



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA BIOMEDICA

Sviluppo di un banco di taratura automatizzato per la caratterizzazione di  
sensori di temperatura

*Development of an automated calibration bench  
for the characterization of temperature sensors*

**Relatore**

Prof: Lorenzo Scalise

**Candidato**

Simone Paolini

**Correlatore**

Luca Antognoli

ANNO ACCADEMICO 2018/2019



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione.....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Misure di temperatura.....</b>	<b>5</b>
2.1	Sensori e misure .....	5
2.2	Elementi di Statistica .....	8
2.2.1	Gaussiana.....	9
2.3	Taratura statica.....	11
2.3.1	Metodo dei minimi quadrati .....	11
2.4	Caratteristiche statiche.....	14
2.5	PID.....	16
2.5.1	Funzionamento di un PID .....	16
2.5.1	Metodo empirico per il calcolo dei parametri del PID .....	18
2.6	Sensori di temperatura.....	19
<b>3</b>	<b>Banco di taratura.....</b>	<b>23</b>
3.1	Struttura .....	23
3.2	Dati sperimentali .....	32
<b>4</b>	<b>Conclusioni.....</b>	<b>34</b>
<b>5</b>	<b>Bibliografia.....</b>	<b>35</b>
<b>6</b>	<b>Ringraziamenti .....</b>	<b>36</b>

# 1 Introduzione

L'obiettivo di questa tesi è quello di riassumere e comprendere tutti i dati ottenuti sperimentalmente durante il tirocinio in cui si è cercato di sviluppare un banco per la taratura automatizzata dei sensori TMP117. Lo scopo principale è stato quello di velocizzare e ottimizzare il processo di taratura per sensori di temperatura, che risulta essere lento e spesso poco affidabile, se effettuato da mani inesperte. Infatti, nella taratura manuale, l'operatore deve gestire il generatore di tensione in modo tale da mantenere la temperatura di una resistenza costante nel tempo, così da registrare contemporaneamente i dati dal sensore in esame e dalla termocoppia o termoresistenza di riferimento. Il modificarsi della temperatura ai capi della resistenza modifica la resistività del materiale e, di conseguenza, produce cali di tensione che alterano la temperatura stessa, rendendo la taratura un processo estremamente delicato. Proprio per questo si è pensato di automatizzare il tutto tramite un PID, ovvero tramite un regolatore configurato appositamente.

La tesi è composta da tre parti fondamentali:

1. Una prima parte in cui vengono introdotti i principali argomenti riguardanti le misurazioni focalizzandosi su alcune basi statistiche e sul concetto di taratura.
2. Una seconda parte in cui viene descritto, in maniera dettagliata, il banco di prova e come è costituito.
3. Infine, le conclusioni, che contengono le considerazioni finali.

I dati ottenuti durante il tirocinio, e qui riportati, sono particolarmente positivi e confermano la possibilità di effettuare la procedura di taratura in maniera veloce ed efficace con l'automatizzazione tramite un PID.

## 2 Misure di temperatura

### 2.1 Sensori e misure

Questo capitolo sarà dedicato allo studio e all'introduzione dei sistemi di misura e al concetto di misura stessa. Nell'industria, per il corretto utilizzo di un determinato apparecchio, è necessaria la presenza di particolari strumenti che misurino le corrette informazioni, ovvero i sensori.

I sensori sono una vasta gamma di strumenti con le più disparate funzioni: controllo della temperatura, delle grandezze elettriche, del peso, dell'umidità, ecc.

La maggior parte degli strumenti e dei sensori può essere modellizzato nel seguente modo:

- Elemento sensibile primario: si occupa della ricezione del segnale dall'oggetto delle misure e produce un'uscita in qualche modo proporzionale all'ingresso;
- Elemento di conversione: porzione dello strumento che serve alla conversione della quantità in uscita dal blocco sensibile in un'altra grandezza fisica;
- Elemento di trasmissione dei dati: se i blocchi dello strumento sono fisicamente separati si ha ovviamente bisogno di un blocco per la trasmissione;
- Elemento di manipolazione dei dati: simile alla conversione, manipola i dati in modo da seguire una particolare regola definita;
- Elemento di presentazione dei dati: i dati devono in un qualche modo essere comprensibili per un essere umano. Pertanto, questo blocco si occupa della traduzione del valore letto in qualcosa di maggiormente riconoscibile (ad es. una lancetta che si muove su un quadrante);
- Elemento di registrazione: blocco che registra e immagazzina i dati su una memoria digitale (ad es. RAM).

È molto importante capire la differenza fra valore "vero" e valore misurato.

Il valore "vero" è un qualcosa di ideale, non conoscibile, e corrisponderebbe al valore di una grandezza se l'operazione di misurazione fosse perfetta. Ebbene, ciò non è mai possibile. Infatti, per quanto ci si possa sforzare, le condizioni al contorno della misurazione cambiano continuamente in seguito alle variazioni delle infinite grandezze fisiche che interferiscono con il

sistema stesso (ad es. umidità, temperatura o pressione) modificando il valore misurato. Quindi, si può solo approssimare che le condizioni imposte alla misurazione siano sempre uguali.

Per quanto riguarda il valore misurato, ad esso sarà sempre associata un'incertezza, derivante dall'impossibilità di definire una grandezza nelle sue infinite cifre significative e dal continuo oscillare delle condizioni al contorno.

È importante definire il concetto di accuratezza e di precisione di una misura. Consideriamo un esempio classico. Supponiamo che un tiratore spari ad un bersaglio un numero finito di colpi. I casi da prendere in considerazione sono i seguenti:

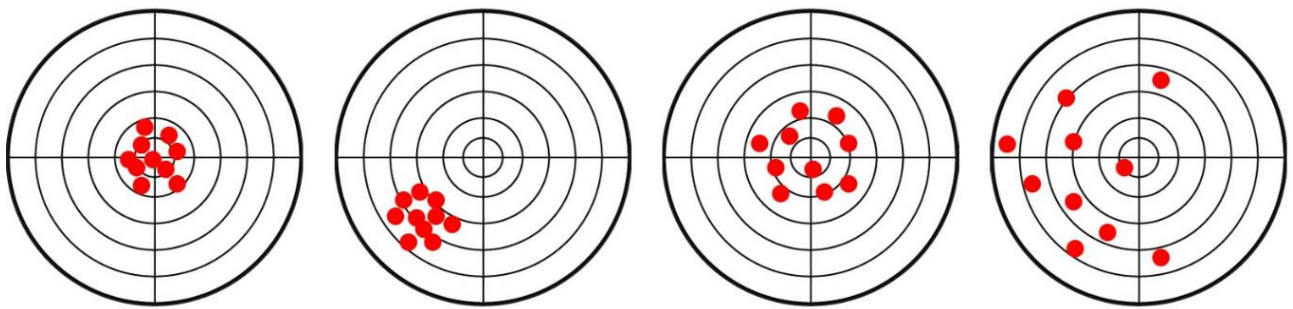


Figura 2.1: Differenze fra accuratezza e precisione

Un campione di dati si definisce accurato se il valor medio dei valori è vicino al valore vero. Invece, un campione è preciso se la dispersione intorno al valor medio è piccola. Per cui, seguendo tali definizioni, il bersaglio numero 2 rappresenta un tiro preciso ma non accurato, il 3 è accurato ma non preciso, il 4 non è né accurato né preciso ed infine l'1 è il campione migliore, con dati sia precisi che accurati.

Un altro aspetto molto importante è la sottrazione di energia al sistema da parte del sensore. Ogni sensore infatti, assorbe una certa quantità di energia (che sia termica od elettrica) dal sistema con cui è a contatto e quindi va a modificare ed interferire con la misura stessa che, ovviamente, risulta essere imperfetta.

I sensori possono essere distinti in:

1. Attivi e Passivi:

- Attivi: sensori che vengono alimentati da generatori ausiliari che forniscono la maggior parte dell'energia in uscita;

- Passivi: sensori che vengono alimentati dal segnale in ingresso.

## 2. Analogici e Digitali:

- Digitali: maggiormente utilizzati; hanno una natura binaria: ad una tensione compresa fra i 2 V ed i 5 V corrisponde il valore booleano "on", mentre fra gli 0 V ed i 0,8 V corrisponde "off". Questo tipo di sensore è diventato sempre più utilizzato con l'avvento e la diffusione della tecnologia digitale;
- Analogici: non vale la regola vista precedentemente. Spesso i segnali digitali vengono trasformati in analogici tramite appositi convertitori.

In ogni strumento ci possono essere tre tipi di Input:

- Desiderati;
- Interferenti;
- Modificatori.

