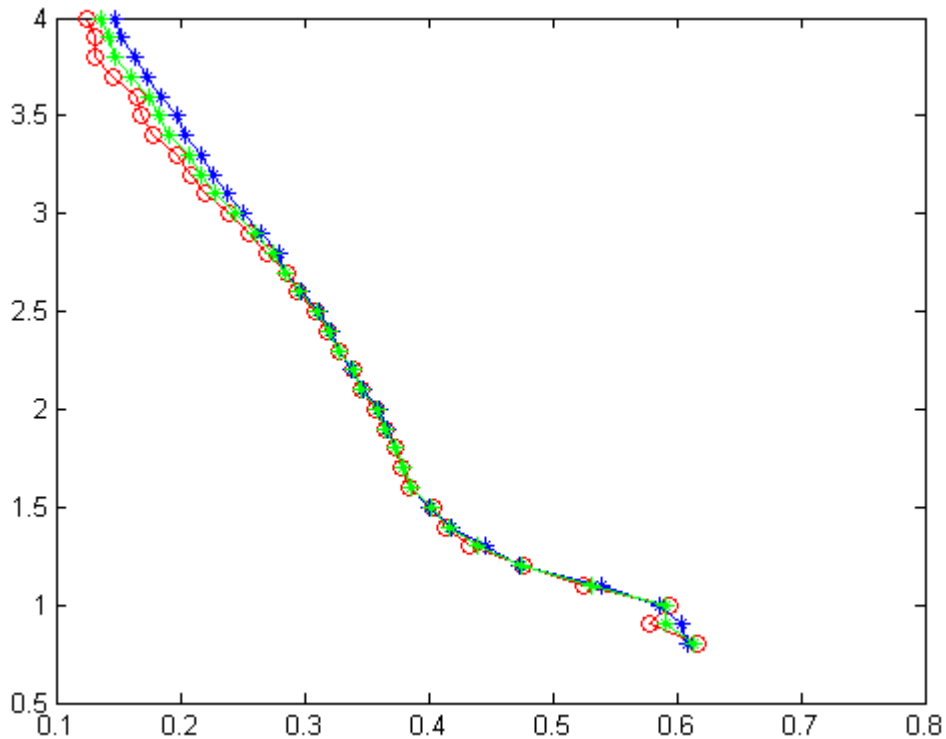


FIG. 4.6 CAMPIONI OTTENUTI

In rosso sono stati tracciati i valori del rapporto  $\frac{\text{differenza}}{\text{somma}}$  all'aumentare dell'altezza del liquido con passo di un millimetro, in blu invece vengono riportati i valori del rapporto  $\frac{\text{differenza}}{\text{somma}}$  al diminuire del livello del liquido sempre con passo di un millimetro, mentre in verde è stato tracciato l'andamento della media delle due curve.

Sulla base dei dati campionari raccolti, occorre ora trovare una relazione funzionale tra le variabili in esame  $h = f\left(\frac{\text{differenza}}{\text{somma}}\right)$ . Si è quindi utilizzato il metodo della regressione, che consiste, partendo da un insieme limitato di punti, nell'esprimere la variabile dipendente (l'altezza) in funzione della variabile indipendente (il rapporto normalizzato tra la differenza delle tensioni e la loro somma) e di

altre costanti: queste devono essere scelte in modo tale che la relazione che le lega approssimi al meglio il comportamento dei dati ottenuti.

Altezza del liquido [cm]	$\frac{\text{differenza}}{\text{somma}}$ in salita	$\frac{\text{differenza}}{\text{somma}}$ in discesa	Altezza del liquido [cm]	$\frac{\text{differenza}}{\text{somma}}$ in salita	$\frac{\text{differenza}}{\text{somma}}$ in discesa
0.8	0.617	0.609	2.5	0.309	0.312
0.9	0.595	0.604	2.6	0.295	0.297
1.0	0.579	0.587	2.7	0.286	0.284
1.1	0.525	0.539	2.8	0.270	0.280
1.2	0.476	0.474	2.9	0.255	0.266
1.3	0.433	0.446	3.0	0.240	0.250
1.4	0.414	0.419	3.1	0.220	0.238
1.5	0.404	0.400	3.2	0.209	0.226
1.6	0.385	0.386	3.3	0.198	0.217
1.7	0.379	0.380	3.4	0.179	0.204
1.8	0.374	0.373	3.5	0.169	0.197
1.9	0.365	0.367	3.6	0.166	0.184
2.0	0.357	0.361	3.7	0.146	0.174
2.1	0.346	0.347	3.8	0.132	0.163
2.2	0.340	0.338	3.9	0.134	0.152
2.3	0.328	0.328	4.0	0.125	0.148
2.4	0.319	0.322			

TABELLA 4.7 VALORI RILEVATI

Altezza del liquido [cm]	$\frac{\text{differenza}}{\text{somma}}$ media	Altezza del liquido [cm]	$\frac{\text{differenza}}{\text{somma}}$ media
0.8	0.6130	2.5	0.3105
0.9	0.5915	2.6	0.2960
1.0	0.5910	2.7	0.2850
1.1	0.5320	2.8	0.2750
1.2	0.4750	2.9	0.2605
1.3	0.4395	3.0	0.2450
1.4	0.4165	3.1	0.2290
1.5	0.4020	3.2	0.2175
1.6	0.3855	3.3	0.2075
1.7	0.3795	3.4	0.1915
1.8	0.3735	3.5	0.1830
1.9	0.3660	3.6	0.1750
2.0	0.3590	3.7	0.1600
2.1	0.3465	3.8	0.1475
2.2	0.3390	3.9	0.1420
2.3	0.3280	4.0	0.1365
2.4	0.3205		

TABELLA 4.8 VALORI MEDI

La relazione funzionale può essere di ogni tipo: nel caso più semplice di funzione lineare: nel caso più semplice di funzione lineare la curva risulta essere una retta, ma si può utilizzare anche una regressione polinomiale, esponenziale o logaritmica. Una volta ricavata tale funzione è quindi

possibile ricavare i valori della variabile dipendente per ogni valore di quella indipendente, entro certi limiti di tollerabilità.

