

Università degli Studi di Padova

DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA "GALILEO GALILEI"
Corso di Laurea in Fisica

TESI DI LAUREA TRIENNALE

**Progettazione, costruzione e caratterizzazione di alcuni
strumenti per misure automatiche di tipo meteorologico**

Laureando
Ludovico Nista
Matricola 1049159

Relatori
Prof. Marcello Lunardon
Prof. Luisa Dal Pozzo

Anno Accademico 2015-2016

Elenco delle figure

1.1	Tipica stazione meteo con i sensori precedentemente descritti.	2
2.1	Schema a blocchi dell'apparato.	3
2.2	Piedinatura LM 35.	5
2.3	Spiegazione teorica del funzionamento del sensore di pressione.	6
2.4	MPXA6115.	6
2.5	Grafico tensione-pressione relativo al sensore.	6
2.6	Simulazione dell'esperimento in laboratorio.	7
2.7	Grafico tensione-pressione.	8
2.8	Grafico dei residui.	9
2.9	Esempio segnale di uscita dall'anemometro.	10
3.1	Particolare configurazione.	11
3.2	"Visualizzazione" teorica del segnale dopo il primo stadio.	12
3.3	"Visualizzazione" teorica del segnale dopo il circuito di condizionamento.	12
3.4	Circuito di condizionamento dell' LM35.	13
3.5	Configurazione per generare la tensione somma.	13
3.6	Sensore di temperatura con circuito di condizionamento.	15
3.7	Configurazione sensore di pressione.	16
3.8	Errore,previsto dal costruttore, in funzione della temperatura.	16
3.9	Sensore di pressione con LM35.	16
3.10	Schema circuitale (l'anemometro è schematizzato come un interruttore).	17
3.11	Anemometro a coppe.	17
4.1	Primo e secondo giorno di acquisizione	19
4.2	Terzo e quarto giorno di acquisizione	20
4.3	Quinto e sesto giorno di acquisizione	20
4.4	Primo e secondo giorno di acquisizione	21
4.5	Terzo e quarto giorno di acquisizione	21
4.6	Quinto e sesto giorno di acquisizione	21
4.7	Primo e secondo giorno di acquisizione	22
4.8	Terzo e quarto giorno di acquisizione	22
4.9	Quinto e sesto giorno di acquisizione	23
4.10	Primo e secondo giorno di acquisizione	24
4.11	Terzo e quarto giorno di acquisizione	24
4.12	Quinto e sesto giorno di acquisizione	24
4.13	Primo e secondo giorno di acquisizione	25
4.14	Terzo e quarto giorno di acquisizione	25
4.15	Quinto e sesto giorno di acquisizione	25

4.16	Primo e secondo giorno di acquisizione	26
4.17	Terzo e quarto giorno di acquisizione	26
4.18	Quinto e sesto giorno di acquisizione	26
5.1	Possibile soluzione per il sensore di pressione.	27
6.1	Software di gestione dell'anemometro.	29
6.2	Software di gestione dei sensori di temperatura e pressione.	30
6.3	Progetto montato sulla torretta del dipartimento.	31
6.4	Schematico sensore di temperatura.	31

Indice

1	Introduzione	1
2	Costruzione	3
2.1	I Trasduttori	3
2.2	Sensore di Temperatura LM35	4
2.3	Sensore di Pressione MPXA6115A	5
2.3.1	Caratterizzazione sperimentale del sensore di pressione	7
2.4	Anemometro a coppe	9
3	Realizzazione	11
3.1	Condizionamento dei segnali	11
3.1.1	Sensore di temperatura	11
3.1.2	Sensore di pressione	15
3.1.3	Anemometro a coppe	16
3.2	Software	17
4	Caratterizzazione	19
4.1	Analisi: Temperatura	19
4.1.1	Temperatura esterna	19
4.1.2	Temperatura interna	22
4.2	Analisi: Pressione	24
4.3	Analisi: Velocità del vento	25
5	Conclusioni	27
6	Appendice	29
7	Ringraziamenti	33

Capitolo 1

Introduzione

La meteorologia è un ramo delle scienze dell'atmosfera che studia i fenomeni fisici che avvengono nella troposfera. Questa branca in continua evoluzione utilizza sia metodi teorici, tramite l'uso di modelli matematici, che l'osservazione diretta tramite stazioni meteorologiche.

Queste ultime sono un insieme di strumenti di misura che permettono di monitorare le condizioni fisiche dell'atmosfera in un dato luogo per fini meteorologici e climatici. Esse sono composte principalmente dai seguenti sensori:

- **Termometro:** utilizzato per misurare la temperatura dell'aria, richiede la trasmissione di una piccola quantità di energia termica dall'ambiente al sensore. Tipicamente l'energia termica è convertita in un segnale elettrico.

Funziona principalmente in due modi differenti:

i) *per equilibrio:* la misura è effettuata quando non c'è più un gradiente termico tra ambiente e sensore;

ii) *predittivo:* molto più veloce rispetto al precedente, si ricava la velocità di variazione della temperatura del sensore senza che il punto di equilibrio sia mai raggiunto;

- **Barometro:** utilizzato per misurare la pressione dell'aria, calcola la variazione di una quantità proporzionale alla pressione esterna, come la capacità, la resistenza o l'induttanza. Più sofisticati invece, i barometri ad effetto Hall, funzionanti tramite il noto principio elettromagnetico;

- **Igrometro:** misura l'umidità relativa dell'aria ovvero il rapporto tra l'umidità assoluta, definita come la quantità di vapore acqueo presente nell'atmosfera in un dato istante, e l'umidità di saturazione, cioè la quantità massima di vapore acqueo che può essere presente ad una data temperatura e pressione. Questo strumento utilizza dei sensori a stato solido che possiedono la caratteristica di variare i propri parametri elettrici proporzionalmente al valore di umidità relativa;

- **Anemometro:** utilizzato per misurare la velocità del vento. Esistono diversi tipi di anemometri:

i) *a filo di piombo:* la velocità del vento viene determinata misurando l'inclinazione che conferisce a un filo a piombo;

ii) *a palette o coppe:* la velocità del vento è calcolata in base al numero di giri compiuti in un tempo determinato da una ruota imperniata munita di palette e coppette;

iii) *a ultrasuoni:* la velocità del vento viene determinata calcolando il tempo impiegato da un impulso ultrasonico per viaggiare da un trasduttore all'altro;

- **Anemoscopio:** utilizzato per indicare la direzione del vento; i più comuni sono la banderuola e la manica a vento.

- **Pluviometro:** utilizzato per misurare la quantità di pioggia caduta al suolo.

L'obiettivo del progetto consiste nel realizzare una piccola centrale meteorologica in grado di rilevare i parametri atmosferici più importanti: la temperatura, la pressione e la velocità del vento relativa alla stazione. Inoltre, con una semplice interfaccia, è possibile collegare la centrale meteo direttamente ad un personal computer per la visualizzazione dei valori rilevati. I dati acquisiti saranno poi analizzati e confrontati con una stazione professionale in modo da verificarne i parametri base (accuratezza, sensibilità ecc.)



Figura 1.1: Tipica stazione meteo con i sensori precedentemente descritti.

Capitolo 2

Costruzione

Lo schema a blocchi ha la funzione di rappresentare in maniera semplice e immediata l'intero progetto, nelle sue parti più importanti:

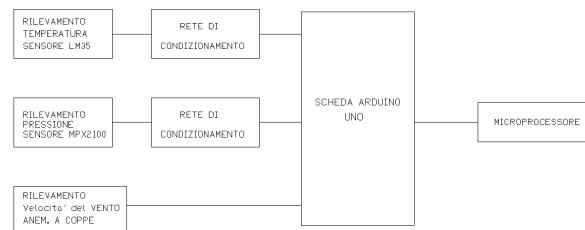


Figura 2.1: Schema a blocchi dell'apparato.

Il primo blocco è costituito da tre trasduttori (sensore di temperatura LM35, sensore di pressione MPXA6115, anemometro a coppe) i quali hanno la funzione di misurare i parametri. I primi 2 sensori forniscono in uscita una tensione direttamente proporzionale al valore del parametro rilevato. I due segnali dovranno essere convertiti in digitale ma, prima che questo avvenga, è necessario amplificarli adeguatamente, in maniera da avere delle tensioni adatte alla dinamica d'ingresso dell'ADC utilizzato (implementato all'interno della scheda Arduino). Per questo motivo è presente il secondo blocco formato da due reti di condizionamento (realizzate con degli amplificatori operazionali), con lo scopo di amplificare i segnali, per fornire in uscita due tensioni comprese tra 0V e 5V. Il terzo sensore fornisce un treno di impulsi quadri in uscita la cui frequenza è proporzionale all'intensità del vento.

Il terzo e il quarto blocco sono realizzati tramite la scheda Arduino la quale effettua la conversione analogico/digitale e tramite un apposito programma ne ricava i valori provenienti dai tre sensori.

2.1 I Trasduttori

In un sistema di acquisizione dati, i trasduttori sono dispositivi che forniscono in uscita una grandezza elettrica funzione di una fisica da rilevare. Una suddivisione comune è quella che distingue i trasduttori attivi, o autogenerativi, da quelli passivi. I primi comprendono per esempio i trasduttori piezoelettrici e le termocoppie, che per effetto della grandezza fisica

applicata in ingresso generano autonomamente un segnale di tensione o di corrente. I trasduttori passivi invece, per poter essere utilizzati richiedono una sorgente di alimentazione esterna chiamata eccitazione; infatti la grandezza in ingresso produce una variazione di un parametro elettrico, come la resistenza, la capacità o un'induttanza, la cui entità controlla il segnale di uscita. Fra i dispositivi di questo tipo, noti anche come trasduttori regolatori, si possono citare gli estensimetri e i termistori. Per la scelta e l'impiego di qualsiasi trasduttore occorre tener conto di alcuni parametri e caratteristiche generali.