Gli ingressi desiderati sono quelli che si intende effettivamente misurare, quindi sono l'oggetto delle nostre misure. Invece gli ingressi interferenti sono quei tipi di ingressi che vanno ad inserirsi all'interno del sensore producendo una rispettiva uscita che andrà poi a sommarsi all'uscita desiderata. Infine, i modificatori sono dei tipi di ingresso che modificano la relazione tra input e output del sensore.

Tutti i sensori normalmente vengono suddivisi in base alle caratteristiche statiche e dinamiche. Entrambe definiscono dei criteri necessari per la quantificazione della qualità della misurazione per quanto riguarda il comportamento statico e dinamico rispettivamente. Questi due aspetti sono distinti l'uno dall'altro per semplificare e facilitare l'analisi del comportamento del sensore nelle applicazioni.

Prima di introdurre il concetto di taratura è bene studiare alcune basi di statistica.

## 2.2 Elementi di Statistica

Il concetto di probabilità ha diverse definizioni ma quella classica è la seguente: la probabilità di un evento A si definisce come il rapporto fra il numero di casi favorevoli dell'evento stesso ed il numero di casi possibili.

Un esempio molto banale è quello del lancio del dado: se si definisce l'evento A come l'uscita del numero 6 nel lancio, allora la probabilità sarà il rapporto fra il numero di casi favorevoli (ovvero 1) ed il numero di casi possibili (ovvero 6). Pertanto, la probabilità sarà 1/6.

Supponiamo di definire una grandezza Z come:

$$Z = \frac{(\text{numero di letture in un intervallo})/(\text{numero totale di letture})}{(\text{ampiezza dell'intervallo})}$$

Se andassimo a disegnare un rettangolo di altezza Z per ogni intervallo avremmo ottenuto un istogramma. Notiamo che l'area al di sotto di ogni rettangolo rappresenta la probabilità che una certa lettura cada all'interno di quel determinato intervallo. Inoltre l'area totale dei rettangoli sarà sempre uguale ad 1, in quanto la probabilità di trovare una lettura all'interno dei due estremi è ovviamente del 100%.

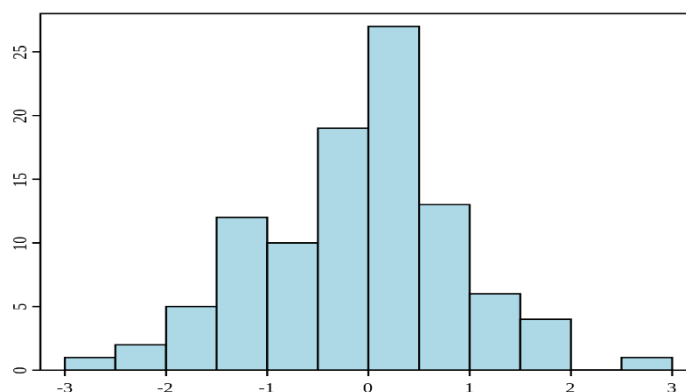


Figura 1.1: Esempio di un istogramma

Facendo tendere il numero di letture all'infinito e la larghezza dell'intervallo a zero allora otteniamo la funzione di densità di probabilità, definita pertanto come:

$$f(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} Z$$



dove  $\Delta x$  è l'ampiezza dell'intervallo. La funzione appena definita è molto utilizzata in quanto si può lavorare su dati continui e non più su istogrammi.

Inoltre, integrando la funzione di densità di probabilità, si ottiene la funzione di distribuzione cumulativa:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(u) du$$

Prima di continuare è fondamentale definire il concetto di valor medio e di deviazione standard.

- Dato un campione di  $N$  dati  $x_i$ , allora si può definire la *media* come il valore più probabile del campione. In formule:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

La differenza fra il valor medio e il valore atteso viene comunemente detta "bias".

- Dato un campione di  $N$  dati, allora si definisce la *deviazione standard* come:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

### 2.2.1 Gaussiana

Esistono numerose funzioni di densità di probabilità che vengono utilizzate in ingegneria ma una delle più importanti è senza dubbio la Gaussiana la cui  $f(x)$  è definita in tal modo:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \text{con } x \in \mathbb{R}$$

Molte delle misurazioni che vengono effettuate sono rappresentabili da un grafico del seguente tipo:

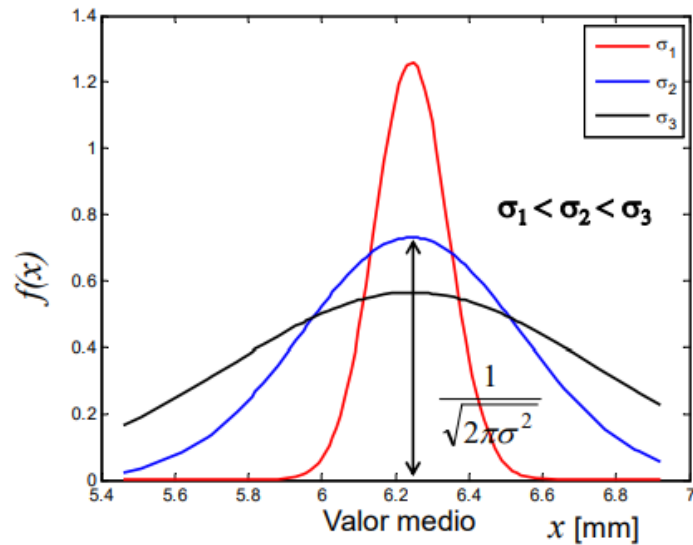


Figura 2.2: Gaussiana al variare della deviazione standard

La forma della curva è molto particolare ed è dettata da due fattori fondamentali:  $\mu$  e  $\sigma$ .

- $\sigma$  è la deviazione standard e quantifica la dispersione dei dati attorno al valor medio.
- $\mu$  è il valor medio.

È importante constatare che l'area della curva è sempre pari ad 1 per la definizione di funzione di densità di probabilità. Nel caso in cui volessimo calcolare la probabilità che il valore letto si trovi all'interno del range che va da  $\mu - \sigma$  a  $\mu + \sigma$ , noteremmo che essa è pari a 68,3%.

Allo stesso modo la probabilità che la lettura sia compresa tra  $\mu \pm 2\sigma$  è del 95.4% e che sia nell'intorno  $\mu \pm 3\sigma$  è del 99.9%.

1, 2 e 3 vengono detti "livelli di confidenza" o "fattori di copertura". Normalmente in ingegneria viene utilizzato nelle misurazioni un livello di confidenza pari a 2.

## 2.3 Taratura statica

La taratura statica di uno strumento si ottiene tramite un semplice procedimento: tutti gli ingressi vengono fermati ad una costante meno che uno, il quale viene fatto variare in un certo range di valori costanti. Questa operazione viene ripetuta innumerevoli volte per ogni ingresso.

Questo procedimento fa sì che anche le uscite varino in un determinato campo di misura in funzione della grandezza in ingresso. Successivamente si deve confrontare la misura così ottenuta con quella calcolata con uno strumento che, di norma, deve essere almeno quattro volte più accurato del sensore in esame.

Normalmente le misure vengono effettuate in regime di *controllo statistico*, ovvero, tutti gli infiniti ingressi interferenti vengono lasciati liberi di variare nella speranza che vadano a contribuire in maniera irrisoria all'incertezza dello strumento e che l'insieme dei loro effetti sull'uscita del sensore sia del tutto casuale.

### 2.3.1 Metodo dei minimi quadrati

Entriamo ora nel vivo del processo di taratura con il metodo dei minimi quadrati.

Fondamentale per tale processo è la definizione di una curva di taratura (spesso e volentieri una retta) che approssimi la relazione fra ingresso e uscita del sensore.

Chiamiamo il vettore contenente le uscite  $q_o$  e quello contenente gli ingressi  $q_i$ . Per cui la relazione che vogliamo trovare sarà del tipo:

$$q_o = mq_i + b$$

dove m e b sono i coefficienti della retta.

Si può dimostrare che:

$$m = \frac{N \sum q_o q_i - (\sum q_i)(\sum q_o)}{N \sum q_o^2 - (\sum q_i)^2}$$
$$b = \frac{(\sum q_i^2)(\sum q_o) - (\sum q_i q_{io})(\sum q_i)}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2}$$

Tali valori possono essere trovati in maniera molto semplice ed immediata tramite l'ausilio della funzione "polyval" di Matlab (si ricorda che Matlab è un ambiente di programmazione per il calcolo numerico).

La retta trovata sarà tale da minimizzare la distanza fra tutti i punti di calibrazione e la retta stessa.

Esistono due tipi di errore:

- Sistemático: questo tipo di errore si trova nelle misurazioni sempre nello stesso modo e con lo stesso segno. Quindi è un errore costante per ogni punto di calibrazione. La taratura ha il compito fondamentale di annullare tale tipo di errore.
- Casuale: questo tipo di errore non è eliminabile con la taratura anche se è quantificabile, e cambia da misurazione a misurazione.