Il codice Matlab utilizzato per il calcolo della funzione di regressione è il seguente:

```
h=[0.8 0.9 1.0 1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6 1.7 1.8 1.9 2.0 2.1 2.2 2.3 2.4 2.5 2.6 2.7 2.8 2.9 3.0
3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 3.7 3.8 3.9 4.0];

Ns=[0.617 0.579 0.595 0.525 0.476 0.433 0.414 0.404 0.385 0.379 0.374 0.365 0.357 0.346 0.340
0.328 0.319 0.309 0.295 0.286 0.270 0.255 0.240 0.220 0.209 0.198 0.179 0.169 0.166 0.146
0.132 0.132 0.125];

Ng=[0.609 0.604 0.587 0.539 0.474 0.446 0.419 0.400 0.386 0.380 0.373 0.367 0.361 0.347 0.338
0.328 0.322 0.312 0.297 0.284 0.280 0.266 0.250 0.238 0.226 0.217 0.204 0.197 0.184 0.174
0.163 0.152 0.148];

M=[0.6130 0.5915 0.5910 0.5320 0.4750 0.4395 0.4165 0.4020 0.3855 0.3795 0.3735 0.3660 0.3590
0.3465 0.3390 0.3280 0.3205 0.3105 0.2960 0.2850 0.2750 0.2605 0.2450 0.2290 0.2175 0.2075
0.1915 0.1830 0.1750 0.1600 0.1475 0.1420 0.1365];

p=polyfit(M,h,4);
Y=polyval(p,M);

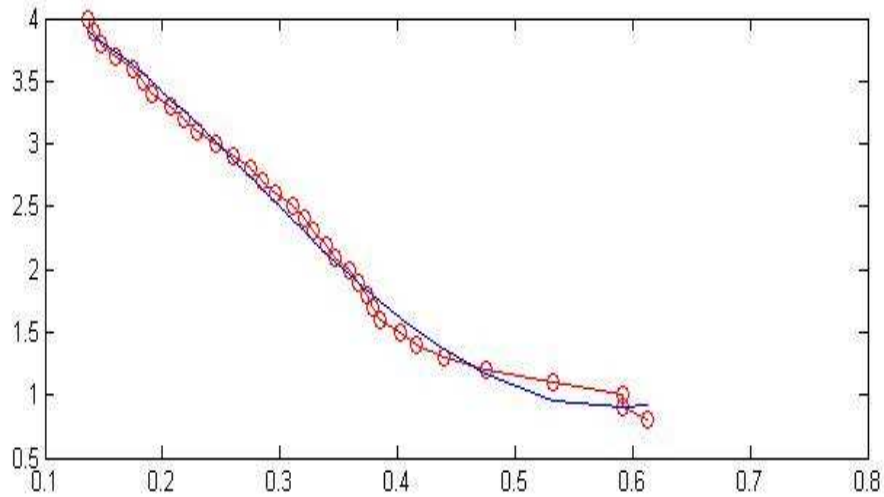
figure(1)
plot(M,h,'rO-',M,Y);

figure(2)
plot(Ns,h,'rO-',Ng,h,'b*-',M,h,'g*-');
```

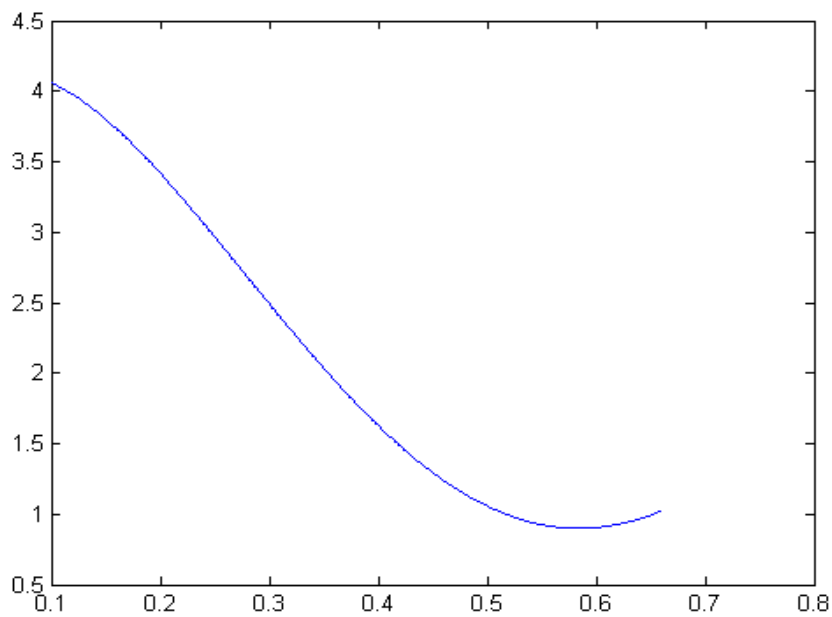
**Fig.4.9 Programma Matlab**

Si è visto sperimentalmente che il grado del polinomio che meglio approssima la curva dei campioni ottenuta è il quarto grado, questo garantisce una buona aderenza ai dati campionari ottenuti.

In Figura 4.9 e 4.10 mostrano rispettivamente: l'una i punti campionari misurati e la funzione che interpola tali punti; l'altra la funzione continua di quarto grado che meglio approssima l'andamento dei campioni misurati.



**FIG. 4.10 PUNTI MISURATI E CURVA INTERPOLANTE**



**FIG. 4.11 FUNZIONE CONTINUA DI 4° CHE MEGLIO APPROSSIMA**

L'ANDAMENTO DEI PUNTI CAMPIONARI

Si è calcolato che l'errore massimo che si compie effettuando misurazioni con lo strumento è pari a 1.5mm-2.0mm, errore che viene misurato tra gli 0.8cm e 1.0cm di altezza del liquido e tra i 3.5cm e i 4.0cm. Tramite un comando Matlab è stato possibile calcolare i coefficienti del polinomio che

approssima la curva. Si è pertanto ottenuto che la funzione di 4° che calcola l'altezza del liquido all'interno del deflussore,  $h$ , in funzione del rapporto tra la differenza delle tensioni e la loro somma,  $x$ , è la seguente:

$$h(x) = -45.8416x^4 + 102.9768x^3 - 64.4017x^2 + 6.3582x + 3.9727$$

dopo aver svolto tale operazione è possibile inserire questa funzione nel programma LabView in modo da poter calcolare esattamente il livello del liquido in corrispondenza ad un certo rapporto.