Segnale di uscita: è il fattore che maggiormente influisce sulle scelte progettuali di ogni sistema di misura. Diverse sono le esigenze di condizionamento e conversione a seconda che il trasduttore fornisca in uscita un segnale digitale o analogico; diverso è il condizionamento richiesto se la grandezza in uscita è una tensione, eventualmente da amplificare o da linearizzare, oppure una corrente o una resistenza.

Funzione di trasferimento: indica la relazione tra la grandezza rilevata e l'uscita del trasduttore; tale relazione può essere descritta da un'espressione matematica, da una tabella di valori o da una curva sperimentale.

Linearità: nella maggior parte delle applicazioni si richiede che la funzione di trasferimento del trasduttore sia lineare per un ampio intervallo di valori; l'errore di "non linearità" indica lo scarto massimo fra la curva di trasferimento reale e la retta che la interpola.

Sensibilità: esprime il rapporto tra la minima variazione della grandezza di uscita e la corrispondente variazione di ingresso.

Accuratezza: rappresenta l'attitudine di un trasduttore a misurare valori privi di errori sistematici. In linea teorica, esprime la differenza tra il valore privo di errore ed il valore reale in uscita. Può essere espresso dal costruttore in percentuale sull'uscita di fondo scala o in valore assoluto.

Risoluzione: indica la minima variazione dell'ingresso che provoca una variazione in uscita. In caso di conversione A/D, può dipendere fortemente dai bit a disposizione per la conversione.

Caratteristiche dinamiche: specificano il comportamento del trasduttore quando la grandezza da misurare compie brusche variazioni. I parametri utilizzati per definire le prestazioni dinamiche sono, a seconda dei casi, la costante di tempo, il tempo di risposta, ecc. espressi in forma numerica o grafica. Quando si presume che la grandezza in esame vari rapidamente, o con andamento di tipo sinusoidale, vengono riportati i diagrammi di risposta in frequenza.

Dopo aver introdotto i trasduttori, verranno ora analizzati nello specifico i sensori utilizzati nel progetto.

2.2 Sensore di Temperatura LM35

Questo integrato è un preciso trasduttore di temperatura (ad equilibrio) attivo con uscita lineare, direttamente proporzionale alla temperatura esterna in gradi Celsius (fornisce 10mV per ogni grado centigrado di temperatura). La bassa impedenza di uscita ($0,1\Omega$ per 1mA) e l'uscita lineare rendono questo sensore particolarmente semplice da utilizzare, sia con microcontrollori che con strumenti di lettura. Ha un range di temperature misurabili da $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ma nel progetto verrà utilizzato per rilevare da $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Questo componente è molto versatile in quanto può essere alimentato con una tensione variabile da 4V a 20V.

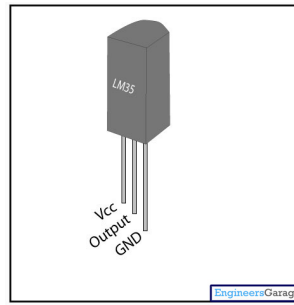


Figura 2.2: Piedinatura LM 35.

Questi tipi di sensori sono detti “a circuito integrato” in quanto basano il loro funzionamento sulle proprietà di giunzione dei semiconduttori (diodi e transistor) di avere una tensione (o corrente) fortemente dipendente dalla temperatura. All’interno di questo integrato sono presenti due transistor identici ($I_{sat1} = I_{sat2}$), funzionanti con un rapporto costante per le correnti di collettore ($I_{C1} = N \cdot I_{C2}$). Sapendo che la tensione che lega base ed emettitore è:

$$\Delta V_{BE} = V_{BE1} - V_{BE2} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{C1}}{I_{C2}} \frac{I_{sat2}}{I_{sat1}}\right)$$

ed inserendo le conoscenze prima citate si ricava che:

$$\Delta V_{BE} = V_{BE1} - V_{BE2} = \frac{kT}{q} \ln(N)$$

Pertanto, misurando la differenza fra le tensioni base-emettitore, si ha un’indicazione proporzionale alla temperatura.

2.3 Sensore di Pressione MPXA6115A

L’MPXA6115 è un trasduttore di pressione attivo di tipo piezoelettrico. Questo sensore è costituito da una membrana, che ricopre una camera a vuoto, la cui compressione o depressione produce una variazione della resistività nei quattro resistori. Quest’ultimi sono collegati in un circuito a ponte di Wheastone: una variazione della loro resistività (direttamente proporzionale alla pressione esterna) produrrà uno sbilanciamento del ponte e, pertanto, una variazione della tensione di uscita direttamente proporzionale alla pressione applicata sulla membrana.

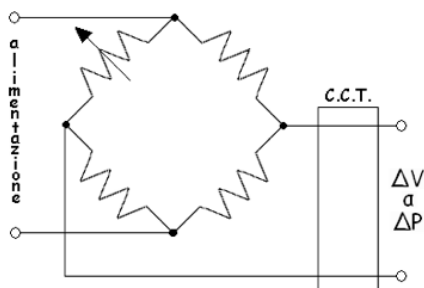


Figura 2.3: Spiegazione teorica del funzionamento del sensore di pressione.

Questi tipi di sensori sono costituiti da silicio e quindi sensibili alla temperatura, perciò necessitano di un C.C.T. cioè un circuito di compensazione della temperatura. L'MPXA6115 è un sensore assoluto in quanto esegue la differenza tra la pressione rilevata ed una “campione” contenuta in un'apposita cella all'interno dell'integrato.

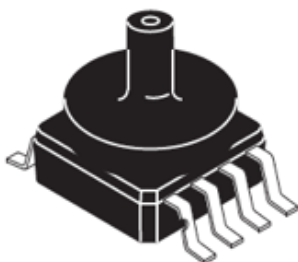


Figura 2.4: MPXA6115.

Esso permette di misurare pressioni fino a 115 kPa mantenendo comunque un buon fattore di linearità

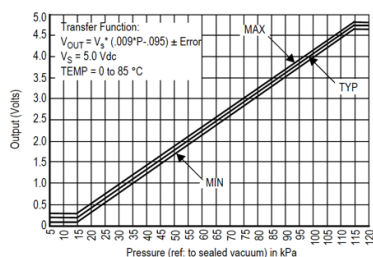


Figure 5. Output vs. absolute pressure

Figura 2.5: Grafico tensione-pressione relativo al sensore.

La pressione che interessa misurare è quella atmosferica, la quale vale all'incirca 101,325KPa.

Per avere una stima grossolana della linearità del sensore nel range di pressioni interessate si effettua la seguente prova sperimentale.

2.3.1 Caratterizzazione sperimentale del sensore di pressione

La prova consiste nel simulare, in laboratorio, la variazione di pressione atmosferica tramite una siringa. Bisogna procurarsi una siringa da 60ml, sulla cui estremità viene fissato un tubicino di plastica in grado di adattarsi al foro adibito al rilevamento della pressione del sensore.

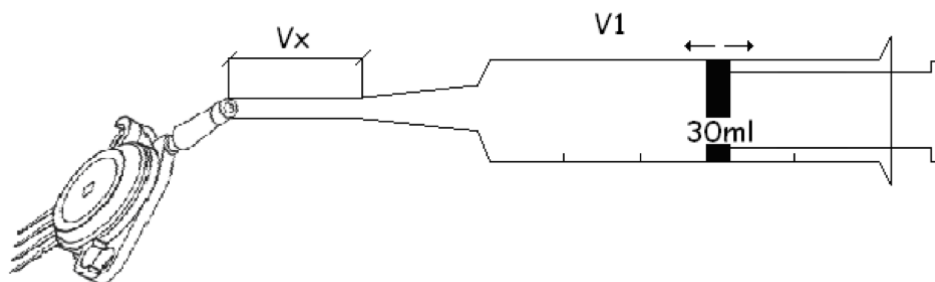


Figura 2.6: Simulazione dell'esperimento in laboratorio.

Inizialmente (a siringa scollegata) si posiziona lo stantuffo a 30ml, in maniera che all'interno della siringa sia presente la pressione ambiente, pari a 1 atmosfera - precisamente 100,9KPa rilevati con un barometro.

N.B.: Lo stantuffo è stato posizionato così in fondo in modo che il volume d'aria contenuto nel tubicino (V_x) sia trascurabile; infatti i 30ml segnati dalla scala graduata della siringa (V_1) non comprendono quella piccola parte di aria contenuta nel tubicino.

In seguito, facendo attenzione a toccare il meno possibile la siringa per evitare un cambiamento della temperatura dell'aria (che provocherebbe una variazione di pressione), si incrementa la pressione, comprimendo il volume dell'aria di 1 ml ad ogni misura. Vengono effettuate anche delle misure di depressione, aumentando il volume dell'aria dello stesso fattore. In questo modo si possono rilevare le variazioni ΔV del sensore in base alla pressione.

