

UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA INFORMATICA

# Sviluppo e Validazione di un Sensore di Pressione Flessibile per il Controllo di un Deambulatore Intelligente

**Relatore**

Prof. Luca Tonin

**Laureando**

Alberto Bottari

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

Data di Laurea 17/07/2024



*Arrivare a questo traguardo è stato possibile grazie all'affetto, al sostegno e all'incoraggiamento di alcune persone speciali nella mia vita.*

*Ai miei genitori, Luca e Silvia, che mi hanno insegnato il valore dello studio e del sacrificio, e che mi hanno permesso di intraprendere questo percorso senza pensieri. Grazie per avermi sempre spronato a dare il massimo.*

*Ai miei nonni, Enrico e Sara, che non hanno mai dubitato di me e che anzi, a volte, erano anche troppo convinti della mia riuscita, tanto che convincevano anche me a fare più di quanto pensassi di essere capace.*

*Ad Alessandra, che con il suo amore e la sua comprensione è stata il mio porto sicuro durante questo viaggio. Grazie per essere sempre stat al mio fianco, per avermi aiutato nei momenti di sconforto e per aver festeggiato con me ogni piccolo successo. Con te accanto, questo percorso è stato infinitamente più leggero, più piacevole e meno faticoso.*

*Ed infine, a tutte le persone convinte della mia riuscita, sperando che questo sia solo uno dei tanti successi che festeggeremo insieme.*



# **Sommario**

## **Capitolo 1: Introduzione**

In questo capitolo viene presentato il contesto e la motivazione alla base della ricerca. L'obiettivo principale dello studio è sviluppare e testare un sistema di sensori per il monitoraggio della pressione applicata alle manopole di un deambulatore. Viene fornita una panoramica della struttura della tesi, descrivendo come i vari capitoli sono interconnessi per raggiungere l'obiettivo del progetto.

## **Capitolo 2: Materiali e Metodi**

Questo capitolo descrive la metodologia utilizzata per progettare e implementare il sistema di sensori. Inizia con la configurazione e il setup dell'hardware, illustrando le impostazioni iniziali e il funzionamento dei pin di output e della comunicazione seriale. Successivamente, si affronta l'analisi del materiale dielettrico, descrivendo il setup sperimentale per misurare la resistività del materiale in funzione della pressione e i risultati ottenuti. Vengono poi discusse le sfide legate alla gestione dei cavi, alla protezione dei contatti, e alle soluzioni adottate. Infine, viene descritto il risultato finale, che include l'installazione e configurazione dei sensori, l'ottimizzazione del circuito e la raccolta dei dati finali.

## **Capitolo 3: Risultati**

In questo capitolo vengono analizzati i risultati ottenuti durante e dopo la fase di prototipazione. Inizia con l'analisi circuitale, esplorando i parametri di sensibilità e rumore del circuito e il comportamento del materiale plastico utilizzato. Prosegue con l'analisi dei risultati del prototipo, valutando la precisione e l'affidabilità del prototipo fornendo un esempio di dato raccolto. Infine, l'analisi dei risultati finali fornisce una valutazione dettagliata delle prestazioni del sistema di sensori installato sul deambulatore, discutendo la capacità di rilevamento della pressione e la calibrazione del sensore.

## **Capitolo 4: Discussione dei Risultati**

Questo capitolo offre una riflessione critica sui risultati ottenuti. Si discute la prestazione generale del sistema, evidenziando la capacità del sensore di rilevare pressioni e la precisione delle misurazioni. Viene esaminata la sensibilità e l'intervallo di misura, con un'analisi del compromesso tra sensibilità e rumore del sistema. Infine conclude con suggerimenti per ulteriori miglioramenti e ottimizzazioni basati sui risultati ottenuti.

# Indice

<b>Sommario</b>	<b>v</b>
<b>1 Introduzione</b>	<b>1</b>
1.1 Obiettivi . . . . .	2
1.1.1 Parametri del Sensore . . . . .	3
1.1.2 Montaggio del sensore . . . . .	3
<b>2 Materiali e Metodi</b>	<b>5</b>
2.1 Materiali e Componenti . . . . .	5
2.1.1 Materiali . . . . .	5
2.1.2 Componenti elettrici . . . . .	6
2.1.3 Microcontrollore . . . . .	6
2.2 Metodi . . . . .	6
2.2.1 Prototipo iniziale . . . . .	7
2.3 Analisi del materiale isolante . . . . .	9
2.4 Protezione dei contatti . . . . .	11
2.5 Montaggio finale sul deambulatore . . . . .	12
<b>3 Risultati</b>	<b>15</b>
3.1 Analisi Circuitale . . . . .	15
3.1.1 Schema del Circuito . . . . .	15
3.1.2 Studio fisico del sensore . . . . .	16
3.2 Analisi dei risultati del Prototipo . . . . .	17
3.3 Analisi dei Risultati Finali . . . . .	18
<b>4 Discussione dei risultati</b>	<b>21</b>
4.1 Riepilogo . . . . .	21
4.2 Conclusioni . . . . .	21