## *Elaborazione finale e reiezione ai disturbi*

Lo strumento a cui si è pervenuti è capace di segnalare con precisione i livelli del liquido del deflussore. Tale funzione è stata ampiamente dimostrata, effettuando più volte le misure e verificando in questo modo la ripetibilità dello strumento, ovvero il grado di concordanza tra una serie di misure di uno stesso misurando, quando le singole misurazioni sono effettuate lasciando immutate le condizioni di misura. Inoltre la ripetibilità dello strumento viene verificata anche su misure effettuate in periodi di tempo distanti tra loro.

In Figura 5.1 è mostrata una foto della struttura dello strumento.

Si è inoltre notato che lo spostamento anche minimo di uno dei dispositivi ottici (LED e i due fotodiodi) non garantisce la validità della misura; per questo motivo si è cercato di rendere più stabile possibile la posizione sia del LED che dei fotorivelatori.

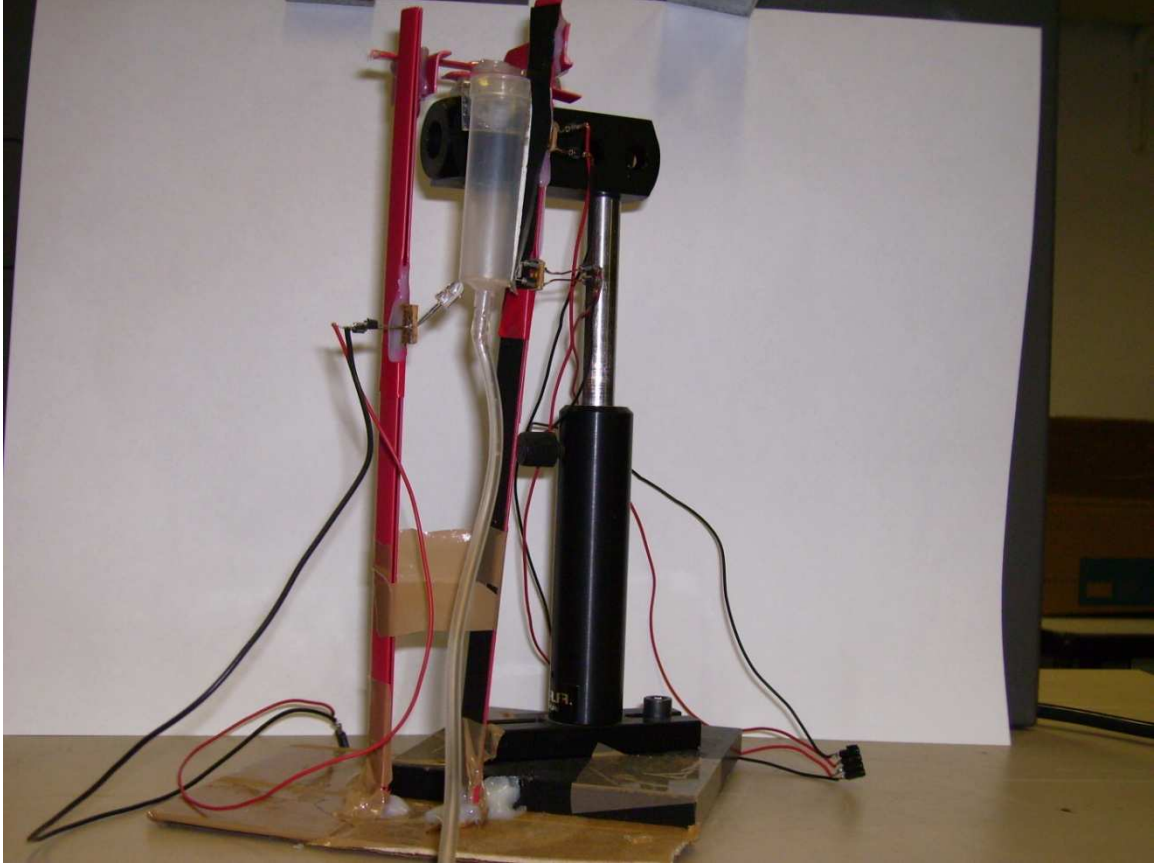


FIG. 5.1 MISURATORE OTTICO DI LIVELLO

## 5.1 Programma LabView finale

Ricapitolando il lavoro svolto si è creato un circuito che genera, tramite un LED pilotato in regime impulsato, un fascio di luce. Questo attraversa il liquido presente all'interno del deflussore e quando incide sull'interfaccia liquido/aria parte viene riflesso e parte viene rifratto andando a colpire entrambi i fotodiodi posti sulla parete opposta rispetto al LED. In base al numero di fotoni assorbiti da entrambi i fotorivelatori si generano due segnali che vengono trattati come già descritto in precedenza. Il circuito di lettura è quello mostrato in Figura 5.2