Per trovare l'incertezza si possono utilizzare due metodi differenti:

Un primo metodo consiste nel calcolare lo scarto fra il valore misurato dal sensore e quello trovato tramite la retta di taratura, come in figura:

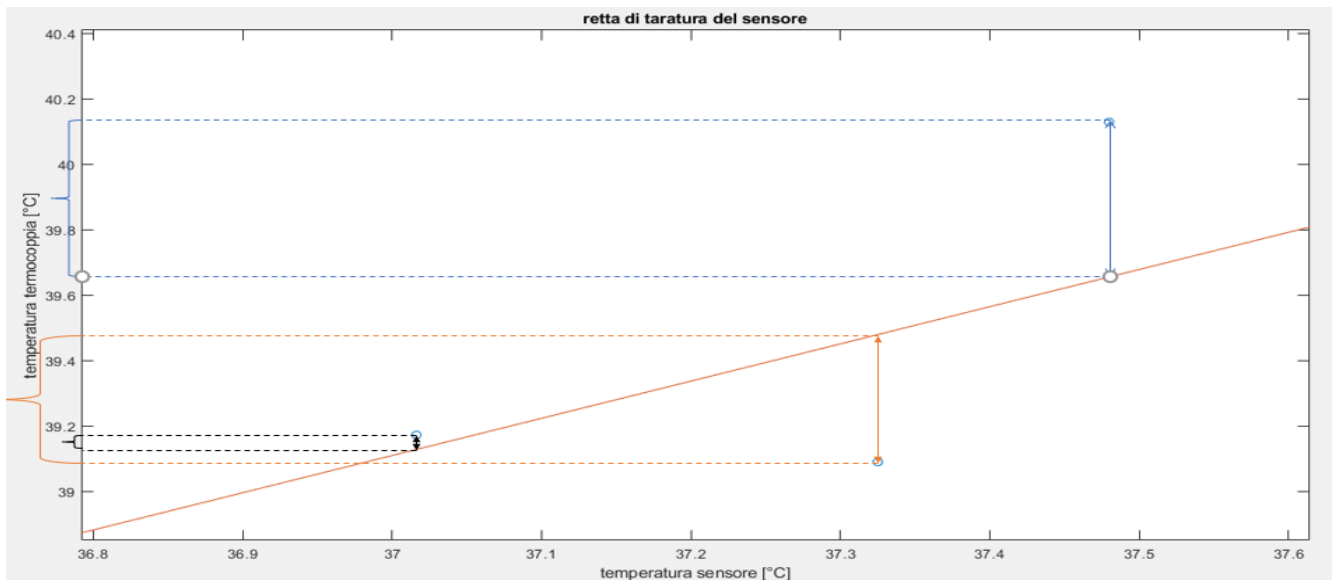


Figura 2.3: Calcolo degli scarti

Successivamente, tutti gli scarti vengono ordinati su di un istogramma come nella figura sottostante, dove sulle ordinate compare la densità di probabilità. Poi, tutti i dati vengono

interpolati per mezzo di una distribuzione Gaussiana tramite un software come, in questo caso, Matlab.

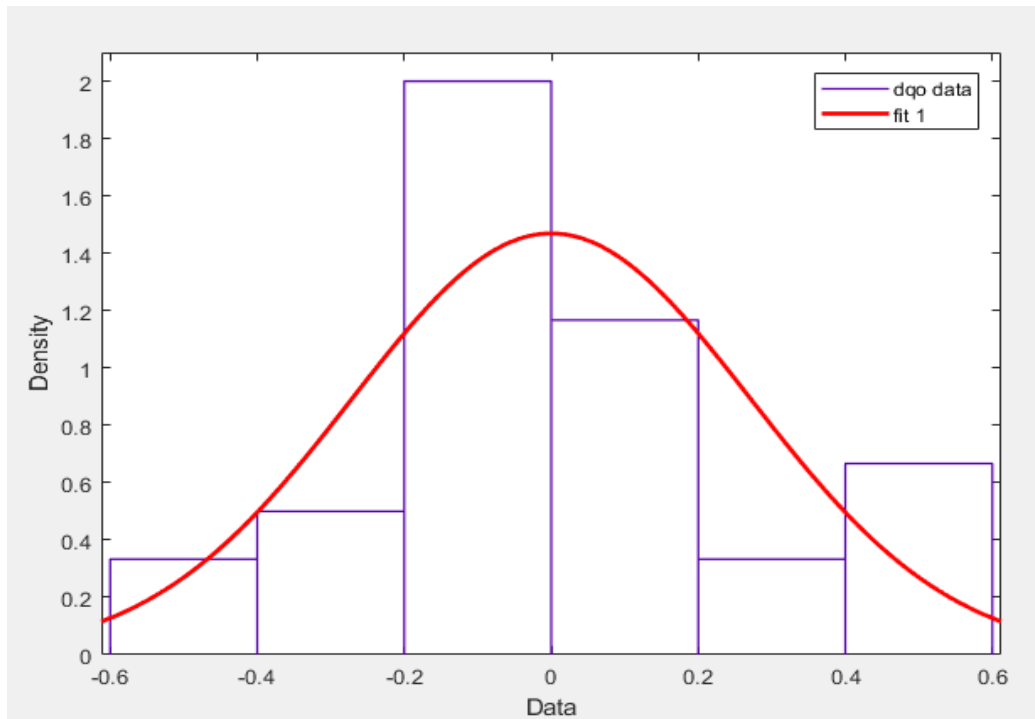


Figura 2.4: Gaussiana che meglio approssima la distribuzione

Infine, si calcola la deviazione standard che rappresenta l'ampiezza della curva e quindi quanto sono dispersi i dati. L'incertezza, però, non è la dispersione dei dati intorno dalla media bensì è l'incertezza sulla media che rappresenta il valore stimato, calcolata come:

$$\sigma(m) = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$

Un ulteriore metodo consiste nel calcolare la varianza dei dati in uscita dal sensore:

$$S^2_{q_0} = \frac{1}{N-2} \sum (mq_i + b - q_0)^2$$

da qui, è possibile calcolare la deviazione standard come la radice di  $S^2_{q_0}$ .

Infine, è possibile calcolare la varianza dei valori in ingresso  $q_i$  come:

$$S^2_{q_i} = \frac{1}{N-2} \left( \frac{q_0 - b}{m} - q_i \right)^2 = \frac{S^2_{q_0}}{m^2}$$

e successivamente, l'incertezza si definisce come la radice quadrata della grandezza.

## 2.4 Caratteristiche statiche

Le caratteristiche statiche sono un insieme di parametri fondamentali per comprendere l'effettiva utilità di uno strumento in un determinato contesto rispetto ad un altro. Definiscono i limiti di applicazione degli strumenti e conoscerli risulta essere fondamentale per una corretta misurazione.

Normalmente le più importanti sono le seguenti:

- Soglia
- Fondo scala
- Campo di misura
- Sensibilità
- Risoluzione
- Ripetibilità
- Isteresi
- Linearità

1. Il campo di misura si definisce come l'insieme dei valori di una grandezza fisica su cui uno strumento può effettuare una misura. Può essere anche definito come portata e definisce i limiti inferiore e superiore dei valori misurabili (rispettivamente soglia e fondo scala).
2. La sensibilità si definisce come la pendenza della curva di taratura, per cui può essere definita come:

$$S = \frac{dq_0}{dq_i}$$

dove, rispettivamente,  $q_0$  rappresenta le uscite dello strumento e  $q_i$  gli ingressi.

4. La risoluzione si definisce come la più piccola variazione misurabile attraverso un determinato strumento.
5. Si definisce ripetibilità la proprietà di uno strumento di rendere minimi gli errori casuali della misura. Per calcolarla bisogna inserire un ingresso costante e calcolare la dispersione dei valori in uscita sottoforma di deviazione standard della Gaussiana che approssima la funzione di probabilità dei dati stessi.
6. L'isteresi è un particolare fenomeno che può essere descritto dalla seguente figura:

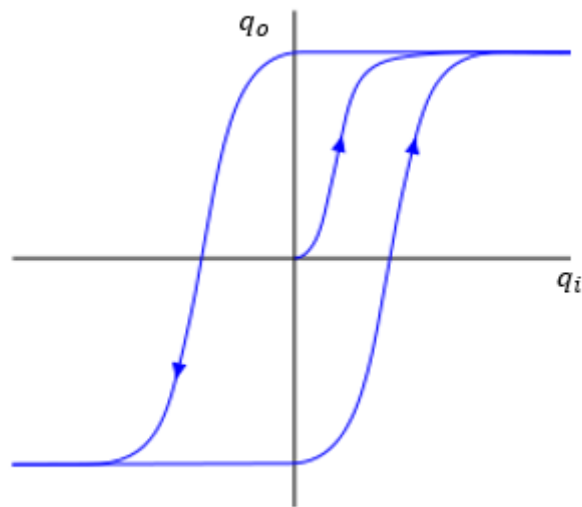


Figura 2.5: Fenomeno dell'isteresi

In pratica, se vengono inseriti determinati valori in ingresso, prima crescenti e dopo decrescenti, per lo stesso ingresso si avranno due uscite differenti. Normalmente l'isteresi viene quantificata come la differenza fra questi due valori.