# Elenco delle figure

2.1	Riproduzione grafica del setup del prototipo . . . . .	7
2.2	Setup per il metodo di stima della funzione . . . . .	9
2.3	Grafico della funzione 2.1; sull'asse delle ascisse è espressa la massa dell'oggetto, sulle ordinate la resistenza del dielettrico. . . . .	10
2.4	E-skin prima e dopo la stagnatura, col confronto sulle 2 facce del tessuto . . . . .	11
2.5	Manopole sinistra e destra coi sensori montati . . . . .	12
3.1	Schema del circuito creato utilizzando <i>LTspice</i> [13]. . . . .	16



# Capitolo 1

## Introduzione

Le pelli elettroniche artificiali, note anche come e-skin, sono sistemi di rilevamento progettati per imitare le capacità della pelle umana, in particolare il senso del tatto[1]. Negli ultimi anni, la ricerca sulle e-skin ha fatto grandi progressi, spinta dalla crescente domanda di applicazioni in vari settori come la robotica, il monitoraggio sanitario e l'interazione uomo-macchina[2]. Analogamente alla pelle umana che consente agli esseri umani di interagire con l'ambiente circostante, i sensori tattili permettono ai robot di raccogliere informazioni sulla loro interazione fisica con il mondo[3]. Queste informazioni possono aiutare i robot a manipolare oggetti in modo più efficace, rilevare ed evitare collisioni e interagire in modo più naturale ma soprattutto sicuro con gli esseri umani[4].

Un'area di grande interesse nello sviluppo della pelle elettronica è la creazione di sensori in grado di percepire la pressione. Questi sensori di pressione sono fondamentali per il rilevamento tattile, consentendo alle e-skin di rilevare e interpretare la forza applicata alla loro superficie e la posizione in cui tale forza viene applicata[1]. Questa capacità è essenziale per compiti come la presa di oggetti, in cui un feedback preciso sulla quantità di pressione applicata è cruciale sia per prevenire danni all'oggetto ma allo stesso tempo garantire una presa salda e solida in modo tale che non scivoli[5].

Esistono vari approcci per la progettazione e la fabbricazione di sensori tattili per pelli artificiali, ciascuno con i propri vantaggi e svantaggi. Tra le principali tecnologie si distinguono i sensori piezoresistivi e quelli basati sulla tomografia a impedenza elettrica (EIT)[3].

**Sensori piezoresistivi:** I sensori piezoresistivi in genere sono costituiti da un materiale piezoresistivo, come gomma o inchiostro conduttivo, inserito tra due elettrodi conduttori[5]. Quando della pressione meccanica viene applicata al materiale piezoresistivo, la sua resistenza elettrica cambia, conseguenza del fatto che la resistività del materiale è influenzata dalla pressione applicata[5]. Questa variazione di resistenza viene misurata dagli elettrodi e convertita in un

segnaletico elettrico proporzionale alla pressione applicata[3], fino a saturazione dove il dielettrico si comporta come un conduttore rendendo la caduta di tensione ai suoi capi non significativa[6]. I vantaggi di questi sensori includono la facilità di produzione, il basso costo e la buona sensibilità[3]. Tuttavia, presentano svantaggi come sensibilità alla temperatura e all'umidità, isteresi (la risposta del sensore può dipendere dalla cronologia della pressione applicata) e risoluzione spaziale limitata, che rende difficile rilevare la distribuzione della pressione su un'area[1][3].

**Sensori EIT:** La tomografia a impedenza elettrica (EIT) è una tecnica di imaging non invasiva che stima la distribuzione della resistività interna in base ai dati di tensione-corrente di confine misurati dalla superficie di un conduttore[7]. Essa è quindi utilizzata per stimare la conduttività di un corpo attraverso misurazioni effettuate solo sui suoi bordi[7]. Se la conduttività in una regione del corpo cambia, cambia anche la distribuzione di corrente e l'EIT può essere utilizzata per quantificare questi cambiamenti[7]. I sensori EIT sono costituiti da una serie di elettrodi posizionati attorno al perimetro di un materiale conduttivo[7][8]. Un sensore EIT applica una piccola corrente alternata attraverso una coppia di elettrodi e misura le tensioni risultanti su tutte le altre coppie. La distribuzione della resistività all'interno del materiale viene quindi ricostruita utilizzando queste misurazioni. Quando viene applicata la pressione, la resistività locale del materiale cambia, consentendo al sensore di rilevare la distribuzione della pressione sull'intera area[8]. I vantaggi dei sensori EIT includono alta risoluzione spaziale (possono mappare la distribuzione della pressione su un'area), minore sensibilità alla temperatura e all'umidità rispetto ai sensori piezoresistivi, e la possibilità di essere realizzati in forme diverse e flessibili[9][10]. Tuttavia, sono più complessi da realizzare, richiedono algoritmi di ricostruzione delle immagini più complessi e hanno una sensibilità inferiore rispetto ai sensori piezoresistivi[8][10].