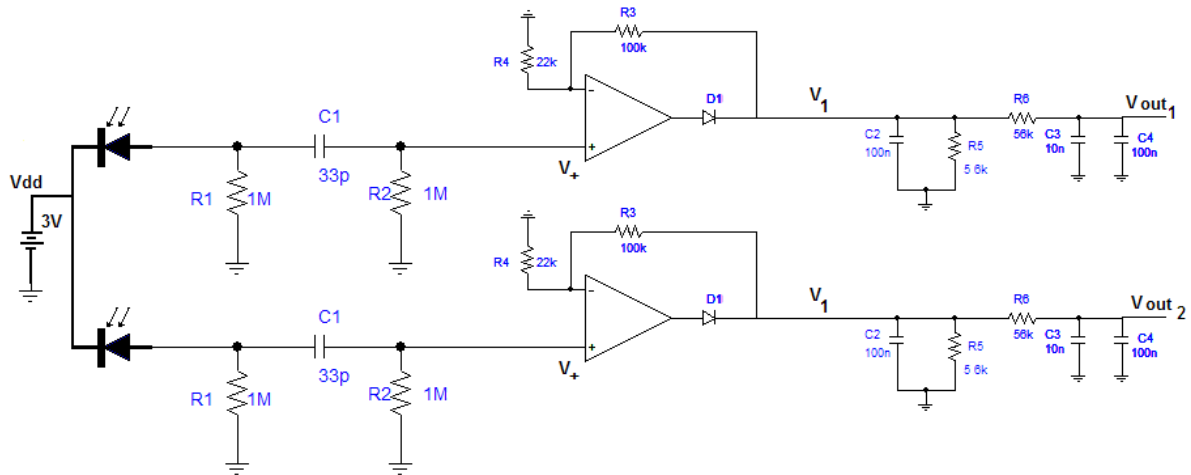


FIG. 5.2 CIRCUITO DI RILEVAZIONE DELLA LUCE

Tramite una scheda di acquisizione DAQ, i segnali  $V_{out_1}$  e  $V_{out_2}$ , che sono segnali a bassa frequenza, vengono elaborati da un programma LabView, mostrato in Figura 5.3 che visualizza a schermo il rapporto  $\frac{\text{differenza}}{\text{somma}}$ . Come è stato già detto si è passati alla taratura dello strumento misurando il valore del rapporto  $\frac{\text{differenza}}{\text{somma}}$  aumentando di volta in volta di 1mm il livello del liquido, partendo da un'altezza di 0.8cm del liquido fino ad un massimo di 4 cm. Si è successivamente effettuata la stessa operazione diminuendo però l'altezza del liquido sempre con passo di 1mm. I valori del rapporto  $\frac{\text{differenza}}{\text{somma}}$  così ottenuti sono stati elaborati tramite il programma Matlab, visto in precedenza, ottenendo una funzione di quarto grado che lega il valore del livello del liquido al valore del rapporto  $\frac{\text{differenza}}{\text{somma}}$ .

Tale funzione è stata poi inserita nel programma LabView in modo da poter calcolare l'altezza del liquido istante per istante e visualizzarla a schermo. In Figura 5.3 è mostrato il programma LabView che svolge questa funzione.

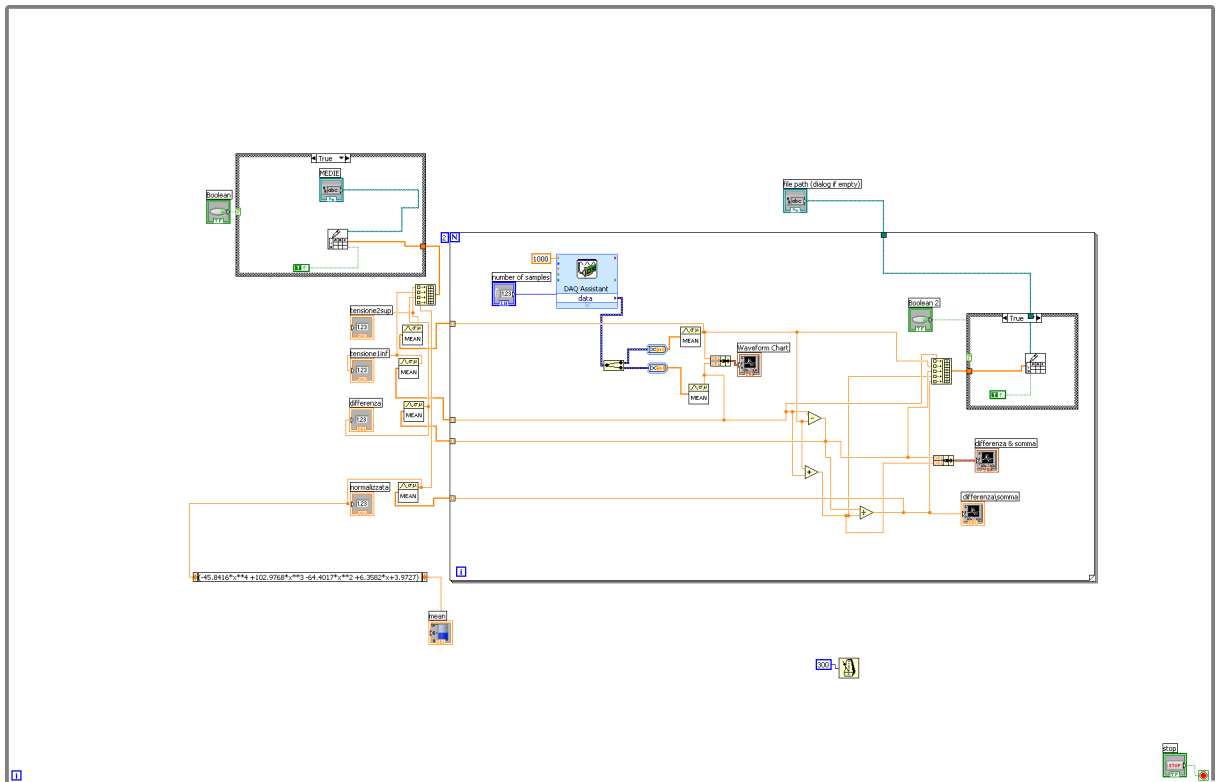


FIG. 5.3 PROGRAMMA LABVIEW CHE CALCOLA ISTANTE PER ISTANTE

IL LIVELLO DEL LIQUIDO E LO VISUALIZZA A SCHERMO

I segnali acquisiti vengono campionati, mediati e vengono visualizzati a schermo. Si effettua successivamente la somma e la differenza dei due segnali e in seguito il rapporto  $\frac{\text{differenza}}{\text{somma}}$  che viene anch'esso visualizzato su un grafico. Queste operazioni si trovano all'interno di un ciclo for ripetuto due volte. Esternamente al ciclo for i segnali “tensione fotodiode superiore”, “tensione fotodiode inferiore”, “differenza tensioni” e “rapporto differenza/somma” vengono nuovamente mediati. Il segnale “rapporto differenza/somma” si trova in ingresso alla funzione  $h = f\left(\frac{\text{differenza}}{\text{somma}}\right)$ , alla cui uscita è collegato un indicatore di livello che visualizza a schermo l'altezza del liquido. Tutto questo viene inserito all'interno di un ciclo while che viene ripetuto finché il programma non viene fermato

dall'utente. Questo permette di seguire istante per istante l'aumentare o il diminuire dell'altezza del liquido, in modo tale da poter sempre controllare il corretto funzionamento della flebo.

In Figura 5.4 viene mostrata la schermata utente LabView dove viene visualizzato nel grafico in alto i segnali di tensione provenienti dal fotodiodo superiore e da quello inferiore, nel grafico in basso a sinistra la somma e la differenza dei due segnali e infine vengono mostrati il segnale  $\frac{\text{differenza}}{\text{somma}}$  e l'indicatore di livello quando l'altezza del liquido all'interno del deflussore si trova a 2.5cm dal fondo della flebo.