A siringa scollegata si hanno i seguenti valori:

$$P_1 = (100,90 \pm 1,50) \text{KPa} - \text{lettura diretta (dal pc)}$$

$$V_1 = (30 \pm 1) \text{ ml} - \text{lettura diretta sulla siringa}$$

$$\Delta V = (4,53 \pm 0,02) \text{V} - \text{multimetro}$$

Variando il volume dell'aria, la pressione aumenta secondo la legge di Boyle (utilizzata in quanto il gas non presenta pressioni eccessivamente elevate e temperature non prossime alla t_c di liquefazione)

$$P * V = \text{costante}$$

perciò

$$P_2 = P_1 * \frac{V_1}{V_2}$$

con P_1 e V_1 rispettivamente la pressione e il volume iniziale.

Per esempio:

$$V_2 = 31ml \quad - > \quad P_2 = 100,9 * \frac{30}{31} = 97,65 KPa$$

Iterando il precedente processo posso ottenere la tabella seguente:

V[ml]	P[KPa]	ΔV	Atmosfere
27,0 ± 0,1	112,11 ± 1,50	5,01 ± 0,21	1,11
28,0 ± 0,1	108,11 ± 1,50	4,48 ± 0,20	1,07
29,0 ± 0,1	104,38 ± 1,50	4,70 ± 0,19	1,03
30,0 ± 0,1	100,90 ± 1,50	4,53 ± 0,19	0,99
31,0 ± 0,1	97,65 ± 1,50	4,42 ± 0,18	0,96
32,0 ± 0,1	94,60 ± 1,50	4,27 ± 0,18	0,94
33,0 ± 0,1	91,73 ± 1,50	4,11 ± 0,17	0,91
34,0 ± 0,1	89,03 ± 1,50	4,00 ± 0,16	0,88

Dall'analisi del grafico si può notare come l'errore di linearità sia basso:

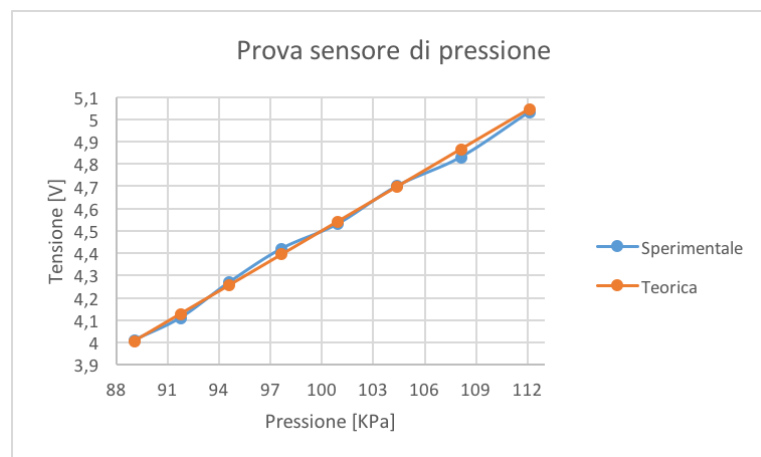


Figura 2.7: Grafico tensione-pressione.

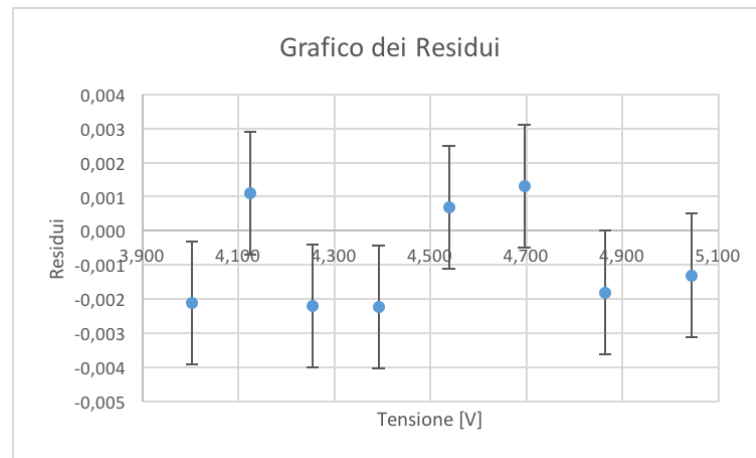


Figura 2.8: Grafico dei residui.

$$y=ax+b$$

a[V/KPa]	b[V]
$0,044 \pm 0,001$	$0,098 \pm 0,087$

Indice di correlazione lineare (r) tra i dati: 0,997

Il segnale in uscita varia da un minimo di 0,2 V ad un massimo di 4,7V - 45mV/KPa nel range di pressione lineare.

Come mostrato nel grafico e dall'indice di correlazione, il sensore presenta un'ottima linearità nell'intervallo delle pressioni atmosferiche.

2.4 Anemometro a coppe

Il funzionamento è basato su un interruttore magnetico "reed" che viene aperto/chiuso al passaggio di un piccolo magnete montato sulla parte rotante dello strumento.

Il sensore ha un cavo bipolare, alimentato a 5V, per ottenere un impulso ad ogni giro del magnete (in sostanza il segnale proveniente dall'uscita è un'onda quadra).

Le specifiche dichiarate dal costruttore sono: 4 impulsi al sec corrispondono ad una velocità di 10 km/h.

Il sensore non necessita quindi di un c.d.c perciò viene collegato direttamente alla basetta Arduino.

Nel segnale d'uscita sottostante si nota un "allungamento" della durata delle pulsazioni mentre il sensore rallenta la rotazione (i punti indicati dalle frecce sono il riferimento per il calcolo della velocità):

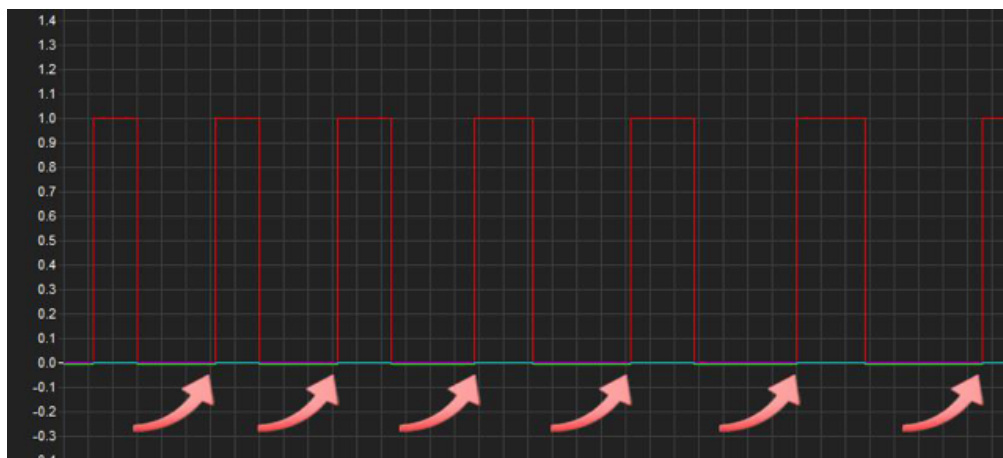


Figura 2.9: Esempio segnale di uscita dall'anemometro.

Il programma deve, sostanzialmente, calcolare il numero di impulsi al secondo, da riportare ai quattro di riferimento, per ottenere la velocità del vento. Si deve determinare il tempo che intercorre tra due impulsi successivi, che chiameremo “durata”. Si calcola il numero degli impulsi tramite la seguente:

$$impulsi = \frac{1000}{durata(s)}$$

Tramite una proporzione, si ricava la velocità:

$$velocità(Km/h) = \frac{1000}{durata(s)} \frac{10}{4} = \frac{2500}{durata(s)}$$

Nel codice sono stati implementati particolari cicli di protezione e ottimizzazione opportunamente descritti nella parte software.

Capitolo 3

Realizzazione

3.1 Condizionamento dei segnali

Questa parte ha il compito di effettuare un’elaborazione del segnale generato dal trasduttore per adattarlo, in questo caso, ad un convertitore analogico/digitale. I segnali forniti dai trasduttori sono, in genere, di piccola ampiezza, mentre i convertitori necessitano di tensioni d’ingresso dell’ordine dei volt (0V/5V nel caso della basetta Arduino). Per questo motivo è consigliabile provvedere ad un’adeguata amplificazione del segnale, in modo che il suo range sia compatibile con quello del convertitore. Utilizzando un amplificatore operativo si sfrutta al massimo la risoluzione del convertitore e si ottiene complessivamente una maggiore precisione ed una maggiore sensibilità del sistema di acquisizione.

La serie di resistenze utilizzate è la E12. Occorre quindi una normalizzazione del valore delle resistenze ricavate per via analitica.

3.1.1 Sensore di temperatura

Il segnale dell’LM35 varierà da -0,4V a +0,4V all’uscita della seguente configurazione:

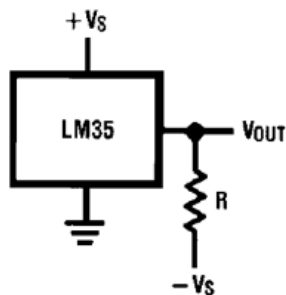


Figura 3.1: Particolare configurazione.

Nei data sheet viene fornita la formula necessaria per calcolare il valore di R; sapendo che $I = 50\mu A$ e impostando $V_s = 12V$ risulterà:

$$R = \frac{V_s}{I} = 240K\Omega$$

Questo valore verrà normalizzato a $270\text{K}\Omega$.