## 1.1 Obiettivi

L'obiettivo principale consiste nella costruzione e nella validazione di un sensore di pressione flessibile ma robusto, con particolare attenzione al costo e alla reperibilità dei materiali e componenti utilizzati. La flessibilità è necessaria perché esso si deve adattare a diverse curve e superfici, in particolare, nel caso di questo scritto, alle manopole di un deambulatore. La robustezza è necessaria perché il sensore è disposto in un contesto difficile: il suo utilizzo prevede infatti che venga stretto con forza e sottoposto a frizione (data dal movimento delle mani) e umidità (data dalla sudorazione delle stesse). È quindi necessario sviluppare tale sensore focalizzandosi sia sull'implementazione e ottimizzazione del circuito elettrico necessario al suo funzionamento, sia sulla costruzione fisica del sensore, con particolare attenzione a tutte quelle parti di contatto che potrebbero compromettersi con l'usura.

### 1.1.1 Parametri del Sensore

La "pelle artificiale" da montare sulle manopole del deambulatore richiede specifici parametri, dati dal caso studio preso in esame:

**Range e sensibilità:** Il sensore deve essere in grado di rilevare un ampio spettro di pressioni, captando sia piccole variazioni sia pressioni elevate. L'utente finale è infatti una persona con difficoltà motorie che utilizza il deambulatore per facilitarsi il movimento e che quindi scarica parte del suo peso corporeo sulle manopole, generando ingenti forze su di esse. Il sensore deve quindi raggiungere la saturazione solo a pressioni elevate per gestire queste situazioni. Al contempo, deve essere sufficientemente sensibile da rilevare lievi variazioni di pressione sulla presa, poiché l'obiettivo principale è riconoscere cambi di velocità e direzione del deambulatore, che si manifestano attraverso piccole modifiche nella pressione esercitata.

**Costo:** Il sensore deve essere a basso costo, consentendo di coprire ampie aree sensoriali senza incidere significativamente sul budget complessivo del progetto. È importante utilizzare componenti elettrici, materiali e sistemi di elaborazione dati economici per mantenere il progetto accessibile.

### 1.1.2 Montaggio del sensore

Una volta raggiunto il primo risultato bisogna adattare la skin artificiale così creata al contesto specifico preso in esame: si tratta quindi di eseguire tutte quelle operazioni necessarie al suo funzionamento non in piano, ma su di una superficie curva, risolvendo in particolare la problematica dei contatti che potrebbero rompersi o staccarsi col movimento, la gestione dei cavi e la scelta del materiale di appoggio più consono. L'obiettivo in questo caso è quindi raggiungere un compromesso accettabile tra precisione e robustezza del sensore. Oltre a questo bisogna concentrarsi anche sull'utilizzo ultimo del sistema e realizzare soluzioni ad hoc per risolvere determinati problemi specifici per l'applicazione dell'e-skin al deambulatore: la precisione del sensore può non essere uniforme su tutta la superficie, poiché i principali punti di pressione di una presa umana sono concentrati sulle dita e sul palmo della mano; inoltre alcuni punti, specialmente quelli necessari per chiudere il tessuto attorno alle manopole circolari, potrebbero risultare meno sensibili e precisi a causa dei punti di contatto dove il tessuto si sovrappone. Unendo queste due caratteristiche otteniamo l'intuizione sulla posizione in cui il sensore si andrà a chiudere: in quelle aree in cui la pressione della mano è meno presente o meno importante.

In questo lavoro di ricerca, è stato scelto di utilizzare un sistema piezoresistivo anziché la tomografia a impedenza elettrica (EIT) per la misurazione e il monitoraggio dei parametri desiderati. La decisione di adottare un sistema piezoresistivo è stata guidata principalmente da considerazioni economiche e pratiche. A differenza della tecnologia EIT, che richiede apparecchiature costose per la misurazione non invasiva delle variazioni di impedenza[9], il sistema piezoresistivo offre un'alternativa più accessibile e semplice. Utilizzando sensori piezoresistivi, è stato possibile raggiungere un compromesso efficace tra costo e prestazioni, consentendo una misurazione abbastanza precisa e in tempo reale, coerente coi parametri prima specificati[3]. Questa scelta strategica ha facilitato l'implementazione pratica del progetto, consentendo di concentrarsi maggiormente sulla sperimentazione e sull'analisi dei dati acquisiti, fondamentali per il raggiungimento degli obiettivi di ricerca prefissati.

# Capitolo 2

## Materiali e Metodi

Come accennato in precedenza, il focus principale è l'utilizzo di materiali a basso costo per permettere che la realizzazione del sensore sia budget-friendly. I componenti elettrici utilizzati, i materiali e l'elaboratore sono facilmente reperibili, rendendo l'esperimento facilmente replicabile.

### 2.1 Materiali e Componenti

#### 2.1.1 Materiali

I materiali utilizzati per la realizzazione del sensore sono stati selezionati in base alle loro caratteristiche tecniche, alla loro disponibilità ma soprattutto facendo particolare attenzione al prezzo, al fine di renderlo il più contenuto possibile.