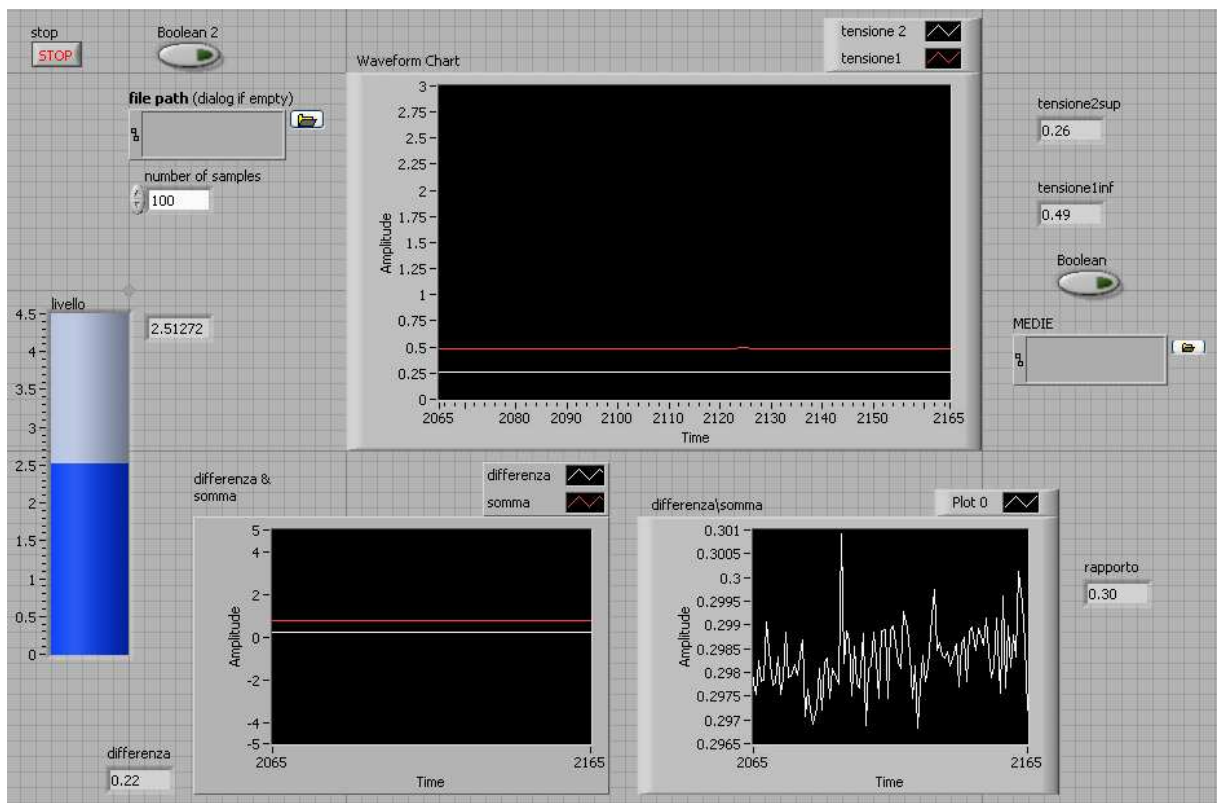


FIG. 5.4 SCHERMATA UTENTE LABVIEW

## 5.2 Reiezione ai disturbi

In fase di prova lo strumento è stato sottoposto a test di diversa natura che potrebbero tranquillamente verificarsi in caso di utilizzo come ad esempio l'oscillazione della provetta. Infatti il deflussore, collegato al flacone che contiene il medicinale da somministrare al paziente, non essendo un oggetto ben fissato all'asta che lo sorregge può oscillare. Spostandosi la provetta, il pelo libero dell'acqua tende a spostarsi in maniera imprevedibile. Nonostante questo, lo strumento segnala comunque i livelli del liquido con errore massimo di 0.55cm quando la provetta risulta inclinata di 30° dal lato dove è posto il LED. Nelle Figure successive vengono mostrate le prove effettuate sulla provetta e le relative schermate utente LabView.

Per esaminare la reiezione ai disturbi dello strumento si è partiti da un'altezza del liquido di 1.7cm dal fondo della flebo quando il deflussore si trova in posizione verticale. Il primo test effettuato consiste nell'inclinare la provetta di 30° verso il lato del LED e constatare il valore dell'altezza mostrato dal programma LabView. L'altezza segnalata dall'indicatore di livello è  $h = 2.25\text{cm}$ , fornendo così un errore alla misura pari a  $\varepsilon = |0.55|\text{cm}$ .

In Figura 5.5 e in Figura 5.6 vengono mostrate rispettivamente la provetta inclinata di 30° verso il lato dove è posto il LED e la schermata utente labView ottenuta.