Per ottimizzare la conversione dell'ADC bisognerà amplificarlo in maniera da ottenere una tensione variabile tra 0V e 5V . Per prima cosa bisognerà eliminare le tensioni negative traslando il segnale verso l'alto con un sommatore non invertente che aggiunga $0,4\text{V}$ all'uscita del sensore:

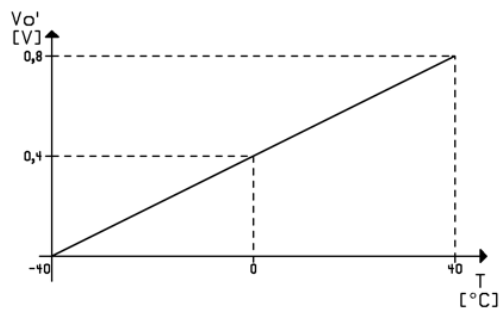


Figura 3.2: "Visualizzazione" teorica del segnale dopo il primo stadio.

Infine, collegando l'uscita del sommatore con un amplificatore non invertente, il segnale verrà amplificato in maniera da ottenere una V_o da 0V a 5V .

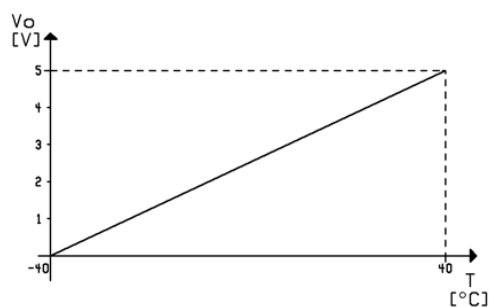


Figura 3.3: "Visualizzazione" teorica del segnale dopo il circuito di condizionamento.

La rete che realizza queste "operazioni" è la seguente:

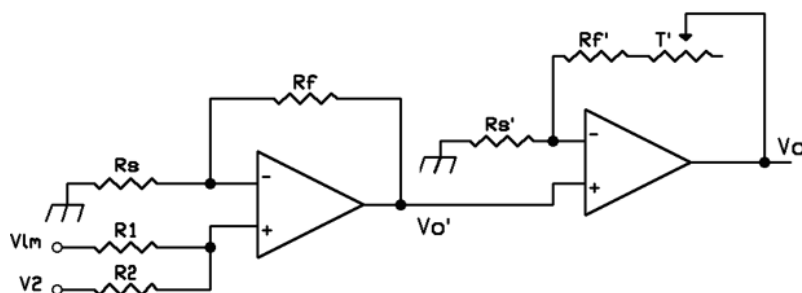


Figura 3.4: Circuito di condizionamento dell' LM35.

Partitore di tensione

Per ottenere V_2 , cioè 0,4V da sommare alla tensione in uscita dall'LM35, viene utilizzato un partitore di tensione:

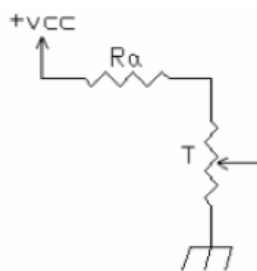


Figura 3.5: Configurazione per generare la tensione somma.

Considerato che il valore del trimmer T deve essere molto minore (almeno un ordine di grandezza) rispetto al valore delle due resistenze R1 e R2 (minore caduta di tensione possibile all'ingresso non invertente), verrà inizialmente impostato a 270Ω. Supponendo la resistenza di ingresso dell'operazionale molto maggiore di T, si fissa la corrente in $R_a + T$ in modo che la tensione nel punto di congiunzione tra R_a e T sia (abbastanza) maggiore di 0,4V (es. circa 0,8V - 1V).

Applicando la formula del partitore di tensione per il calcolo di R_a , con V tensione tra R_a e T:

$$V_{cc} * \frac{T}{R_a + T} = V > 0,4V = V_2 \quad - > R_a = 7830\Omega$$

Non essendo R_a un valore normalizzato, verrà scelta una resistenza di 6.8KΩ. È necessario però ricalcolare il valore del trimmer:

$$\frac{R_a + T}{T} = \frac{V_{cc}}{V_2} \quad - > T = 234\Omega$$

Dopo aver normalizzato i valori del trimmer (500 Ω) e della resistenza, la tensione massima

presente al sommatore sarà:

$$V_{2max} = V_{cc} * \frac{T}{R_a + T} = 0,8V$$

Primo stadio - sommatore non invertente

L'obiettivo di questo amplificatore è sommare al segnale in uscita dall'LM35 una tensione fissa di 0,4V. Utilizzando la formula del sommatore non invertente la V'_o vale:

$$V'_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_s}\right) * \frac{V_{LM} + V_2}{2}$$

Per fare in modo che l'uscita sia la somma dei due segnali in ingresso si deve ottenere un'amplificazione pari a 2 (indicando con A l'amplificazione):

$$A = \left(1 + \frac{R_f}{R_s}\right) \rightarrow R_f = R_s$$

R_f ed R_s possono essere scelte a piacere ($\sim K\Omega$), mentre per R1 ed R2 devono essere scelti dei valori che siano almeno dieci volte superiori al valore del trimmer T del partitore: questo per avere una impedenza molto alta, in modo da trascurare la corrente in ingresso all'operazionale. Vengono scelte:

$$R1 = R2 = 47K\Omega$$

$$R_f = R_s = 22K\Omega \text{ (per limitare l'offset introdotto dall'amplificatore operazionale)}$$

In questo modo l'uscita dal primo stadio di amplificazione sarà:

$$V'_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_s}\right) * \frac{V_{LM} + V_2}{2} = V_{LM} + V_2$$

Secondo stadio - Amplificatore non invertente

L'obiettivo di questo stadio è amplificare il segnale in uscita dal sommatore in modo da avere una tensione V_o compresa tra 0V e 5V (l'amplificazione deve essere lineare).

$$0V \leq V'_o \leq 0,8V$$

$$0V \leq V_o \leq 5V$$

Analogamente al caso precedente, la tensione di uscita V_o sarà:

$$V_o = \left(1 + \frac{R'_f}{R'_s}\right) * V'_o$$

Basterà analizzare i due casi limite per dimensionare correttamente i valori di R'_s e R'_f :

1. Per $V'_o = 0V$ l'uscita V_o deve valere 0V:

$$V_o = \left(1 + \frac{R'_f}{R'_s}\right) * V'_o = V_o = \left(1 + \frac{R'_f}{R'_s}\right) * 0 = 0V$$

2. Per $V'_o = 0,8V$ l'uscita V_o deve valere $5V$:

$$V_o = \left(1 + \frac{R'_f}{R'_s}\right) * V'_o = V_o = \left(1 + \frac{R'_f}{R'_s}\right) * 0,8 = 5V$$

$$\frac{R'_f}{R'_s} = 5,25$$

per ottenere la giusta amplificazione R'_f deve essere $5,25$ volte il valore di R'_s , perciò:

$$R'_s = 10K\Omega$$

$$R'_f = 52,5K\Omega$$

A causa dell'elevata precisione, si può scegliere un valore di R_f pari a $47K\Omega$; in serie a R_f verrà inserito un trimmer (T') da $10K\Omega$ da tarare correttamente per avere il guadagno desiderato.

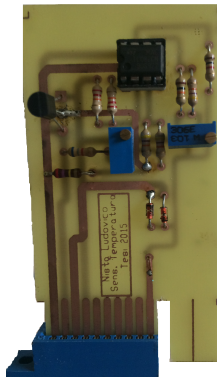


Figura 3.6: Sensore di temperatura con circuito di condizionamento.

3.1.2 Sensore di pressione

Il sensore di pressione precedentemente descritto contiene al suo interno un opportuno circuito di condizionamento. Quest'ultimo amplificherà correttamente la tensione proveniente dal sensore in modo che sia possibile convertirla in digitale. Data la sensibilità dello strumento, si utilizza la seguente configurazione per evitare che la tensione di alimentazione e successivamente quella di uscita oscillino in modo da falsarne la misura.

Questo sensore sarà contenuto in una scatola posta all'esterno, opportunamente isolata. A causa di ciò, vicino all'MPXA verrà posto un LM 35 (analogo al precedente) in modo da ricavare la temperatura all'interno dell'involucro.

Questo è utile in quanto la pressione varia in funzione della temperatura. Come precedentemente detto, all'interno del sensore è presente una pressione campione; all'aumentare della temperatura, la pressione campione aumenta. La differenza di pressione tra quella esterna e quella campione (cioè quella misurata), quindi, diminuisce, e viceversa per una diminuzione di temp.: si inserisce un sensore di temperatura per verificare eventuali anomalie di pressione.

Il sensore LM35 non sarà previsto di un opportuno circuito di condizionamento in quanto si vuole ricavarne solo una stima grossolana ($\pm 1^\circ C$).

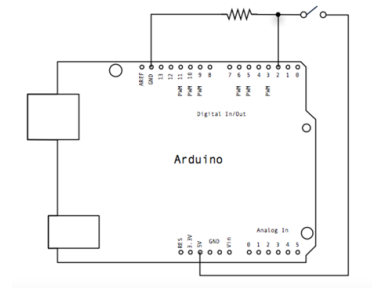


Figura 3.10: Schema circuitale (l'anemometro è schematizzato come un interruttore).



Figura 3.11: Anemometro a coppe.

3.2 Software

I segnali precedentemente descritti saranno visualizzati ed elaborati da un software. Il software di elaborazione è stato implementato tramite un client interno di Arduino (una sorta di C++ semplificato). I pin di input dei sensori sono $A_0, A_1, A_2, 2$ (tre analogici ed uno digitale). Tramite un ADC interno viene effettuata la conversione A/D. In appendice è riportata la parte di codice relativa a questo processo.