- **Strisce di rame:** Sono state utilizzate strisce di rame adesive RS PRO, con dimensioni di 33 m x 10 mm x 0.035 mm. Queste strisce sono state scelte per la loro capacità di condurre elettricità in modo efficace e per la loro adesività, che facilita l'installazione sul tessuto.
- **Tessuto tecnico:** Il tessuto tecnico è un tessuto in fibra di poliestere ed è stato selezionato per la sua durabilità, flessibilità e impermeabilità, essenziali per garantire che il sensore possa adattarsi e rimanere stabile sulle manopole del deambulatore.
- **Plastica dielettrica:** Questo materiale ha la particolare proprietà di variare la sua resistività in risposta alla pressione applicata.

## 2.1.2 Componenti elettrici

I componenti elettrici utilizzati nel circuito sono stati selezionati soprattutto in base al prezzo, ma considerando anche tolleranza e potenza dissipata:

- **Resistori da 120Ω:** Resistori RS PRO con resistenza di 120Ω, potenza di 0.25W, e tolleranza del ±5%.
- **Resistori da 220Ω:** Resistori RS PRO con resistenza di 220Ω, potenza di 0.25W, e tolleranza del ±5%. Essi sono stati scelti come sostituto a quelli da 120Ω per il circuito finale.
- **Cavi:** I cavi utilizzati sono rivestiti in gomma durevole per prevenire possibili roture.
- **Pinze a coccodrillo:** Utilizzate per collegare temporaneamente i cavi ai punti di misura durante la fase di test e calibrazione del circuito.
- **Capicorda a occhiello:** Utilizzati per garantire connessioni elettriche sicure e permanenti tra i cavi e le strisce di rame attraverso la stagnatura.

## 2.1.3 Microcontrollore

Per gestire il circuito e processare i segnali provenienti dai sensori, è stato utilizzato un **Arduino MEGA 2560**. Questo modello è stato scelto per diverse ragioni. Innanzitutto, l'Arduino MEGA 2560 offre numerosi ingressi e uscite digitali e analogici, rendendolo adatto per gestire un ampio numero di strisce di rame e altre connessioni nel circuito. Inoltre, questo microcontrollore è noto per la sua affidabilità e la facilità di programmazione, caratteristiche essenziali per lo sviluppo e la gestione del sistema di sensori. Infine, grazie al suo ampio numero di pin e alle sue capacità di elaborazione, l'Arduino MEGA 2560 è in grado di gestire l'elaborazione dei segnali e l'integrazione di nuovi sensori o componenti se necessario.

## 2.2 Metodi

Il lavoro è stato suddiviso in varie fasi. Innanzitutto, è stato creato un piccolo prototipo per verificare la fattibilità del progetto; in questa fase è stato anche sviluppato l'algoritmo per Arduino per inviare e leggere i segnali. Successivamente, sono state effettuate misurazioni per comprendere il range di valori di resistenza assunti del materiale plastico dielettrico. Infine è stato implementato e migliorato il circuito: i contatti sono stati stagnati per migliorarne la robustezza e sono stati utilizzati fili di qualità superiore per favorire il montaggio.

### 2.2.1 Prototipo iniziale

La prima fase del lavoro è iniziata con la scelta del materiale su cui far aderire le strisce di rame: un tessuto tecnico, selezionato per garantire resistenza all'usura, all'umidità e alla deformazione causata dall'ambiente di utilizzo.

Sulle parti interne di due pezzi di tessuto di questo materiale, sono state attaccate le strisce di rame ad una distanza di 1 cm, formando così una griglia quando sovrapposti. Un lembo di tessuto rappresenta le righe, mentre l'altro rappresenta le colonne. Successivamente, il materiale plastico è stato ritagliato delle dimensioni corrette.

Le strisce di rame sono state poi collegate a un circuito utilizzando delle pinze a coccodrillo. Le righe sono state collegate alle uscite digitali di Arduino, mentre le colonne sono state collegate su una breadboard. Sulla breadboard è stato assemblato il circuito: ogni colonna è stata collegata ad un'entrata analogica di Arduino (per rilevare il potenziale) e in parallelo ad essa (quindi in serie alla resistenza data dal dielettrico) un resistore da  $120\Omega$ , che infine terminava nel pin ground del microcontrollore. Il resistore è necessario in quanto in sua assenza le entrate analogiche sarebbero in cortocircuito con il pin ground di Arduino rendendo il potenziale misurato nullo.