7. La linearità si definisce come la differenza fra i valori misurati dallo strumento e quelli della retta di taratura. Normalmente viene calcolata in termini percentuali:

$$\frac{q_{ok} - (mq_{ik} + b)}{q_{ok}} \times 100\%$$

Esistono due tipi di linearità:

- 1) La prima, di tipo A, definisce l'impossibilità di misurare valori vicini allo zero, poiché l'incertezza di misura sarebbe maggiore del valore stesso.
- 2) La seconda, di tipo B, è costante nel campo di misura.

## 2.5 PID

### 2.5.1 Funzionamento di un PID

I PID (detti anche regolatori ad azione proporzionale, integrale e derivativa) sono dei regolatori lineari utilizzati largamente nell'industria. Ciò è dovuto alla loro semplicità di utilizzo ed alla vasta gamma di processi che possono regolare.

Innanzitutto, è bene spiegare i principi di funzionamento di un PID, a partire dal suo schema a blocchi:

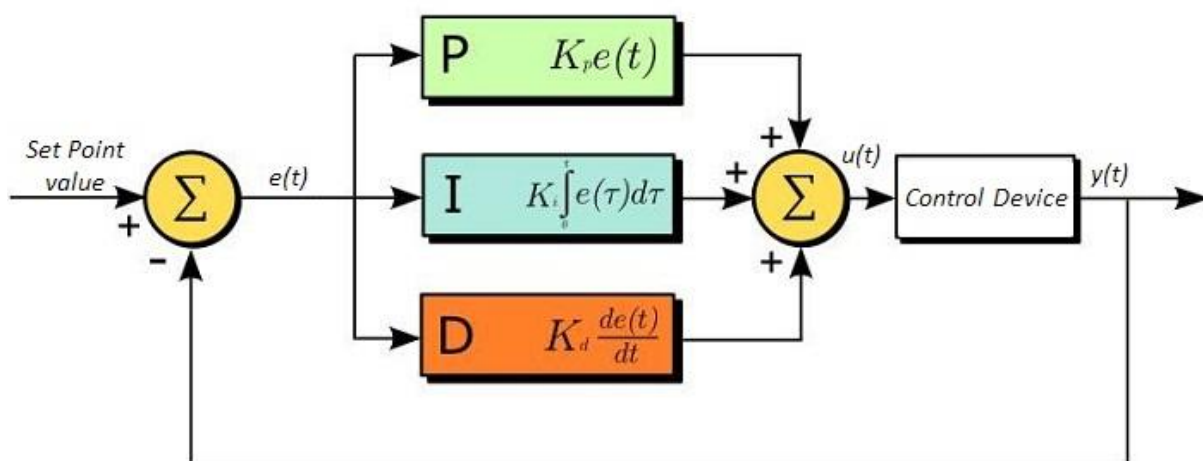


Figura 2.7: Grafico di funzionamento di un PID

Analizziamo con ordine il seguente schema:

- Il primo blocco definisce una relazione proporzionale tra l'errore  $e(t)$  e l'uscita  $u(t)$ . In particolare,  $e(t)$  si definisce come la differenza fra l'ingresso del PID e la variabile  $y(t)$ .
- Il secondo blocco definisce una relazione proporzionale tra l'integrale di  $e(t)$  e l'uscita  $u(t)$  ed è fondamentale per imporre che l'errore si annulli asintoticamente a fronte di segnali di riferimento o disturbi.
- Il terzo blocco definisce una relazione proporzionale tra la derivata di  $e(t)$  e l'uscita  $u(t)$  ed ha lo scopo di anticipare l'andamento dell'errore negli istanti futuri.



Per cui, la relazione finale che si instaura fra l'uscita  $u(t)$  e l'errore  $e(t)$  è la seguente:

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_{t_0}^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt}$$

dove  $K_P, K_I$  e  $K_D$  sono costanti positive o nulle, rispettivamente dette *coefficiente dell'azione proporzionale, integrale e derivativa*.

Molto spesso, tale equazione viene modificata tramite la trasformata di Fourier e si ottiene la funzione di trasferimento caratteristica del PID, ovvero:

$$R_{PID}(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s = \frac{K_P s^2 + K_I s + K_D}{s}$$

Si ricorda che una funzione di trasferimento è una funzione che caratterizza il comportamento di un sistema dinamico tempo-invariante nel dominio della frequenza, mettendo in relazione ingresso ed uscita.

Ovviamente, nelle applicazioni, non è sempre necessario utilizzare tutti i contributi del PID. Pertanto, esistono regolatori differenti come i P, I, PI, PD.

Nell'operazione di definizione dei parametri del PID sono stati presi in considerazione tre caratteristiche fondamentali al fine di un buon controllo:

- Accuratezza;
- Stabilità;
- Precisione.

Ciò vuol dire che il valore che si ha in uscita deve essere il più vicino possibile al Setpoint, ovvero a ciò che è stato inserito in ingresso. Inoltre, le fluttuazioni dell'uscita devono essere piccole ed infine il sistema deve essere in grado di effettuare variazioni di Setpoint in maniera rapida e precisa.

## 2.5.1 Metodo empirico per il calcolo dei parametri del PID

Esiste un metodo (detto *Metodo di Ziegler e Nichols in anello chiuso*) particolarmente semplice ed efficace per la regolazione del PID che può essere utilizzato in applicazioni NON industriali. Sostanzialmente è composto di quattro punti principali:

1. Prima di tutto si pongono a zero le costanti integrale e derivativa. Quindi:

$$K_I = K_D = 0$$

2. Partendo da valori di  $K_P$  piccoli si inserisce un ingresso a scalino (o lo si approssima). Dopodiché si aumenta gradualmente il valore di  $K_P$  ripetendo l'esperimento fino a quando in uscita non si osserverà un'oscillazione permanente attorno al Setpoint.
3. Si va a calcolare il periodo  $T$  di tale oscillazione.
4. In base ai valori di  $K_P$  e di  $T$  ottenuti, si calcolano  $K_I$  e  $K_D$  a partire dalla seguente tabella:

Tipo di regolatore	$K_P$	$K_I$	$K_D$
P	$0.5K_P$		
PI	$0.45K_P$	$T/1.2$	
PID	$0.6K_P$	$T/2$	$T/8$

Tabella 2.1: Calcolo dei parametri del regolatore P, PI e PID

Questo metodo non è sempre utilizzabile in quanto ci sono alcuni sistemi che non generano oscillazioni.

## 2.6 Sensori di temperatura

Esistono vari tipi di sensori di temperatura:

- 1) Le termocoppie sono costituite da due conduttori di materiali diversi che si uniscono in due estremità. Il loro funzionamento è basato sull'effetto Seebeck: se i giunti si trovano a temperature differenti, allora, si genera una forza elettromotrice (*f.e.m.*) proporzionale alla differenza di temperatura stessa. È evidente che, se vogliamo conoscere la temperatura del giunto caldo, è necessario conoscere quella del giunto freddo. Pertanto, quest'ultimo viene inserito in un bagno di acqua e ghiaccio a 0°C o si misura tale temperatura con un apposito circuito di compensazione.