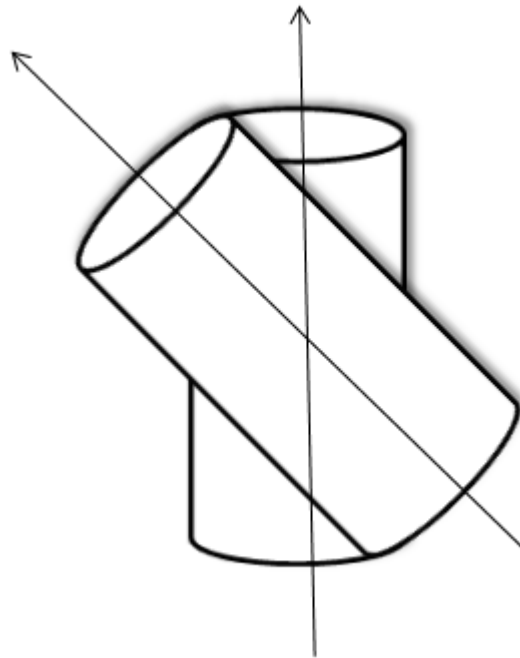


FIG. 5.6 DEFLUSSORE INCLINATO DI 30°

DAL LATO DEL LED

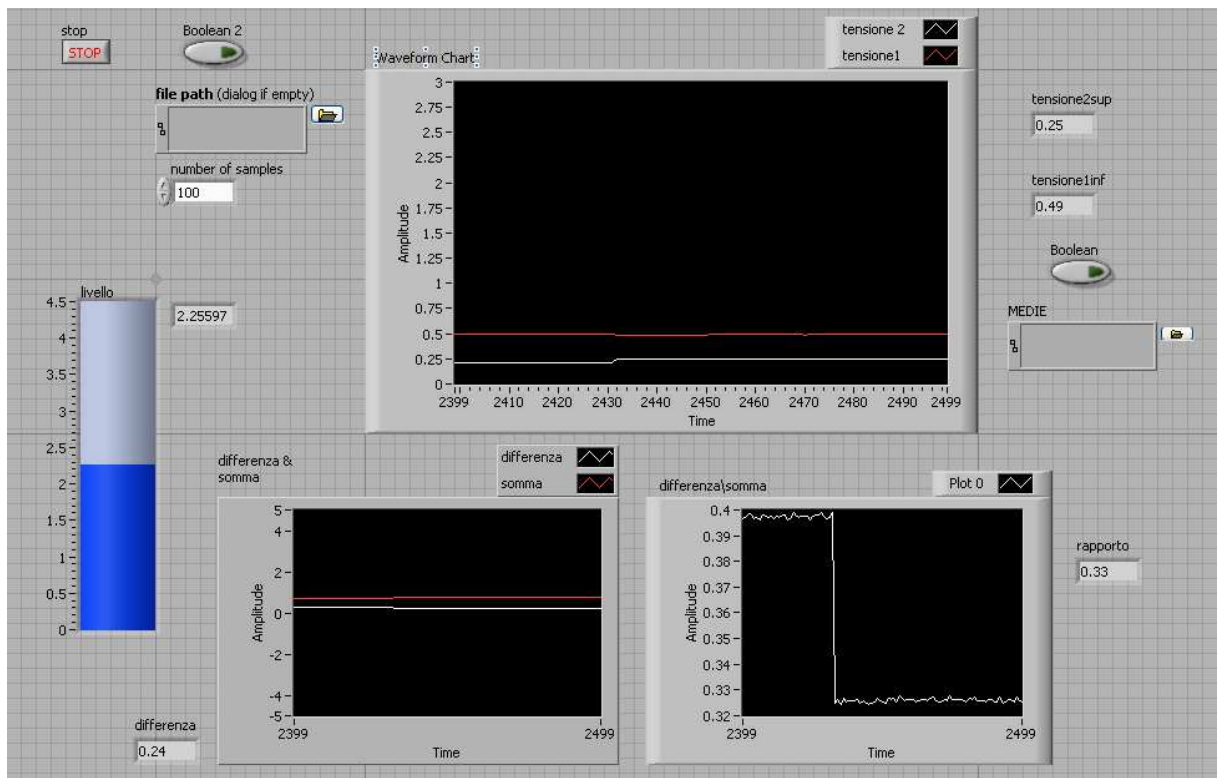
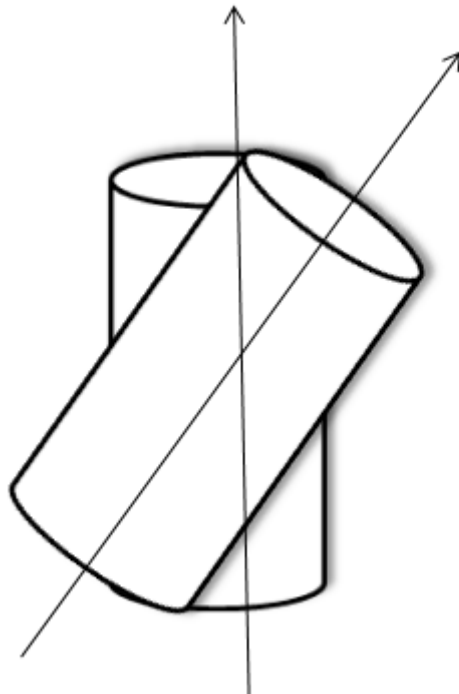


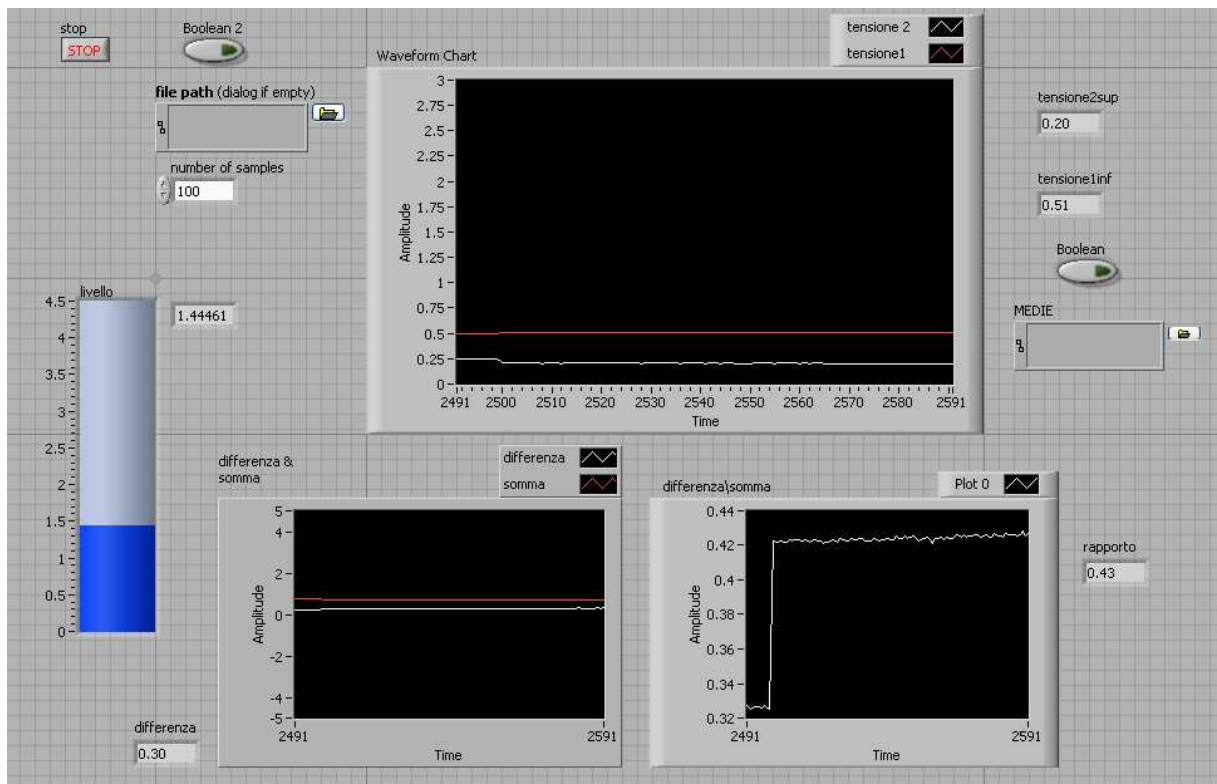
FIG. 5.6 SCHERMATA UTENTE LABVIEW QUANDO IL DEFLUSSORE È INCLINATO DI 30° DAL LATO DOVE È POSTO IL LED

Il secondo test effettuato consiste nell'inclinare la provetta dal lato opposto al LED e dunque dalla parte dove sono collocati i due fotodiodi, sempre con un angolo di  $30^\circ$ , partendo dalla posizione verticale del deflussore contenente il liquido ad un'altezza di 1.7cm. In Figura 5.7 e in Figura 5.8 sono mostrati rispettivamente la posizione della provetta e la relativa schermata utente LabView.