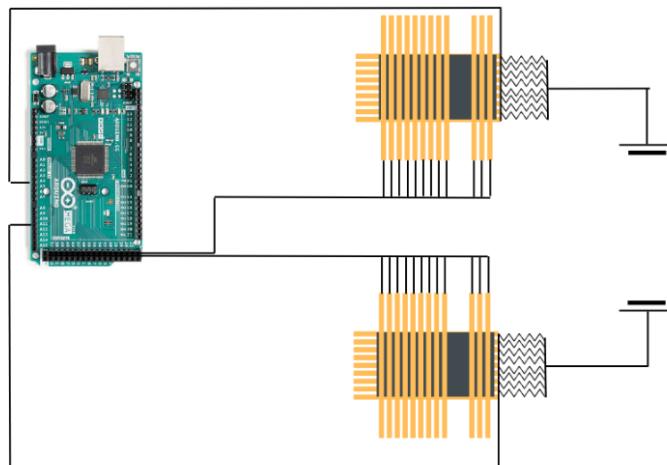


Figura 2.1: Riproduzione grafica del setup del prototipo

Creato fisicamente il prototipo, è stato necessario programmare l'Arduino per inviare e leggere i segnali. Il codice c++ utilizzato è il seguente:

```

#include <ArduinoJson.h>

static const int startOutputPin = 2
static const int endOutputPin = 11

void setup() {
    // Imposta i pin digitali da startOutputPin a endOutputPin come output
    for (int i = startOutputPin; i <= endOutputPin; i++) {
        pinMode(i, OUTPUT);
    }
    // Inizializza la comunicazione seriale
    Serial.begin(9600);
}

```

Questa è la funzione di setup che imposta semplicemente i pin associati alle righe del tessuto come uscite (OUTPUT); inoltre, avvia la comunicazione seriale tra l'Arduino e il computer che riceverà i dati letti da Arduino;

```

void loop() {
    JsonDocument doc;
    // Invia segnali digitali HIGH (5V) dai pin da 2 a 11
    for (int i = 2; i <= 11; i++) {
        digitalWrite(i, HIGH);
        // Leggi e stampa i valori analogici dai pin A0 ad A6
        for (int analogPin = A0; analogPin <= A6; analogPin++) {
            doc[i-startOutputPin][analogPin-A0] = analogRead(analogPin);
        }
        digitalWrite(i, LOW);
    }
    serializeJson(doc, Serial);
    Serial.println();
}

```

Nella funzione ‘loop‘, viene attivata una riga del sensore alla volta, e si leggono tutti i valori riportati sulle colonne. In questo modo viene creata una matrice in cui ogni cella rappresenta un’intersezione riga-colonna. La strategia di comunicazione tra Arduino e il sistema che riceverà i dati consiste nell’incapsulamento dei dati in una matrice JSON, grazie alla libreria ArduinoJson[11]. Questo approccio standardizza e semplifica il trasferimento e la traduzione dei dati.

## 2.3 Analisi del materiale isolante

Per determinare la legge fisica della resistività del materiale isolante in funzione della pressione applicata, è stato progettato un setup sperimentale costituito da due strisce di rame separate da un campione del materiale plastico dielettrico. Il metodo di misura consiste nell'applicare degli oggetti con masse note e dimensioni della base di appoggio uguali sul materiale e nella successiva rilevazione della resistenza tra le due strisce di rame utilizzando un multmetro. La resistenza misurata, quindi, è direttamente influenzata dalla proprietà isolante del materiale sottoposto a diverse pressioni.

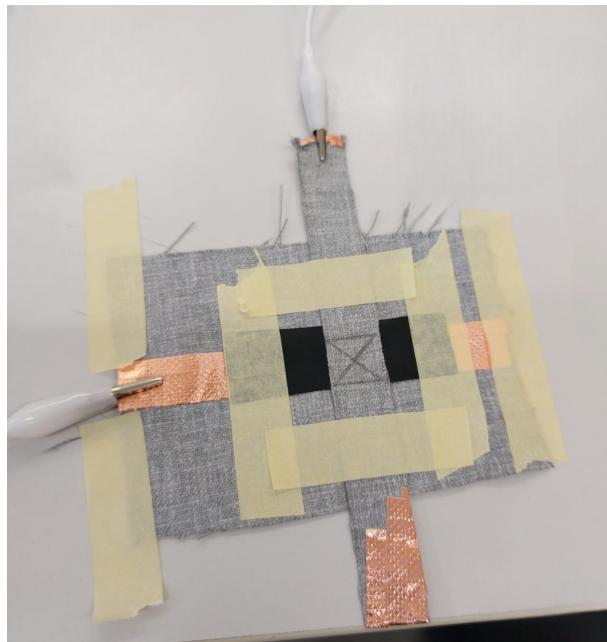


Figura 2.2: Setup per il metodo di stima della funzione

La pressione applicata al materiale è definita come la forza esterna divisa per l'area su cui essa agisce[12]. Nel nostro esperimento, la forza applicata è rappresentata dal peso delle masse, e poiché tutte le masse hanno la stessa area di contatto (il quadrato 2cm x 2cm in figura 2.2), possiamo organizzare i risultati in funzione della massa stessa. I dati ottenuti sono riassunti nella tabella seguente:

Dai dati tabulati si osserva che la resistenza misurata diminuisce con l'aumento della pressione applicata, sebbene non in modo lineare. Per meglio comprendere la relazione tra resistenza e pressione, è stata effettuata un'interpolazione dei dati, che ha portato alla seguente funzione approssimativa (dove la variabile  $x$  rappresenta la massa in grammi,  $f(x)$  la resistenza del dielettrico):

$$f(x) = 64.34 + \frac{1255.52}{(1 + 4 \cdot 10^{-4} \cdot x^2)} \quad (2.1)$$

<b>Massa [g]</b>	<b>Resistenza [<math>\Omega</math>]</b>
27	1025
37	880
42	760
52	675
57	585
67	500

Tabella 2.1: Tabella dei valori di prova

Il cui grafico nel range di nostro interesse è il seguente:



Figura 2.3: Grafico della funzione 2.1; sull'asse delle ascisse è espressa la massa dell'oggetto, sulle ordinate la resistenza del dielettrico.