Capitolo 4

Caratterizzazione

Questo capitolo ha il compito di descrivere i risultati acquisiti confrontandoli con una stazione meteo professionale. Quest'ultima sarà usata come taratura: ciò significa che sarà utilizzata per verificare incertezza, sensibilità, ecc dei sensori presenti nel progetto e/o eventuali anomalie. Il periodo di acquisizione è di 6 giorni. Il periodo di campionamento per i sensori di temperatura e per l'anemometro è di cinque minuti, mentre quello di pressione è di trenta minuti.

Per semplicità, vengono analizzate separatamente le tre grandezze rilevate mostrandone i grafici giornalieri.

In appendice si allegano alcune foto del progetto montato e funzionante.

4.1 Analisi: Temperatura

Come precedentemente detto, i sensori di temperatura presenti nel progetto sono due: uno esterno (comprensivo di circuito di condizionamento) e uno interno (dentro la scatola).

4.1.1 Temperatura esterna

Questo sensore non è stato inserito in un opportuno schermo solare, bensì in un contenitore per antenne a causa di un problema tecnico. Lo schermo solare ha la funzione di proteggere il sensore dai raggi solari, nella fase diurna, e dalla radiazione infrarossa, nella fase notturna, mantenendo comunque un'adeguata circolazione dell'aria.

Di seguito sono riportati i grafici giornalieri rilevati, con confronto alla stazione professionale (blu - stazione professionale, arancio - progetto).

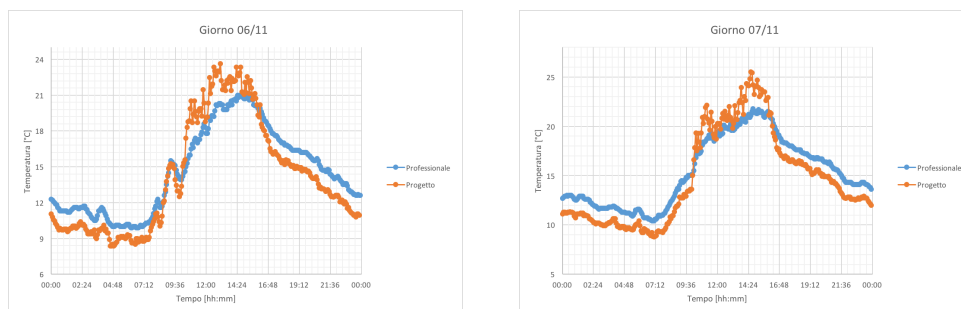


Figura 4.1: Primo e secondo giorno di acquisizione

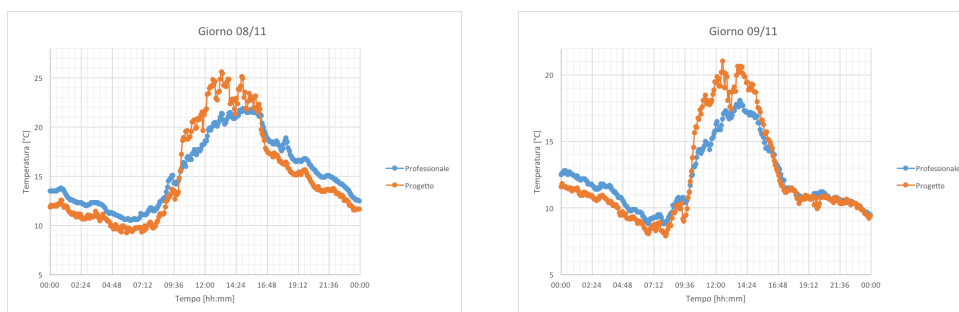


Figura 4.2: Terzo e quarto giorno di acquisizione

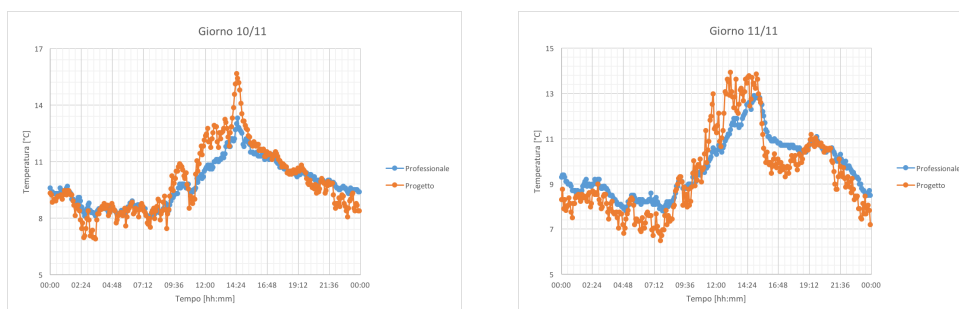


Figura 4.3: Quinto e sesto giorno di acquisizione

Come si può notare dai grafici, sono da analizzare in modo differente due zone: quella notturna, priva di radiazione solare e quella diurna. Questo effetto si poteva presupporre a posteriori; durante il giorno si ha un riscaldamento dovuto alla radiazione solare mentre durante la notte un raffreddamento dovuto alla radiazione infrarossa.

In quest'ultima è presente chiaramente un effetto sistematico non imputabile ad un offset elettronico. Con una attenta analisi si verifica questa sistematicità giorno per giorno.

Se si vuole ottenere una stima grossolana della precisione del sensore si può considerare la sola parte notturna. La precisione risultante però sarà sovrastimata in quanto gli effetti sistematici sopra citati non sono trascurabili.

Si considera il periodo di acquisizione dalle ore 16.30 alle ore 9.30, eguale per qualsiasi acquisizione.

Errore primo giorno: -1,38 °C Precisione: 0,24 °C

Errore secondo giorno: -1,52 °C Precisione: 0,09 °C

Errore terzo giorno: -1,34 °C Precisione: 0,05 °C

Errore quarto giorno: -0,47 °C Precisione: 0,54 °C

Nelle ultime 2 giornate, come si vede dai grafici, non è presente un errore sistematico, bensì delle oscillazioni anomale in qualsiasi parte della giornata. Non ha senso quindi calcolare il contributo.

Sulla stima delle prime 4 giornate, la correzione può essere stimata come:

Errore sistematico totale: -1,18 °C Precisione: 0,18 °C

Questi effetti sistematici sono confermati dai diagrammi degli scarti come riportato in seguito:

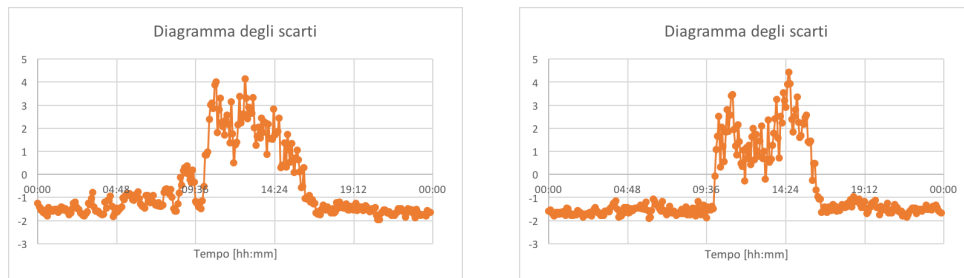


Figura 4.4: Primo e secondo giorno di acquisizione

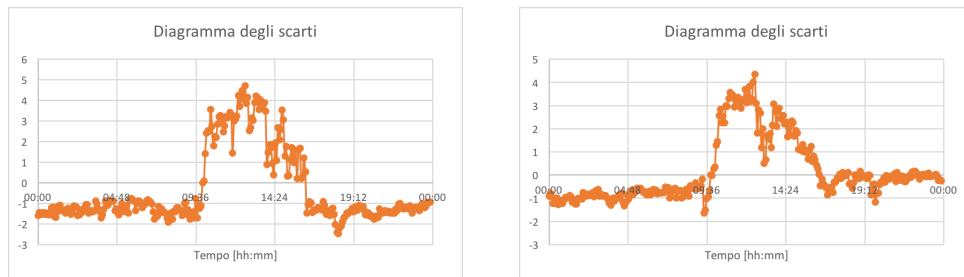


Figura 4.5: Terzo e quarto giorno di acquisizione

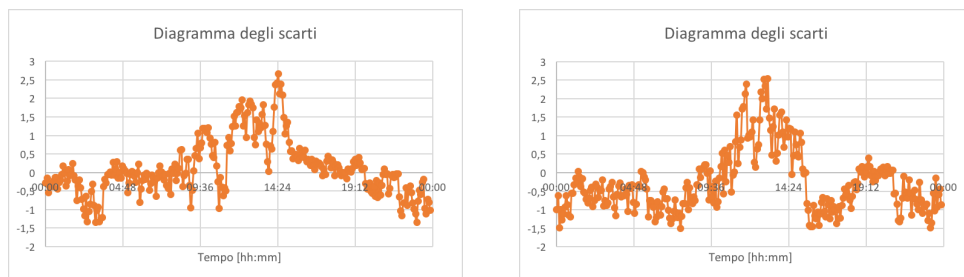


Figura 4.6: Quinto e sesto giorno di acquisizione

Per quanto riguarda la parte diurna, è lecito supporre che le oscillazioni e le anomalie temperature siano dovute alla mancanza di uno schermo solare. Questo contributo sarà valutato dopo aver preso in considerazione anche la temperatura del sensore interno per verificarne l'andamento.