Esistono vari tipi di termocoppie in commercio e le più utilizzate sono le seguenti:

Tipo di termocoppia	Materiali	Range di temperatura [°C]
J	Ferro/Costantana	-40÷750
K	Chromel/Alumel	-200÷1250
T	Rame/Costantana	-200÷400
E	Chromel/Costantana	0 ÷900
R	Pt- rodio 13% /Platino	0÷1450
S	Pt - rodio 10% /Platino	0 ÷1450
B	Pt – rodio 30% / Pt – rodio 6%	800 ÷1700

Tabella 2.2: Tipi di termocoppie

I vantaggi principali delle termocoppie sono i seguenti:

1. Economiche rispetto ad altri sensori
2. Non sono alimentate esternamente
3. Ampio intervallo operativo

Gli svantaggi sono:

1. Risposta non lineare

2. Poco stabili
3. Bassa sensibilità

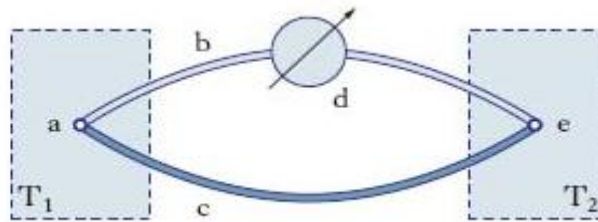


Figura 2.8: Grafico semplificato di una termocoppia

- 2) Le termoresistenze, invece, sono degli strumenti che sfruttano la variazione della resistenza di un conduttore metallico in base alla temperatura. Vengono anche chiamate RTD (*Resistance Temperature Detector*). Le termoresistenze sono costituite da materiali con elevata conducibilità elettrica come Nichel, Rame ed in particolare Platino.
- Per quanto riguarda una termoresistenza al Platino, la relazione fondamentale fra la resistenza e la temperatura è la seguente:

$$R = R_0 [1 + AT + BT^2 + C(T - 100)T^3] \quad -200^\circ\text{C} < T < 0^\circ\text{C}$$

$$R = R_0 [1 + AT + BT^2] \quad 0^\circ\text{C} < T < 800^\circ\text{C}$$

dove  $R_0$  è la resistenza in  $\Omega$  alla temperatura di  $0^\circ\text{C}$ , A, B e C sono coefficienti propri della termoresistenza e T è la temperatura in  $^\circ\text{C}$ .

Una delle termoresistenze più utilizzate è la Pt100, chiamata così in quanto la resistenza alla temperatura di  $0^\circ\text{C}$  è pari, appunto, a  $100 \Omega$ .

I vantaggi sono:

1. Stabilità
2. Linearità nell'intervallo fra i  $0^\circ\text{C}$  ed i  $400^\circ\text{C}$  circa

Svantaggi:

1. Particolarmente costose
2. Uscita del sensore molto piccola
3. Deve essere alimentato esternamente

3) I termistori sono trasduttori elettrici che sfruttano le proprietà dei semiconduttori di variare la conducibilità elettrica con la temperatura, pertanto si basano sullo stesso principio di funzionamento delle termoresistenze, ma sono costituite da materiali diversi. Esistono due tipi di termistori: NTC (*Negative Temperature Coefficient*) e PTC (*Positive Temperature Coefficient*). La differenza sta nel fatto che, all'aumentare della temperatura, la resistenza di una NTC diminuisce mentre quella di una PTC aumenta. La relazione che lega la resistenza alla temperatura è la seguente:

$$R = R_0 e^{\left[\beta\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right]}$$

Dove  $R_0$  è la resistenza in  $\Omega$  alla temperatura di riferimento  $T_0$  espressa in Kelvin,  $\beta$  è un parametro che dipende dal materiale.

Per quanto riguarda i termistori NTC si può linearizzare la relazione precedente tramite l'equazione di Steinhart-Hart:

$$\frac{1}{T} = A + B \ln(R) + C (\ln(R))^3$$

Dove A, B e C sono coefficienti differenti per ogni dispositivo, T è la temperatura in Kelvin e R la resistenza in  $\Omega$ .

I termistori sono dei sensori che hanno una sensibilità molto maggiore degli RTD, presentano un'impedenza elevata e sono utilizzabili con soli due fili. Però sono meno stabili e fortemente non lineari rispetto agli RTD.

4) I pirometri ottici, infine, sono trasduttori elettrici a infrarossi che si fondano sulla trasmissione del calore per irraggiamento elettromagnetico e sulla legge di Planck.

Producono una risposta approssimativamente proporzionale a  $T^4$  e sono quindi non lineari.

Vantaggi:

- Non invasivo
- Range di operatività molto grande
- Stabile

Svantaggi:

- Costoso
- Non lineare

## 3 Banco di taratura

### 3.1 Struttura

L'obiettivo principale del tirocinio era quello di sviluppare un banco di prova per la taratura automatizzata di sensori di temperatura. Il banco di taratura è così composto:

- Sensori TMP117
- Arduino Mega 2560
- Piastra riscaldante
- Termocoppia
- Relè allo stato solido (SSR DC-DC)
- Generatore di tensione
- Lcd 16x2
- Keypad 4x4

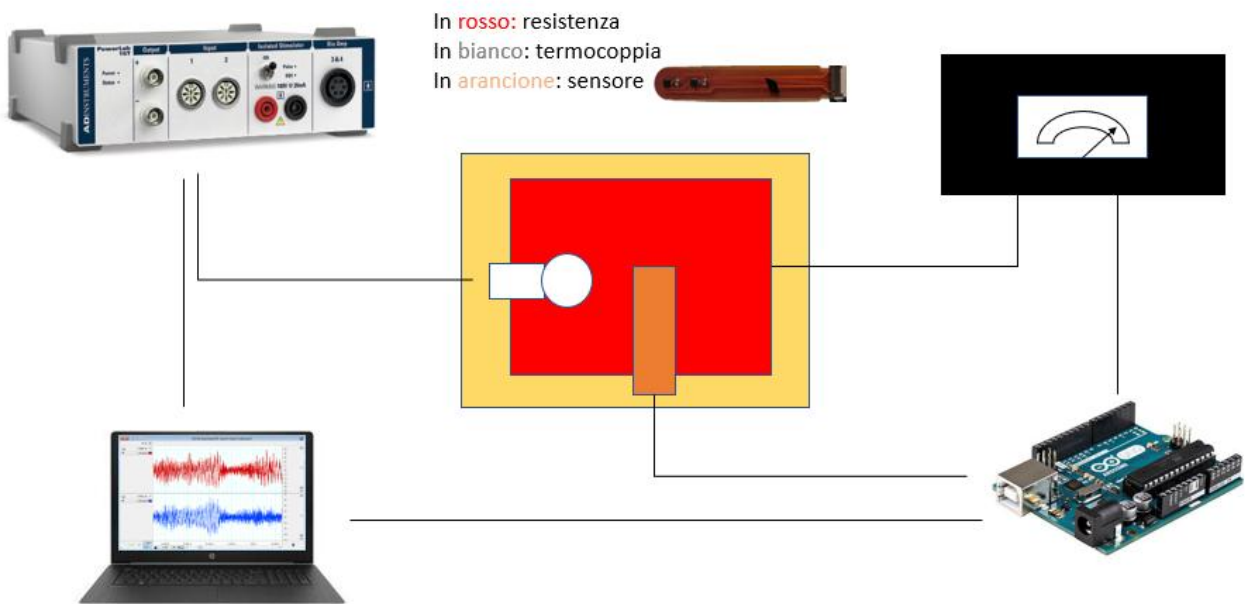


Figure 3.1: Schema riassuntivo del banco di taratura

1. Per prima cosa elenchiamo quelle che sono le caratteristiche principali dei sensori utilizzati, ovvero i termistori TMP117 della Texas Instruments. Tali sensori vengono normalmente utilizzati in range di temperature comprese fra i -20°C ed i 50°C (anche se strutturalmente possono operare a temperature comprese fra i -55°C ed i 150°C) ed a tali temperature hanno una accuratezza di  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  senza calibrazione. La risoluzione di questo tipo di sensore è di 0.0078°C (ovvero 16 bit) e comunica con Arduino tramite il protocollo I<sup>2</sup>C. Tale protocollo prevede l'utilizzo di unicamente due fili per la comunicazione: SDA (*Serial Data*) ed SCL (*Serial Clock*), l'uno per lo scambio dei dati e l'altro per la sincronizzazione, data la possibilità di comunicare contemporaneamente con più dispositivi. Infine, ogni TMP117 deve essere connesso con un cavetto all'alimentazione ed uno a GND.

Normalmente il sensore opera a tensioni comprese fra i 1,8V ed i 5V, ottimali per il funzionamento con Arduino o con i comuni microcontrollori. Nonostante l'intenzione iniziale fosse quella di utilizzare i sensori tramite un dispositivo Raspberry PI 3, ciò è risultato alquanto arduo per la mancanza di una apposita libreria, presente appunto su Arduino. Inoltre, il sensore consuma poco (unicamente 3,5 $\mu\text{A}$ ) ed è progettato per soddisfare i requisiti tecnici dei protocolli ASTM E1112 e ISO 80601 che garantiscono la compatibilità del sensore per l'utilizzo medico ed a contatto con pazienti.

Date le dimensioni ridotte, il sensore è ottimale per essere utilizzato specialmente su pazienti neonati o prematuri. Infine, è bene ricordare la possibilità di leggere i dati inviati dal sensore via Bluetooth.