Ulteriori esperimenti con diverse masse di prova confermano che la legge interpolata si adatta in maniera soddisfacente ai nuovi dati raccolti. I valori delle nuove prove sono i seguenti:

<b>Massa [g]</b>	<b>Resistenza prevista [<math>\Omega</math>]</b>	<b>Resistenza effettiva [<math>\Omega</math>]</b>
20	1146.40	1180
40	829.70	818
60	578.76	571
80	416.92	422

Tabella 2.2: Tabella coi nuovi valori e loro previsione

Questi risultati dimostrano che la legge di resistività trovata è robusta e applicabile anche a pressioni diverse da quelle inizialmente testate, confermando la validità del modello proposto.

## 2.4 Protezione dei contatti

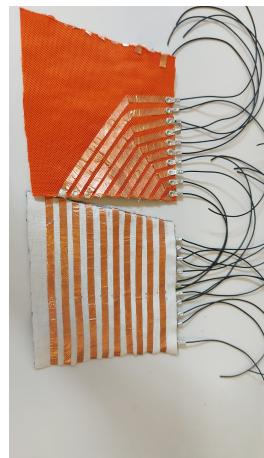
L'installazione del sensore sulle manopole ha presentato diverse difficoltà a causa della loro forma particolare. Le manopole sono di forma conoidale, con due circonferenze differenti tra l'inizio e la fine. Inoltre, la parte terminale delle manopole è situata molto vicino alla struttura del deambulatore, complicando la gestione dei cavi.

La forma conoidale facilitava la gestione dei cavi per le colonne, poiché essi potevano uscire direttamente dalla parte finale della manopola. Tuttavia, per le righe, la natura circolare della manopola non offriva un punto di uscita adeguato. Questo problema è stato risolto estendendo le strisce di rame dall'altro lato del lembo di tessuto. In questo modo, le strisce coprono entrambe le facce del tessuto, permettendo loro di raggiungere la parte finale della manopola e garantendo la corretta disposizione dei cavi.

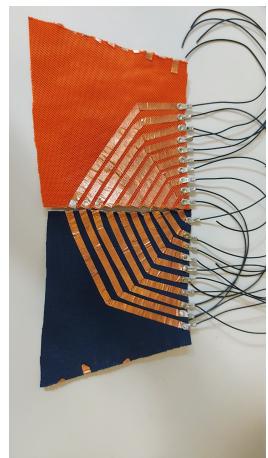
Per risolvere invece il problema della fragilità dei contatti, è stato deciso di sostituire le pinze a coccodrillo con dei capicorda a occhiello. Questi ultimi sono stati da un lato saldati sulle strisce di rame e, dall'altro, sono stati fissati i cavi utilizzando una crimpatrice. Il risultato finale, visibile in figura, mostra i due sensori (il materiale è identico, cambia solo il colore per distinguerli) con tutti i contatti saldati e i fili pronti per essere raggruppati e utilizzati nel circuito. Così facendo, entrambe le problematiche sono state risolte in modo ottimale, permettendo un montaggio tutto sommato semplice ma allo stesso tempo robusto.



(a) E-skin prima della stagnatura



(b) E-skin con le facce a confronto



(c) E-skin pronta per essere montata

Figura 2.4: E-skin prima e dopo la stagnatura, col confronto sulle 2 facce del tessuto

## 2.5 Montaggio finale sul deambulatore

Una volta risolti i problemi fisici e implementativi, si è proceduto all’installazione dei sensori sulle manopole, adottando tutti gli accorgimenti descritti precedentemente. Il primo passo è consistito nel fissare il primo strato di tessuto sulle manopole, con le strisce di rame rivolte verso l’esterno, utilizzando del nastro biadesivo. Successivamente, sono stati ritagliati due pezzi del materiale plastico delle dimensioni appropriate e fissati con un sottile strato di biadesivo sulla parte laterale interna delle manopole perché in questa zona la presa della mano è meno critica per il rilevamento della pressione proprio per la sua conformazione. Infine, l’ultimo strato del sensore è stato posizionato sopra l’isolante e fissato con del biadesivo nello stesso punto. L’installazione della ”pelle artificiale” è stata completata collegando il sistema all’Arduino per raccogliere i dati e verificare il corretto funzionamento del sistema. La scelta dell’utilizzo di due Arduino è stata fatta semplicemente per una questione di comodità, data dalla lunghezza dei cavi e dal fatto che ne erano disponibili due esemplari di quel microcontrollore.