Nelle ultime due giornate, come già detto sono presenti oscillazioni continue: questo può essere attribuito a delle giornate con umidità elevata. Infatti, essendo stati giorni di nebbia, la mancanza di un irraggiamento completo può aver compromesso l'acquisizione. I dati quindi non risentono di un effetto sistematico dovuto all'assenza dello schermo solare ma solamente ad oscillazioni casuali.

Calcolo della sensibilità del sensore:

$T[^\circ \text{C}]$	$V_{sens}[\text{V}]$	$V_{ard}[\text{V}]$	Bit
-40	-0,4	0	0
+40	+0,4	5	1023

Il passo di quantizzazione risulta:

$$Q = \frac{\Delta V_{ard}}{\Delta N} = \frac{5}{1024} = 4,88mV$$

Impostando la seguente proporzione si ricava la sensibilità:

$$80 : 1024 = x : 1$$

$x=0,08$ °C - Sensibilità teorica del sensore di temperatura

La sensibilità sperimentale risulta: $0,06$ °C

La sensibilità sperimentale risulta ridotta in quanto possono esserci stati dei disturbi nella conversione A/D. Ad esempio, il fondoscala di riferimento può essere leggermente più alto (circa $5,3$ V).

4.1.2 Temperatura interna

In fase di montaggio, a causa dell'assenza dello schermo solare, è stato modificato l'utilizzo del sensore di temperatura interno. Esso verrà utilizzato come sensore di temperatura di calibrazione; nelle ore più calde la scatola contenente il sensore precedente potrebbe scaldarsi falsando la misura. Dato che la scatola contenente la scheda madre del progetto è posta in una zona d'ombra si può prendere come dato effettivo questo, tralasciando il sensore esterno.

Come nella sezione precedente, sono mostrati i grafici di confronto giornalieri.

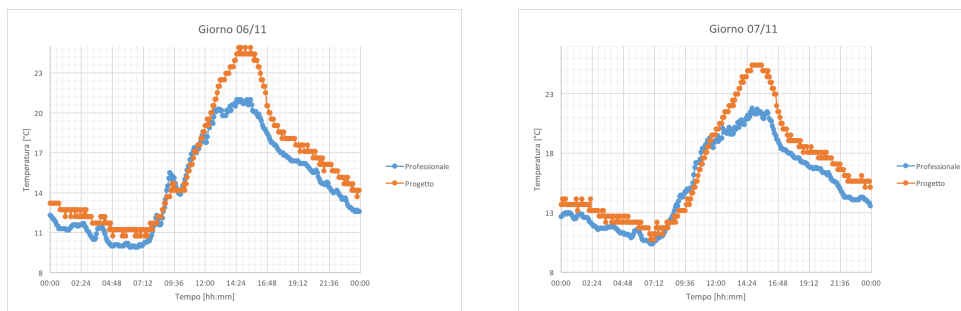


Figura 4.7: Primo e secondo giorno di acquisizione

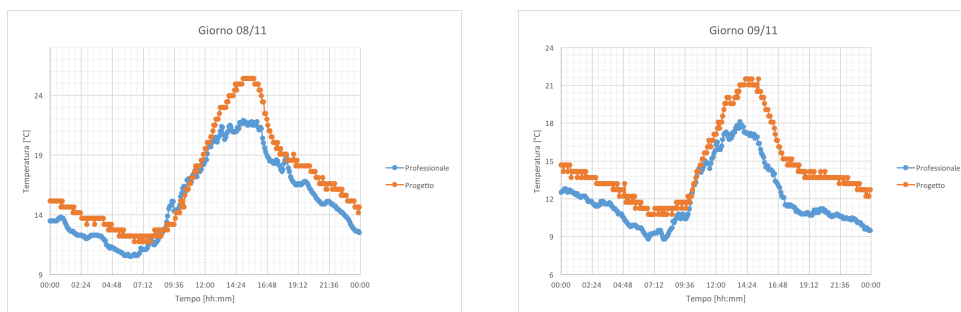


Figura 4.8: Terzo e quarto giorno di acquisizione

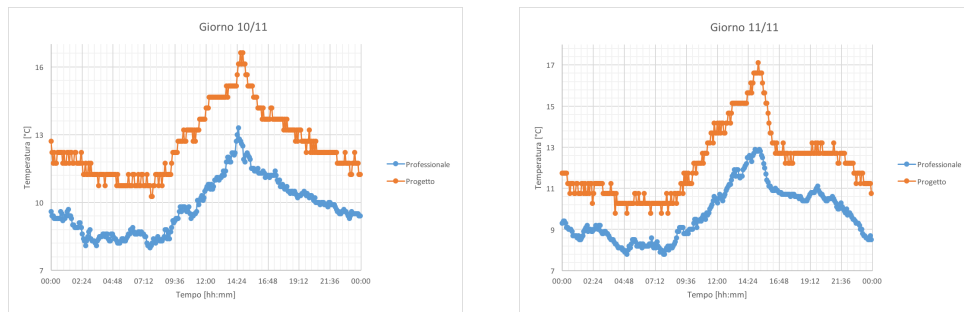


Figura 4.9: Quinto e sesto giorno di acquisizione

Anche in questo caso è chiaro come nella parte notturna sia presente un offset "termico" cioè dovuto alla mancanza dello schermo; questo contributo però non è interessante nel seguente caso, per due motivi:

1. non è presente un opportuno circuito di condizionamento perciò la sensibilità è minore rispetto al sensore precedente;
2. questo sensore serve solo per valutare il contributo dello schermo solare nella fase diurna.

In relazione a quanto detto nell'analisi precedente, è presente un effetto "termico" solo nelle prime quattro giornate. Nelle ultime due è presente solo un errore sistematico (durante l'intera giornata) non imputabile alla radiazione solare. Bisogna precisare che nei giorni 10/11 e 11/11 c'è stata una densa nebbia e quindi un'assenza di radiazione solare. Ciò rispecchia chiaramente l'andamento mostrato dovuto solamente ad un errore sistematico. Volendo ricavarne una stima, questa è $1,64\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Altro effetto cosiderevole è la traslazione del segnale arancio rispetto al blu. Questo è dovuto al tempo di termalizzazione della scatola, molto più lungo rispetto a quello del sensore interno. Risulta quindi un segnale che "segue" quello di taratura traslato in avanti del tempo di termalizzazione.

Calcolo della sensibilità del sensore:

T[° C]	V_{sens} [V]	V_{ard} [V]	Bit
0	0	0	0
+40	+0,4	0,4	1023

Il passo di quantizzazione risulta:

$$Q = \frac{\Delta V_{ard}}{\Delta N} = \frac{0,4}{1023} = 0,39mV$$

Impostando la seguente proporzione si ricava la sensibilità:

$$5 : 1024 = 0,4 : x$$

$x=0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ - Sensibilità teorica del sensore di temperatura

La sensibilità sperimentale risulta: $0,49\text{ }^{\circ}\text{C}$

4.2 Analisi: Pressione

In questa sezione sono presentati i grafici di confronto relativi alla pressione atmosferica.

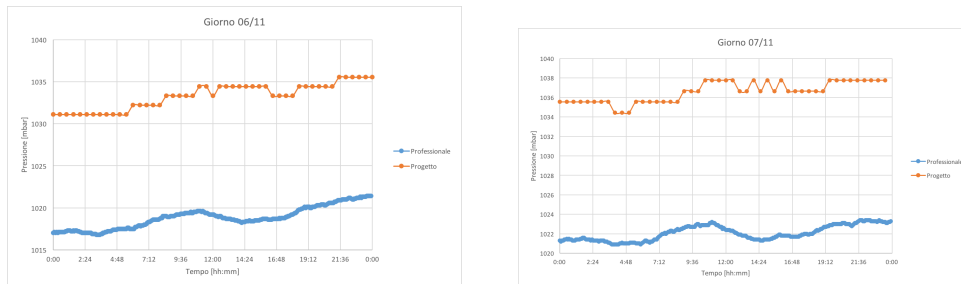


Figura 4.10: Primo e secondo giorno di acquisizione

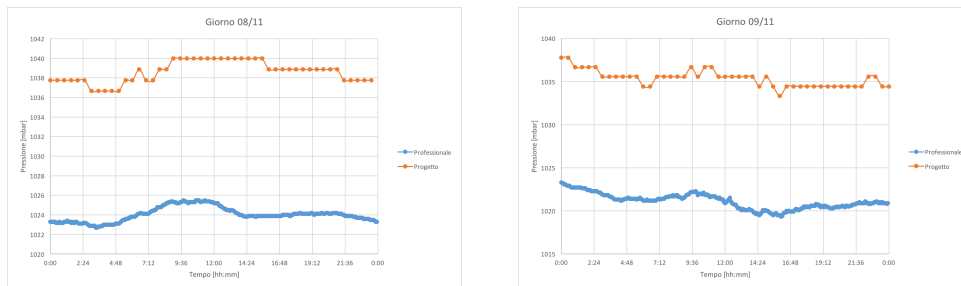


Figura 4.11: Terzo e quarto giorno di acquisizione

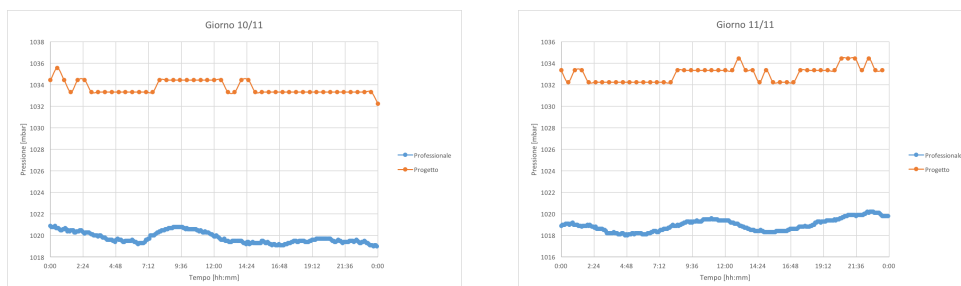


Figura 4.12: Quinto e sesto giorno di acquisizione

Come si può notare dai grafici, anche in questo caso è presente un effetto sistematico. Con una attenta analisi si verifica che:

<i>Errore primo giorno:</i> 14,66 mbar	<i>Precisione:</i> 0,71 mbar
<i>Errore secondo giorno:</i> 14,52 mbar	<i>Precisione:</i> 0,71 mbar
<i>Errore terzo giorno:</i> 14,59 mbar	<i>Precisione:</i> 0,70 mbar
<i>Errore quarto giorno:</i> 14,26 mbar	<i>Precisione:</i> 0,56 mbar
<i>Errore quinto giorno:</i> 13,94 mbar	<i>Precisione:</i> 0,43 mbar
<i>Errore sesto giorno:</i> 14,07 mbar	<i>Precisione:</i> 0,47 mbar

In conclusione per una misura corretta della pressione bisogna sottrarre:
Errore sistematico totale: 14,34 mbar
Precisione: 0,51 mbar

Si riportano i grafici degli scarti per verificarne l'attendibilità:

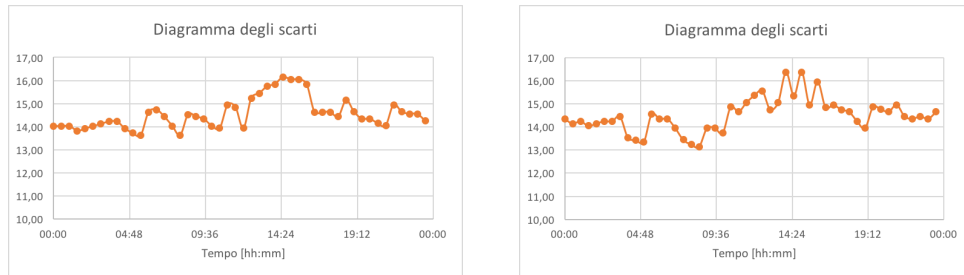


Figura 4.13: Primo e secondo giorno di acquisizione

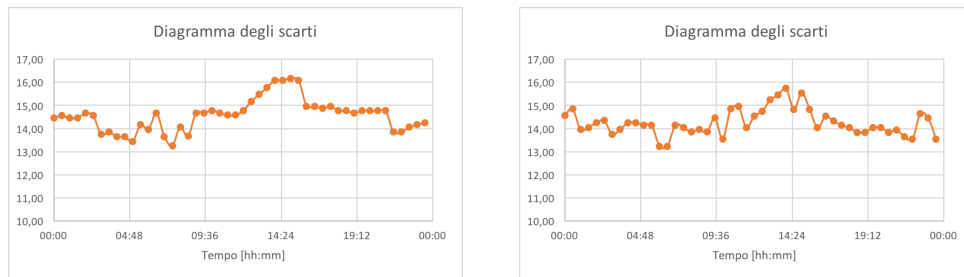


Figura 4.14: Terzo e quarto giorno di acquisizione

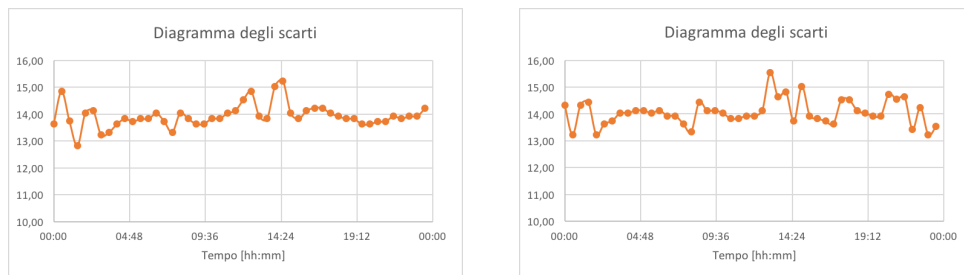


Figura 4.15: Quinto e sesto giorno di acquisizione

Un altro aspetto da considerare è la bassa sensibilità del sensore. Seguendo le stesse considerazioni precedenti si ricava che la sensibilità teorica è: 0,98 mbar. La sensibilità sperimentale risulta essere: 1,04 mbar.

4.3 Analisi: Velocità del vento

In questa sezione sono presentati i grafici di confronto relativi alla velocità del vento (blu - anemometro professionale, arancio - anemometro progetto).

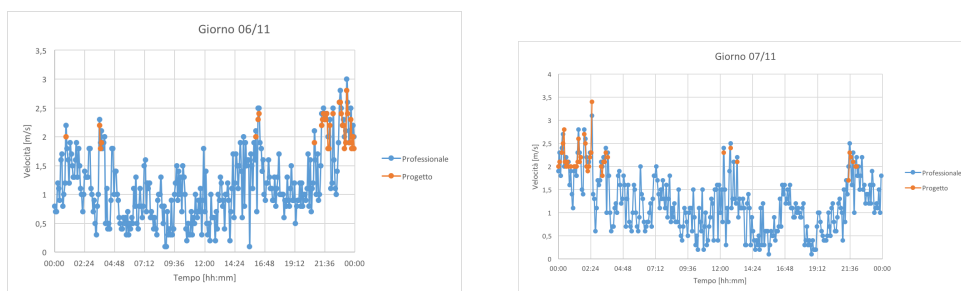


Figura 4.16: Primo e secondo giorno di acquisizione

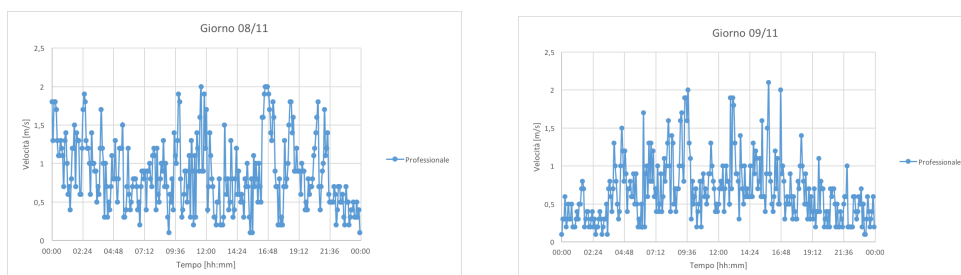


Figura 4.17: Terzo e quarto giorno di acquisizione

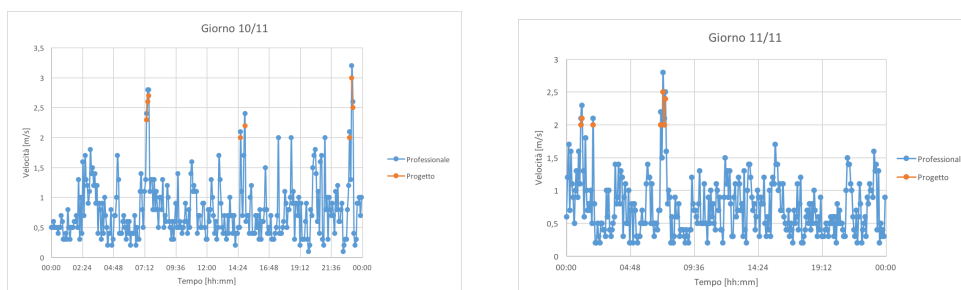


Figura 4.18: Quinto e sesto giorno di acquisizione

Come si può notare dai grafici, l'anemometro ha una "soglia di attivazione" molto più alta rispetto all'anemometro professionale. In effetti, nei giorni 08/11 e 09/11 non è presente neanche un'acquisizione (dell'anemometro del progetto) in quanto la velocità del vento non ha mai superato i 2 m/s.

Nei restanti giorni, l'anemometro ha funzionato solamente se veniva superata la soglia. E' presente un errore sistematico di circa 0,2 m/s ed una sensibilità di circa 0,1 m/s ma questi non possono essere presi come valori attendibili date le scarse misurazioni.

Capitolo 5

Conclusioni

Lo scopo del progetto era di valutare, tramite sensori a basso costo, le tre grandezze fondamentali e caratterizzare i trasduttori con i parametri più importanti.

L'acquisizione di *temperatura esterna* è stata sicuramente influenzata dalla mancanza di uno schermo solare professionale. Questo ha comportato errori sistematici e anomalie. Nel complesso il sensore rispecchia le caratteristiche indicate dal costruttore con un'ottima sensibilità e precisione (grazie anche al circuito di condizionamento).

Il sensore di *temperatura interno* è stato utile per evidenziare delle anomalie ma certamente necessita di un c.d.c in caso di impiego nell'ambito meteorologico.