**FIG. 5.7 DEFLUSSORE INCLINATO DI  $30^\circ$**

**DAL LATO DEI FOTODIODI**



**FIG. 5.8 SCHERMATA UTENTE LABVIEW QUANDO IL DEFLUSSORE È INCLINATO  
DI 30° DAL LATO DOVE SONO POSTI I FOTODIODI**

L'altezza rilevata risulta essere di  $h = 1.44\text{cm}$  determinando così un errore di  $\varepsilon = |0.26|\text{cm}$ .

Successivamente si è scelto di inclinare il deflussore in avanti sempre con un angolo di  $30^\circ$ , rilevando un'altezza di  $h = 1.65\text{cm}$  e dunque un errore di  $\varepsilon = |0.05|\text{cm}$ .

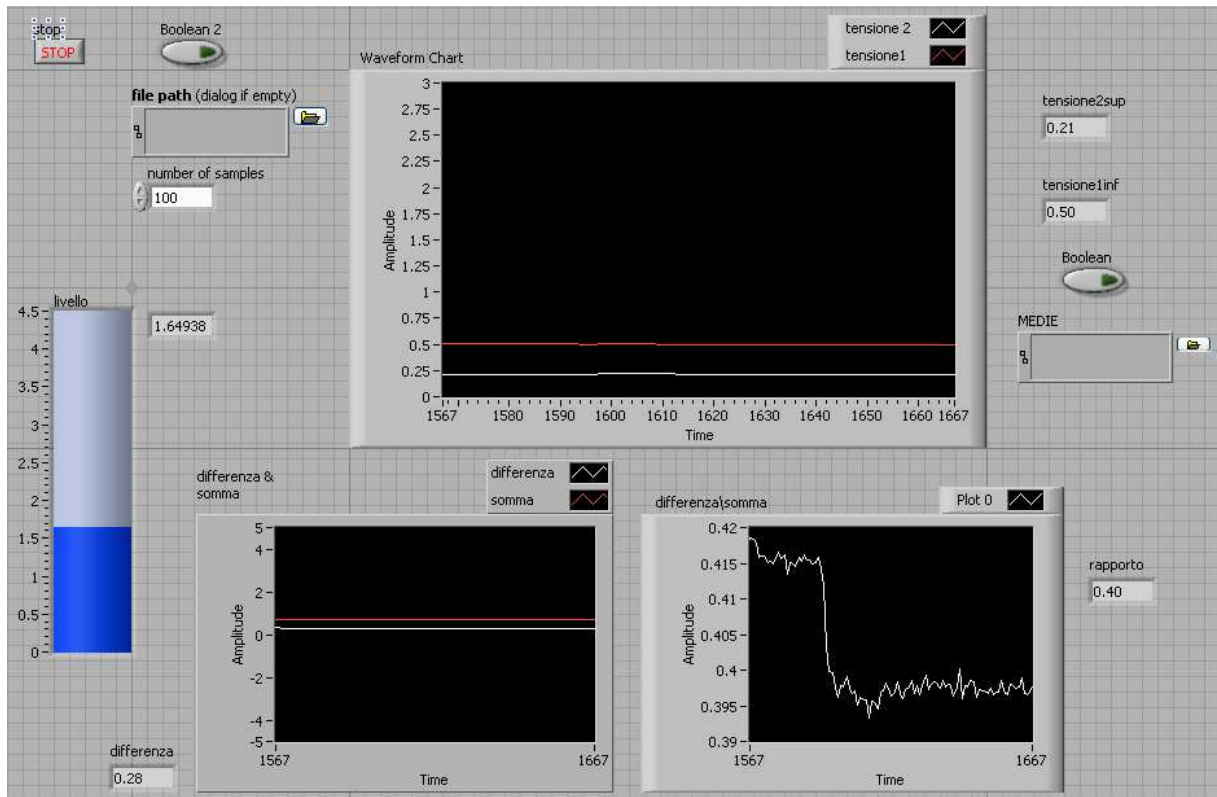
In Figura 5.9 e in Figura 5.10 vengono mostrate rispettivamente la posizione del deflussore e la relativa schermata LabView.



**FIG. 5.9 DEFLUSSORE INCLINATO DI 30°**

IN AVANTI





**FIG. 5.10 SCHERMATA UTENTE LABVIEW QUANDO IL DEFLUSSORE È INCLINATO  
DI 30° IN AVANTI**

Infine si è svolta la stessa prova inclinando indietro il deflussore di 30° ottenendo una misura dell'altezza di  $h = 1.57\text{cm}$  con un errore di  $\varepsilon = |0.13|\text{cm}$ .