Il circuito è stato ottimizzato utilizzando resistori con resistenza più elevata per estendere il range di valori rilevati e migliorare la sensibilità. In particolare, sostituendo i resistori da  $120\Omega$  con resistori da  $240\Omega$ , si è raggiunto un buon compromesso tra rumore e range del sensore.



(a) Manopola sinistra



(b) Manopola destra

Figura 2.5: Manopole sinistra e destra coi sensori montati

Dopo aver completato il montaggio del circuito e dei sensori sono stati raccolti i dati finali

utilizzando il deambulatore, similmente a quanto farebbe una persona anziana, quindi con una presa salda e parte del peso corporeo scaricato sulle manopole. L'algoritmo di lettura dei segnali invece non è cambiato dal prototipo in quanto ritenuto già ottimale.



# Capitolo 3

## Risultati

Questa sezione è dedicata all'analisi del lavoro svolto, in particolare per quanto riguarda il circuito alla base del funzionamento del sensore, ai risultati ottenuti dal prototipo e ai risultati finali ricavati dall'utilizzo del deambulatore con i sensori montati sulle manopole.

### 3.1 Analisi Circuitale

Il parametro chiave che gestisce sia la sensibilità del circuito sia il rumore generato dallo stesso è la resistenza tra il ground e i lettori di potenziale di Arduino. Il principio di funzionamento si basa sul comportamento del materiale plastico utilizzato: quando non è sottoposto a pressione, si comporta come un isolante con valori di resistenza molto elevati (dell'ordine di  $10^4\Omega$ ), rendendo la caduta di potenziale sul resistore quasi nulla. Quando la pressione è applicata, le due resistenze diventano comparabili, rendendo la caduta di potenziale osservabile.

L'utilizzo di resistori con valori molto elevati può aumentare eccessivamente la sensibilità del sensore, rendendolo suscettibile anche a minime variazioni di pressione e influenzato dai cambiamenti nelle celle vicine. D'altra parte, un resistore con un valore troppo basso potrebbe non rilevare adeguatamente le variazioni di pressione e non utilizzare l'intero range di valori disponibile. Un buon compromesso è stato trovato con l'uso di resistori da  $240\Omega$ , che offrono una sensibilità adeguata senza introdurre rumore eccessivo: il range di valori passa da 0-400 circa a 0-700 circa considerando la stessa pressione applicata, mantenendo comunque un rumore tra celle vicine prossimo allo 0.

#### 3.1.1 Schema del Circuito

Il circuito creato può essere schematizzato come segue:

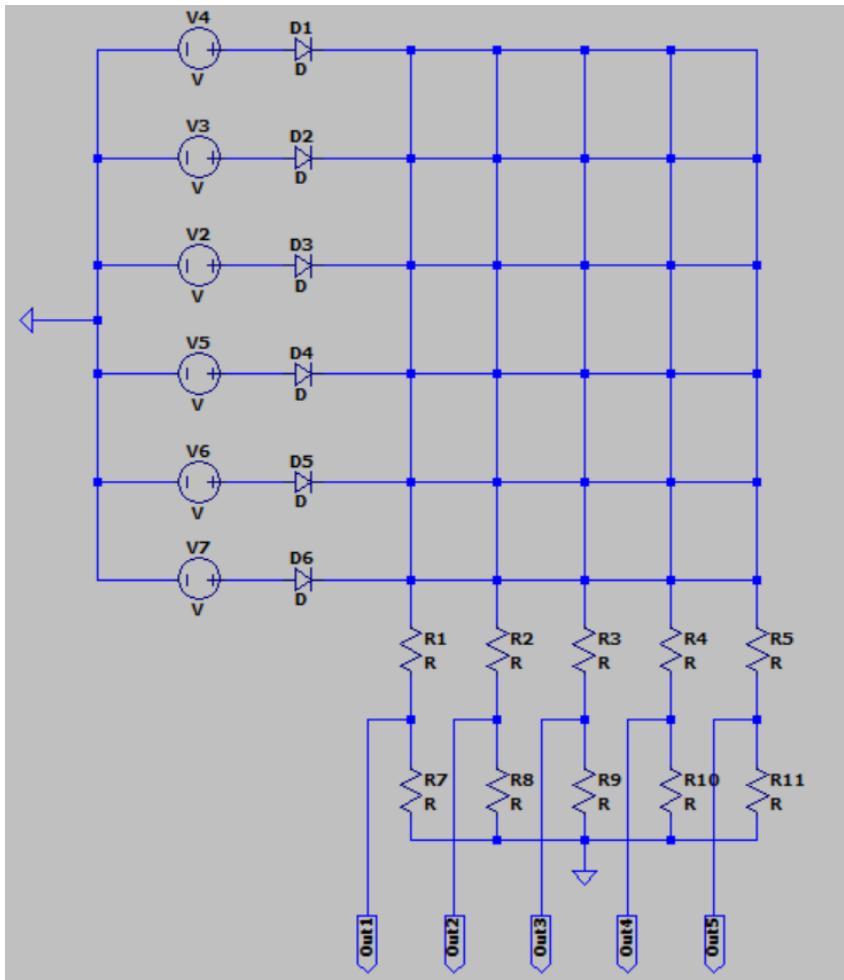


Figura 3.1: Schema del circuito creato utilizzando *LTspice* [13].