Per quanto riguarda la *pressione*, il sensore ha una bassa sensibilità; esso è più adeguato a misurare pressioni più elevate di quella atmosferica, oppure per pressioni differenziali accoppiandone due. Di seguito è mostrata una possibile soluzione per aumentare la sensibilità nel caso si voglia misurare la pressione atmosferica:

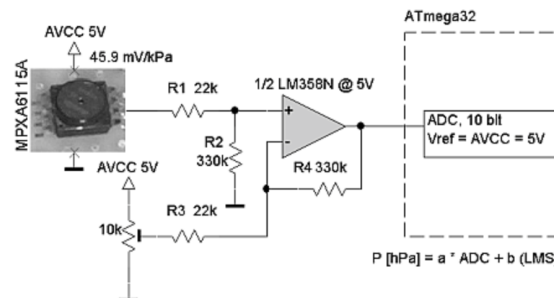


Figura 5.1: Possibile soluzione per il sensore di pressione.

Infine, l'*anemometro* è un sensore di scarsa qualità o quantomeno non per un uso meteorologico. La soglia di attivazione risulta di 2 m/s, con una sensibilità di 0,1 m/s (molto buona per un anemometro a coppe).

In conclusione, i sensori di temperatura e pressione si sono comportati molto bene nel range di temperature e pressioni previste, vista anche l'economicità e la mancanza di accorgimenti tecnici. L'anemometro non è adatto per misurazioni di tipo meteorologico.

Capitolo 6

Appendice

LISTATO SOFTWARE

```
//Gestione raffiche
unsigned long int TempoMax = 2000;

void setup() {
  Serial.begin(9600); //attiva la porta seriale
  pinMode(reedPin, INPUT); // mette in ascolto del reed il pin 2
}

//-----
// loop principale
//-----

void loop()
{
  Statoreed = digitalRead(reedPin); // legge il contatto reed
  if (Statoreed != Statoreed_old) // si verifica se è cambiato
  {
    Statoreed_old = Statoreed; // se SI si aggiorna lo stato
    Serial.println(" ANEMOMETRO: ");
    if (Statoreed == HIGH) // si controlla SE è alto ( passaggio magnete)
    {
      if (Conteggio == 0){ TempoStart = millis();} // se E' il primo passaggio
      // si memorizza il tempo di partenza
      Conteggio = Conteggio + 1; // si aggiorna il contatore

      Tempo = ( millis() - TempoStart); // si conteggia il tempo trascorso dallo start

      if (Tempo >= TempoMax) // se il tempo trascorso è maggiore o uguale al tempo impostato
      // si eseguono i calcoli e la stampa della velocità
      {
        float deltaTempo = ( Tempo/1000.0); // si trasforma in secondi
        float Metris= (Conteggio*Pi*raggio)/deltaTempo; // si calcola la veloc. in m/s

        //float Kmora = (3.6*Conteggio*Pi*raggio)/deltaTempo; //formula per il calcolo della velocità
        // in Km/h
        //float Node = (Metris/0.514444); // si porta in nodi

        //-----
        // stampa i valori sul monitor
        //-----
        Serial.print("Velocità m/s = ");
        Serial.println(Metris);
        //Serial.print("Velocità nodi = ");
        //Serial.println(Node);
        //Serial.print("Velocità Km/h = ");
        //Serial.println(Kmora);

        Conteggio = 0; // azzeriamo il conteggio per nuova lettura
        delay(3000); // attesa per altra lettura
      }
    }
  }
}
```

Figura 6.1: Software di gestione dell'anemometro.

```

void loop() {
  float celsius = 0; // temperature variables
  //float farhenheit =0;
  float volts; //dichiarazione di variabile tensione (float è per i numeri con la
  virgola)
  int intsensor = analogRead(A0); //lettura valore del sensore LM35 messo
  sull'ingresso analogico A0
  //formula per ottenere la tensione di uscita dell'LM35 in millivolts
  celsius =(analogRead(A0)*(0.07827789))-40; // valore espresso in gradi Celsius
  (l'out del sensore è 10mv per grado)
  //farhenheit=celsius*1.8+32; // valore espresso in gradi Farhenheit
  Serial.print("Temperatura esterna: ");
  Serial.print(celsius);
  Serial.println(" gradi Celsius"); // stampa su serial monitor del valore di
  temperatura in gradi Celsius
  //Serial.print(farhenheit);
  //Serial.println(" F");

  float sensorValue = analogRead(A1); // read the input on analog pin 0:
  float tensione, P, Pmbar;
  // print out the value you read:
  tensione= sensorValue*0.0049;
  //'P=(sensorValue*0.0049/3.3+0.095)/0.009;'
  Pmbar=((analogRead(A1))*(0.0048828125)/4.8)+0.095)/0.0009;

  //Serial.println(tensione);
  //Serial.println(P);
  Serial.print("Pressione atmosferica: ");
  Serial.print(Pmbar);
  Serial.println (" mbar");

  const int pin = 3; // analog pin
  float celsius_S = 0, farhenheit_S =0; // temperature variables
  float millivolts_S; //dichiarazione di variabile tensione (float è per i numeri con
  la virgola) int sensor;
  int sensor_S;
  sensor_S = analogRead(pin); //lettura valore del sensore LM35 messo sull'ingresso
  analogico A0
  millivolts_S = ( sensor_S/1023.0)*5000; //formula per ottenere la tensione di uscita
  dell'LM35 in millivolts
  celsius_S =millivolts_S/10; // valore espresso in gradi Celsius (l'out del sensore è
  10mv per grado) farhenheit=celsius*1.8+32; // valore espresso in gradi Farhenheit
  //farhenheit_S=celsius*1.8+32;
  Serial.print("Temperatura scatola: ");
  Serial.print(celsius_S);
  Serial.println(" gradi Celsius"); // stampa su serial monitor del valore di
  temperatura in gradi Celsius
  //Serial.print(farhenheit);
  //Serial.println(" gradi Farhenheit");
  Serial.println("");
  Serial.println("");
  delay(3000); // attesa per altra lettura
}

```

Figura 6.2: Software di gestione dei sensori di temperatura e pressione.

Note:

- Per una maggiore efficienza di visualizzazione ogni 3 sec vengono visualizzati i parametri acquisiti;
- Per evitare la misurazione di brevi folate di vento è presente un software di gestione delle raffiche;
- Per una maggiore funzionalità ogni dato è espresso nelle più comuni ed utilizzate unità di misura.

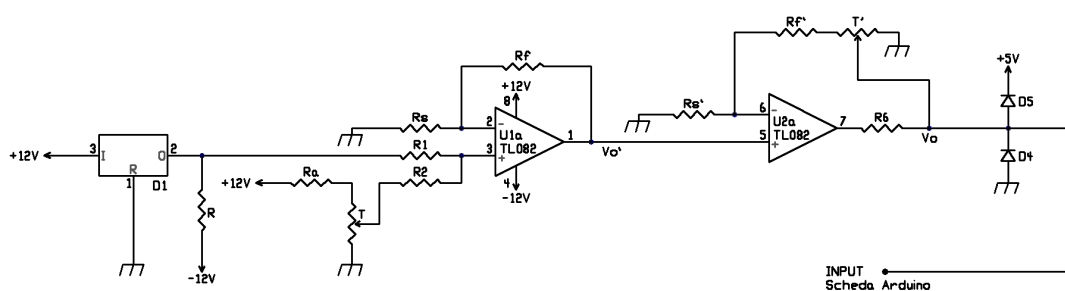
FOTO DEL PROGETTO



Figura 6.3: Progetto montato sulla torretta del dipartimento.

SCHEMA CIRCUITALE

Per completezza si inserisce lo schema elettrico riferito al sensore di temperatura:



LEGENDA

COMPONENTE	VALORE	COMPONENTE	VALORE
R	270kohm	D1	LM35
Ra	6,8Kohm	D2	LM336\2.5V
R1,R2	47Kohm		
RF,Re	10Kohm		
RF'	20Kohm		
Re'	10Kohm		
R6	3,3kohm		
T	500ohm		

Figura 6.4: Schematico sensore di temperatura.

Capitolo 7

Ringraziamenti

Desidero ricordare tutti coloro che mi hanno aiutato nella stesura della tesi con suggerimenti, critiche ed osservazioni: a loro va la mia gratitudine.

Ringrazio anzitutto il professor Marcello Lunardon, Relatore, ed la professoressa Luisa Dal Pozzo, Co-relatrice: senza il loro supporto e la loro guida questa tesi non esisterebbe.

Proseguo ringraziando il Prof. Renzo Bardelle per il profondo aiuto nella realizzazione del progetto, l'istituto Zuccante di Mestre per la disponibilità nell'utilizzo dei laboratori, il Dott. Luca Stevanato e il Sig. Marco Caldugno, per l'aiuto nella fase di collaudo ed analisi dati.

Un ringraziamento particolare va ai colleghi ed agli amici che mi hanno incoraggiato o che hanno speso parte del proprio tempo con il sottoscritto.

Vorrei infine ringraziare le persone a me più care: i miei amici, la mia famiglia ed infine la mia fidanzata, a cui questo lavoro è dedicato.

Bibliografia

- [1] Sacchi E. (2011), *Elettronica Digitale. Analisi e progetto di circuiti logici.*
- [2] Cuniberti E. (2012), *Elettronica. Componenti analogici e programmabili.*
- [3] De Santis A. (2014), *Sistemi 3. Sistemi automatici di controllo e di misura.*
- [4] Lipschutz S. (1982), *Elaborazione Dati.*
- [5] <http://www.arduino.cc>.
- [6] <http://it.wikipedia.org>.