2. Arduino è una piattaforma hardware composta da una serie di schede elettroniche dotate di un microcontrollore. In particolare, quella utilizzata è la MEGA 2560 che presenta 54 pin digitali e 16 pin analogici.
3. Un terzo componente fondamentale è la piastra riscaldante, utilizzata per scaldare a sua volta una barretta di metallo su cui poi vengono attaccati i sensori e la termocoppia di riferimento.



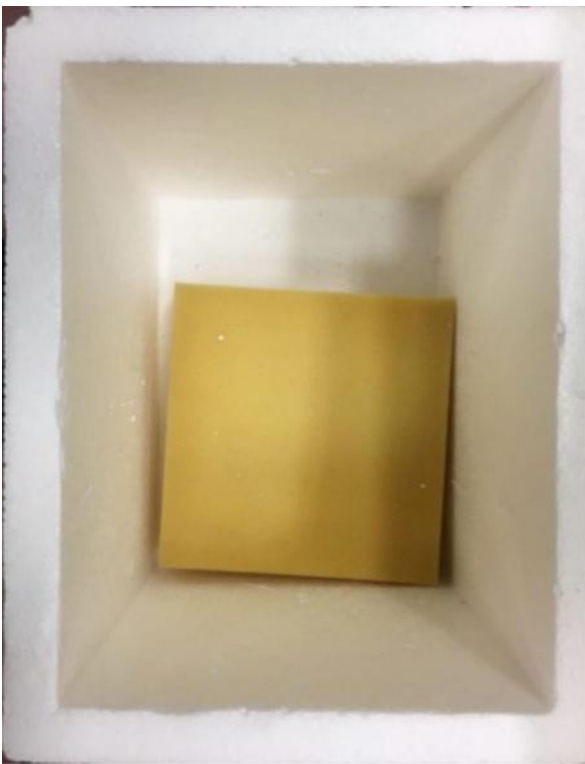
4. Il riferimento utilizzato è una termocoppia di tipo J (bianco/nero) costituita da due fili rispettivamente l'uno di ferro e l'altro di costantana. Normalmente questo tipo di sensore è utilizzato su un range di temperature che vanno da 0°C a circa 750°C ed ha un'incertezza di circa  $\pm 1.00$  % della misura stessa. Nonostante inizialmente si volesse utilizzare una Pt100, una termoresistenza particolarmente precisa, non era presente in laboratorio un'adeguata strumentazione che la potesse connettere efficacemente con Arduino o con il PC.

Innanzitutto, descriviamo l'organizzazione del banco di prova:

- Il primo punto fondamentale è che, per ottenere una taratura corretta, i sensori devono essere isolati dall'esterno, che potrebbe in qualche modo modificare le letture. Per far ciò, il sistema viene inserito in una scatola di polistirolo che viene poi successivamente chiusa. All'interno della scatola si trova una base spugnosa su cui va a poggiarsi il tappetino riscaldante.
- Per migliorare la lettura, al di sopra della resistenza si poggia una barretta di metallo che serve a far sì che la temperatura sia equivalente su tutta la superficie. Qui verranno attaccati i sensori TMP117 e la termocoppia tramite nastro isolante.
- Infine, si posiziona un ulteriore blocco di polistirolo a cui si aggiunge un peso in modo che la termocoppia ed i sensori si appoggino correttamente sul metallo.

Nella figura a sinistra è possibile vedere la scatola in cui sono stati inseriti i sensori e la termocoppia durante le misurazioni. Sulla scatola sono presenti anche dei fori, in cui si sono fatti passare i cavi più grandi, in modo che il coperchio potesse essere chiuso correttamente.

Nella foto a destra, il tappetino riscaldante è costituito da un lungo filo che produce varie anse. Osservando alla termocamera, si è potuto constatare che la temperatura non era uniforme, pertanto si è pensato di utilizzare una barretta di metallo rivestita da nastro adesivo.



*Figura 3.2: Contenitore di polistirolo isolante*



*Figura 3.3: Tappetino riscaldante con appoggiato barra metallica*

In questa seconda parte vedremo le connessioni che Arduino effettua con i vari componenti:

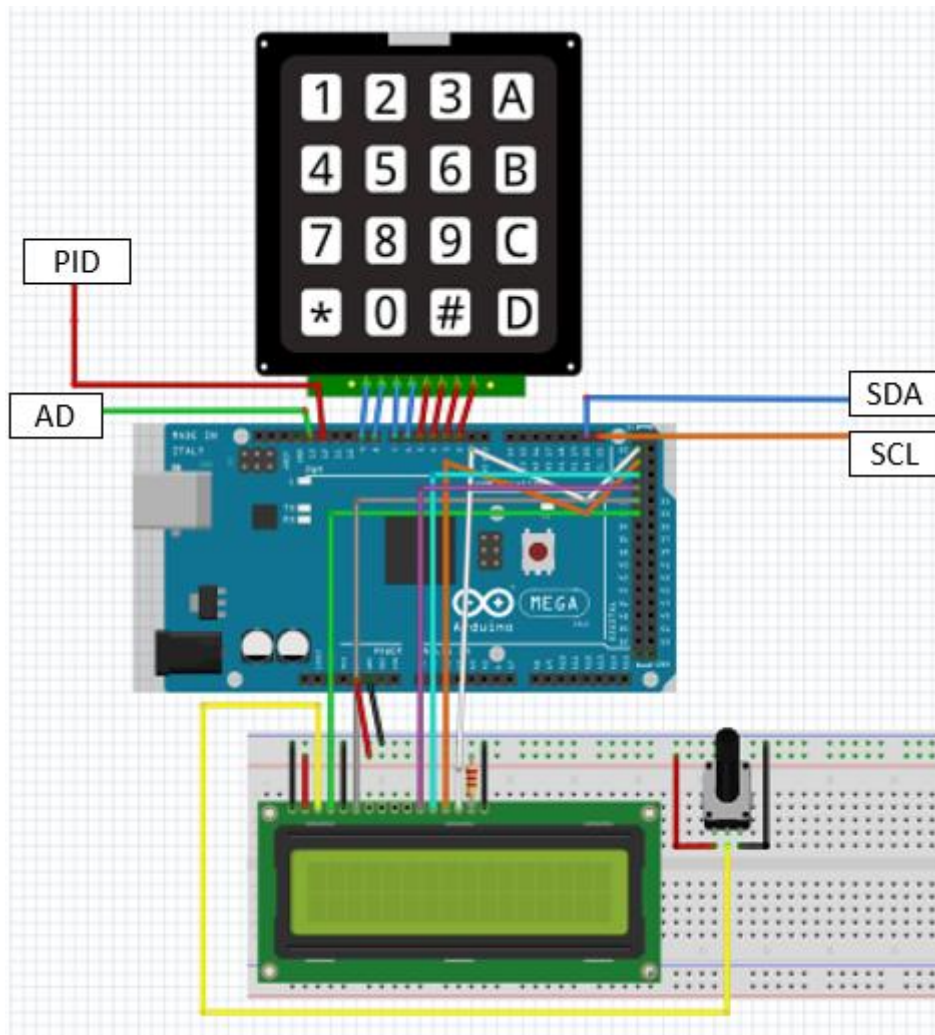


Figura 3.4: Schema riassuntivo delle connessioni dei vari pezzi con Arduino

In questa figura sono rappresentati i collegamenti effettuati fra Arduino Mega e l'LCD ed il Keypad 4x4.

Un componente fondamentale del banco di taratura è il relè allo stato solido (SSR) che connette Arduino, il generatore di tensione e la tavoletta riscaldante.