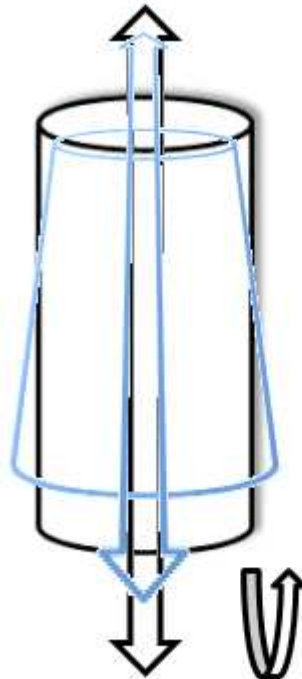
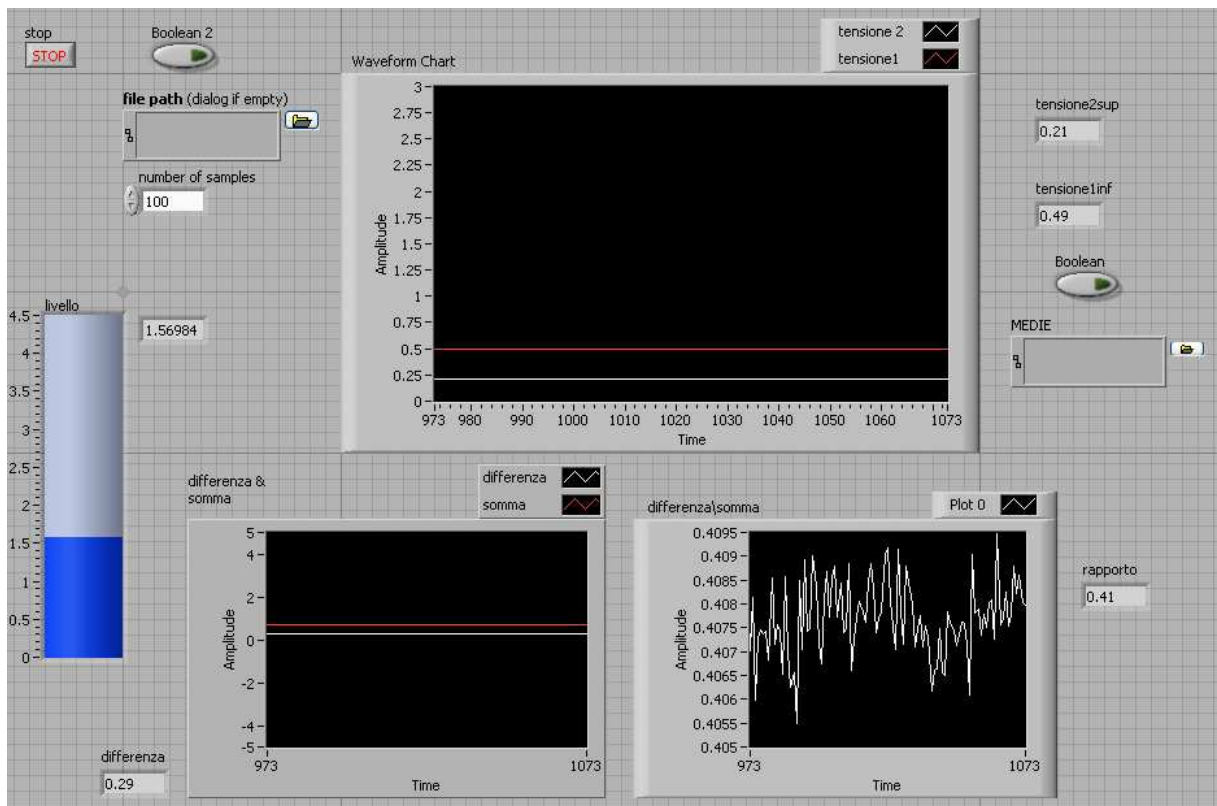


FIG. 5.11 DEFLUSSORE INCLINATO INDIETRO

DI 30°



**FIG. 5.12 SCHERMATA UTENTE LABVIEW QUANDO IL DEFLUSSORE È INCLINATO  
DI 30° INDIETRO**

L'oscillazione del deflussore in diverse direzioni non ha portato grossi errori di misura, la risposta dello strumento è stata decisamente positiva.

## *Conclusioni*

Lo strumento realizzato in laboratorio soddisfa perfettamente le richieste del costruttore (economicità, robustezza e minimo dispendio in termini di potenza) e fornisce un valore di altezza del liquido all'interno della flebo abbastanza attendibile. Inoltre lo strumento risulta avere un buon grado di ripetibilità, ovvero la capacità di fornire misure uguali della stessa grandezza per uno stesso misurando, quando le singole misurazioni sono effettuate lasciando immutate le condizioni di misura; e un buon grado di riproducibilità, cioè la capacità dello strumento di fornire misure vicine tra loro per uno stesso misurando in condizioni diverse di misura.

Lo strumento realizzato inoltre presenta le seguenti caratteristiche:

- Risoluzione 1mm;
- Errore Massimo 1.5mm-2.0mm

Un possibile sviluppo futuro per questo strumento è quello di integrare un sensore ottico che stimi anche il volume di liquidi che cadono per forza di gravità sottoforma di gocce all'interno del deflussore, in modo tale da tenere sempre sotto controllo la somministrazione al paziente della sostanza medicinale per via endovenosa.

## *Bibliografia*

- A. Pirovano, C. Monzio Compagnoni, *Dispositivi optoelettronici integrati*, Progetto Leonardo
- A. Sedra, K. Smith, *Circuiti per la microelettronica*, EdiSES
- P. Mazzoldi, M. Nigro, C. Voci, *Elementi di fisica, onde*, EdiSES
- Slides del corso di *Sensori, segnali e rumore*, Prof. Cova Sergio
- Slides del corso di *Fondamenti della misurazione*, Prof. Norgia Michele

## *Ringraziamenti*

Anche io finalmente sono riuscita a terminare questo ciclo di studi, un piccolo passo verso un futuro che cerco di costruire giorno per giorno.

Ovviamente se sono arrivata fino a questo punto lo devo principalmente ai miei genitori che ci hanno creduto forse più di me. Loro, seppur con tanti sacrifici, mi hanno dato l'opportunità di scegliere senza mai farmi mancare niente, mi hanno appoggiato nelle mie scelte e mi hanno guidato, mi sono sempre stati vicino.

Un particolare ringraziamento va al mio relatore, il professor Michele Norgia, per i consigli, la pazienza e la disponibilità mostrata nei miei confronti.

Desidero inoltre ringraziare le mie sorelle, Lucia e Martina; perché con loro ho sempre trovato un momento di svago, un momento per ridere quando le mie preoccupazioni occupavano la mente.

Volevo poi ringraziare Gigi, perché senza di lui non sarei mai riuscita a finire questa tesi, mi ha aiutato molto anche quando era pieno di lavoro.

Un grazie di cuore va anche a Roberto, per lo splendido supporto che mi ha dato in tanti momenti non propriamente felici e per tutte le “genialate” concepite insieme.

E poi ci sono Claudia, Ivan, Andrea, Chiara, Tiziana e Riccardo, i miei amici più cari e vicini, anche loro mi hanno sempre aiutata a stare meglio, abbiamo fatto e condiviso tantissime cose e spero che la nostra amicizia duri per sempre.

## Ringraziamenti

---

E infine desidero ringraziare tutti i miei amici in generale perché, chi più chi meno, mi siete sempre stati vicino e mi avete dato quella tranquillità necessaria per passare un esame.