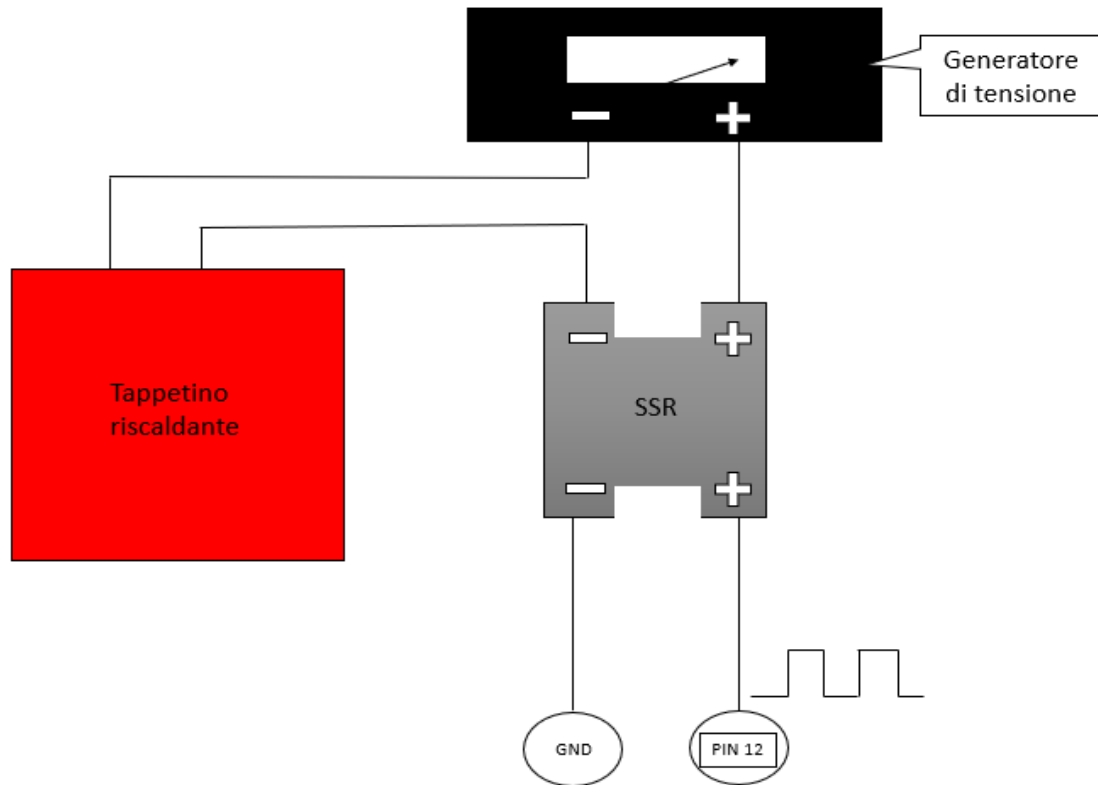
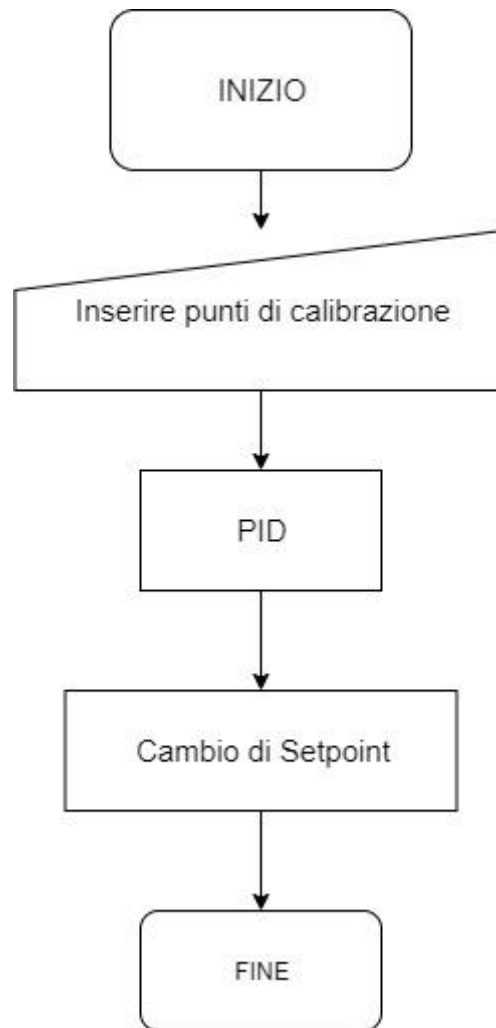


Figura 3.5: Connessioni fra Arduino, relè allo stato solido, tappetino riscaldante e generatore

Il funzionamento è semplice: il pin 12 di Arduino rappresenta l'output del PID implementato tramite la libreria PID\_v1.h. Tale pin è in modalità PWM (Pulse Width Modulation), ciò significa che invia in uscita un treno di impulsi con una determinata frequenza. Nel momento in cui il pin 12 è "HIGH" avviene il collegamento fra generatore e tappetino riscaldante (contatto normalmente chiuso) aumentando gradualmente la temperatura. Per cui, il PID agisce sulla frequenza degli impulsi, in modo tale da garantire che la temperatura raggiunga il Setpoint inserito.

Nella figura sottostante è possibile notare una schematizzazione del programma, che pertanto risulta essere costituito da tre parti fondamentali:

1. Parte riguardante l'inserimento del numero di punti di calibrazione ed i rispettivi valori
2. Una parte che comprende gli algoritmi di funzionamento del PID
3. Parte riguardante il cambio di Setpoint



*Figura 3.6: Schema semplificato del programma*

- I dati del sensore vengono letti tramite una libreria di Arduino, reperibile sul sito di Texas Instruments o su GitHub, chiamata "TMP117.h". Tramite un semplice programma scaricabile su PC, *CoolTerm*, viene letto il monitor Seriale e i dati vengono inseriti direttamente su di un file di testo. I dati sono letti una volta ogni 500 millisecondi.

- I dati letti dalla termocoppia vengono memorizzati tramite AD Instruments e inseriti successivamente su PC manualmente.
- Una delle parti principali del programma di Arduino è quella relativa al cambio di Setpoint. Il termine  $h$ , inizialmente pari a 0, è necessario al conteggio del numero di cicli e il *buffer* è un vettore di lunghezza pari a 600 (che corrisponde a 5 minuti di acquisizione) in cui vengono memorizzati i valori letti dal sensore.

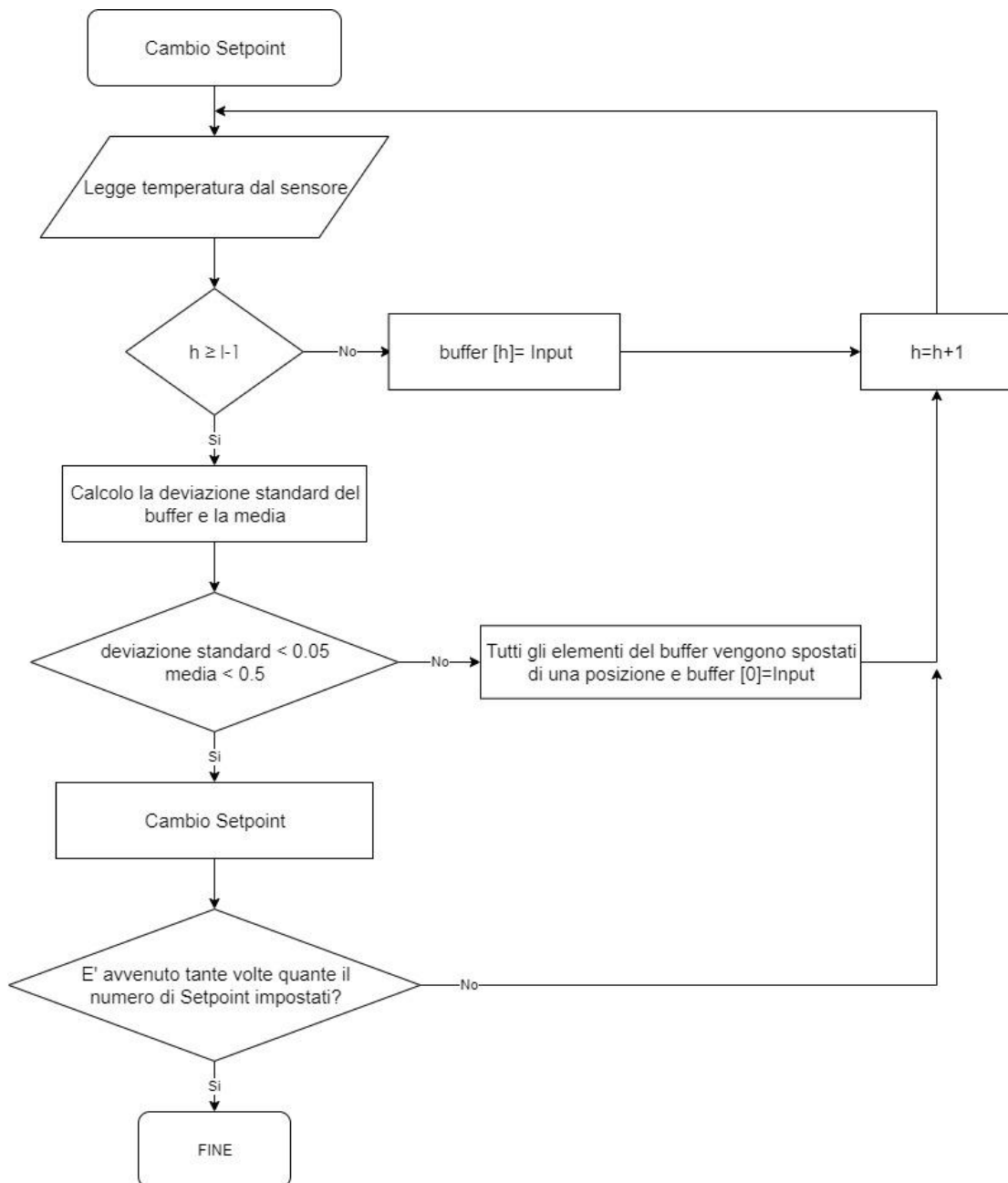


Figura 2.7: Schema riassuntivo del cambio di Setpoint

Il funzionamento è il seguente:

1. Inizialmente il buffer viene completamente riempito partendo dalla testa del vettore fino a raggiungere la coda.
2. Poi, una volta riempito, si calcola la deviazione standard dei dati e, se inferiore ad un valore precedente calcolato sperimentalmente (ad esempio 0.05), si può effettuare il cambio di Setpoint, passando dunque al successivo.
3. In entrambi i casi in cui ci sia stato, o meno, il cambio di Setpoint, una volta concluso il punto 2, il buffer non viene cancellato, bensì ogni nuovo valore letto viene inserito in testa e tutti gli altri dati vengono traslati di una posizione all'interno del vettore. Ciò comporta che unicamente il dato in coda venga eliminato.
4. Ad ogni ciclo si calcola la deviazione standard e se si presenta la condizione già illustrata al punto 2, si ha il cambio di Setpoint. In ogni caso si torna al punto 3 ed il ciclo ricomincia.

[1] Infine, l'elaborazione di tutti i dati avviene tramite Matlab, che effettua la vera e propria taratura creando la retta più consona ad ogni sensore. In particolare, ho creato tre script differenti:

1. Il primo è necessario ad acquisire i dati sia del sensore che della termocoppia relativi ad una determinata prova. Inoltre, calcola i valori medi che si sono ottenuti in condizioni statiche e li inserisce in un Cell Array che poi verrà immesso su di un foglio Excel.
2. Il secondo prende i valori delle medie calcolate precedentemente, calcola la retta di taratura e l'RMS tra i valori della termocoppia e quelli dei sensori.
3. Il terzo serve ad effettuare un test sulla taratura per vedere se corretta. In questo script si calcola l'incertezza post-taratura in termini di RMS e anche come deviazione standard della Gaussiana come visto nel capitolo precedente.

## 3.2 Dati sperimentali

Il processo di cui si è parlato poco fa è stato ripetuto numerose volte per ottenere vari dati che adesso elencheremo.

Innanzitutto, durante il tirocinio, si sono effettuate due diverse tarature: una manuale, e l'altra automatizzata con il banco precedentemente descritto. Per quanto riguarda la taratura manuale i dati trovati sono i seguenti per i vari sensori:

sensore n:	RMS pre-taratura [°C]	RMS post-taratura [°C]
1	0.88	0.28
2		
3	1.09	0.14
4	1.02	0.20
5	1.62	0.52
6	1.59	0.50

Tabella 3.1: Valori di incertezza pre e post taratura in termini di RMS con la taratura manuale

Per prima cosa si può notare che il sensore numero 2 non presenta alcun dato in quanto non funzionante. Inoltre, è bene notare che l'incertezza in questo caso è stata calcolata come RMS (root mean square) definito come la radice quadrata della differenza fra il valore trovato con il sensore tarato ed il valore reale, al quadrato.

I valori di incertezza trovati sono decisamente superiori ad un valore accettabile e questo è determinato sia da un numero esiguo di punti di calibrazione (solamente nove) sia dalla poca praticità ed efficienza della calibrazione manuale.

Proprio per ovviare a questo problema, si è pensato di ricorrere alla taratura automatica con Arduino. I dati di incertezza sono i seguenti:



sensore n:	RMS pre-taratura [°C]	RMS post-taratura [°C]	Incertezza [°C]
1	1.32	0.04	
2			
3	1.65	0.07	0.04
4	1.64	0.07	0.05
5	1.56	0.07	0.04
6	1.56	0.08	0.05

Tabella 3.2: Dati delle incertezze pre e post taratura in termini di RMS e di deviazione standard con la taratura automatizzata

È facile notare che i dati di incertezza in termini di RMS sono nettamente migliori rispetto ad i precedenti. Il numero di punti utilizzati per ottenere questi valori è 18. Inoltre, si è espressa anche l'incertezza come la deviazione standard della Gaussiana che meglio approssima la distribuzione degli scarti come precedentemente descritto nel capitolo riguardante l'incertezza. Inoltre, sono stati modificati anche i punti: per la taratura manuale i punti sono stati presi nell'intorno fra i 30°C ed i 40°C, mentre per la taratura automatica, i punti sono stati presi fra i 30°C ed i 44°C.

Infine, è possibile concludere che l'incertezza estesa dei sensori, calcolata come il prodotto fra l'incertezza stessa ed un fattore di copertura che in questo caso è stato preso pari a 2, è la seguente:

sensore n:	incertezza estesa [°C]
1	
2	
3	0.08
4	0.10
5	0.07
6	0.10

Tabella 3.3: Valori delle incertezze estese dei sensori

I numeri riportati nelle varie tabelle ovviamente sono delle approssimazioni dei valori reali.

Si ricorda che l'incertezza estesa non è altro che l'intorno del valore trovato in cui si ha il 95% delle probabilità che il valore vero appartenga a quel determinato intorno.

## 4 Conclusioni

Arrivati a questo punto analizziamo quelle che sono le conclusioni del tirocinio. Si è sviluppato un banco di prova per la taratura di sensori di temperatura per applicazioni biomediche, semplicemente tramite l'ausilio di Arduino. Il tutto è solamente un prototipo, migliorabile sotto molti aspetti. Eccone alcuni:

1. Inserire tutta la strumentazione in un unico *case* stampato tramite stampante 3D
2. Non utilizzare un generatore di tensione, bensì un semplice alimentatore da attaccare alla presa di corrente
3. Utilizzare un Raspberry piuttosto che un Arduino
4. Migliorare in generale i parametri del PID e dell'algoritmo.
5. Utilizzare uno strumento di riferimento con una maggior accuratezza

Nonostante ciò, si può arrivare a concludere che il banco di taratura sviluppato è particolarmente efficiente e velocizza in maniera esponenziale il lavoro della calibrazione, fornendo incertezze molto basse. Infatti, l'incertezza estesa calcolata tramite il banco automatizzato è all'incirca di  $\pm 0.09\text{ }^{\circ}\text{C}$  e la deviazione standard media è  $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ . È evidente che tale banco non è limitato unicamente ad i sensori TMP117 ma a qualunque tipo di sensore di temperatura in grado di comunicare tramite SDA e SCL con Arduino.

## 5 Bibliografia

- [1] Benedict R.P., *Fundamentals of temperature, pressure and flow measurements*, New York, John Wiley & Sons, 1969
- [2] Bolzern P., Scattolini R., Schiavoni N., *Fondamenti di controlli automatici*, Milano, Mc-Graw-Hill Education, 2015
- [3] Capello A., *Misure Meccaniche e termiche: basi teoriche e principali sensori e strumenti*, Milano, Casa Editrice Ambrosiana, 1973
- [4] Doebelin E. O., *Strumenti e metodi di misura*, Milano, McGraw-Hill Education, 2008
- [5] <http://www.ti.com/product/TMP117>

## 6 Ringraziamenti

Arrivati alla conclusione della tesi, e quindi anche del mio percorso universitario triennale, mi sento in dovere di ringraziare tutte le persone che, in un modo o nell'altro, sono state parte di questo cammino.

Innanzitutto, ringrazio il prof. Lorenzo Scalise, relatore della tesi, perché è stato un punto fermo durante la stesura della stessa ed è stato fondamentale per rispondere a qualsiasi chiarimento o dubbio. Ringrazio, inoltre, Luca Antognoli, correlatore, che mi ha seguito durante tutto il tirocinio con dedizione.

Ringrazio i miei genitori che mi hanno sostenuto durante tutto il mio percorso universitario ed hanno creduto in me. Senza di loro tutto ciò non sarebbe stato possibile. Spero di avervi reso fieri di me.

Ringrazio i miei amici di sempre: Alessandro, Pietro e Chiara, perché siete stati una seconda famiglia per me. Mi avete dato la forza di superare ogni singola difficoltà e avete reso questo percorso molto più leggero.

Un ringraziamento speciale va a Laura, che è stata uno dei pilastri a cui mi sono aggrappato nei miei anni universitari e che ha gioito con me nei momenti felici e mi ha consolato in quelli brutti. Questa tesi, così come gran parte del mio percorso, è dedicata a te.

Infine, ringrazio Cristiano, Enrico, Luca, Daniele e tutte le persone che ho incontrato durante questi ultimi anni. Grazie mille per le centinaia di ore passate a lezione o a studiare insieme, a bere caffè o a condividere l'ansia per gli esami. Senza di voi, l'università sarebbe stata molto più noiosa.