Nel circuito, viene acceso solo un generatore di tensione per volta. I diodi, pur non essendo presenti nel circuito reale, sono stati inclusi nello schema per evidenziare che la corrente non può scorrere all'interno dei pin di output di Arduino. I potenziali in figura 3.1 nominati con *Out1*, *Out2* ecc. sono quelli che vengono rilevati dai pin di input analogico. Le resistenze *R7-R11* sono quelle che governano la sensibilità e il range del sensore in quanto i rilevatori di Arduino misurano la differenza di potenziale ai loro capi. Per esigenze dimensionali la figura non è esaustiva, infatti la rappresentazione in due dimensione del circuito reale (che è tridimensionale) prevederebbe che ogni collegamento riga-colonna abbia la sua resistenza associata (rappresentata in figura solo dalle resistenze *R1-R5*, una per colonna).

### 3.1.2 Studio fisico del sensore

Utilizzando la prima legge di Ohm[14]:

$$\Delta V = R \cdot I$$

e la proprietà delle resistenze in serie[14]:

$$R_{\text{TOT}} = R_1 + R_2$$

per un voltaggio noto come quello fornito da Arduino dove  $\text{HIGH} = 5V$  [15], chiamando  $R_n$  la resistenza del resistore inserito e  $R_M$  quella del materiale plastico, possiamo scrivere:

$$V_{\text{HIGH}} = (R_n + R_M) \cdot I$$

da cui:

$$I = \frac{V_{\text{HIGH}}}{R_n + R_M}$$

La caduta di tensione ai capi del resistore è quindi:

$$\Delta V_{R_n} = V_{R_n} = R_n \cdot I = V_{\text{HIGH}} \cdot \frac{R_n}{R_n + R_M}$$

Abbiamo quindi i due casi descritti in precedenza:

- **Pressione non applicata** Quando la pressione non è applicata il materiale plastico si comporta come una resistenza di valore elevato; la caduta di tensione  $\Delta V_{R_n}$  può essere approssimata come segue:

$$V_{R_n} = V_{\text{HIGH}} \cdot \frac{R_n}{R_n + R_M} \approx V_{\text{HIGH}} \cdot \frac{R_n}{R_M} \approx 0 \quad \text{perché} \quad R_M \gg R_n$$

- **Pressione applicata** Quando la pressione è applicata  $R_M$  assume valori dello stesso ordine di grandezza di  $R_n$ , quindi  $V_{R_n}$  non è più approssimabile a zero. Si può rilevare tramite i sensori di Arduino la caduta di potenziale  $V_{R_n}$  e stimare quindi la resistenza del materiale isolante:

$$R_M = \frac{R_n}{V_{R_n}} \cdot (V_{\text{HIGH}} - V_{R_n}) \quad (3.1)$$

## 3.2 Analisi dei risultati del Prototipo

Il prototipo è stato essenziale per verificare la fattibilità dell'esperimento perché i risultati ottenuti sono stati incoraggianti. Utilizzando un semplice script Python per leggere i dati dalla porta seriale del computer connesso ad Arduino e per visualizzare i risultati di pressione restituiti, è stato possibile osservare che il sistema rilevava con buona precisione la posizione e la forza di contatto dell'oggetto di prova.

Di seguito è riportato un esempio dei dati restituiti dalla porta seriale con il prototipo:

```
[[0,0,0,0,0,0,0],[0,0,0,0,0,0,0],[0,1,4,85,0,0,0],[0,2,4,326,0,0,0],
[0,0,0,18,0,0,0],[14,21,0,139,1,0,1],[0,3,0,0,0,0,0],[0,0,0,0,0,0,0],
[0,0,0,0,0,0,0],[0,0,0,0,0,0,0]]
```

Questo tipo di dato è in formato JSON e rappresenta una matrice (array di array) con 10 righe e 7 colonne. La sua traduzione in formato comprensibile è mostrata nella Tabella 3.1.

0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	1	4	85	0	0	0
0	2	4	326	0	0	0
0	0	0	18	0	0	0
14	21	0	139	1	0	1
0	3	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0

Tabella 3.1: Esempio di dati restituiti dalla porta seriale con il prototipo

Dall’analisi di questa matrice, possiamo osservare che è stata applicata una forza notevole nella parte centrale-alta del prototipo.

I valori possono sembrare confusionari, ma in realtà rispettano il fatto che il valore misurato (quindi la tensione tra 0 V e 5 V) è stato normalizzato su un intervallo compreso tra 0 e 1024, dato che il convertitore analogico-digitale (ADC) di Arduino ha una risoluzione di 10 bit [16]. I risultati utilizzano solo un piccolo range di valori di quelli rilevabili da Arduino poiché, in questo stadio dello sviluppo, il circuito utilizzava ancora resistenze da  $120\Omega$ , richiedendo una pressione molto grande per restituire valori elevati.

In definitiva, il prototipo ha dimostrato che il sistema è capace di rilevare con buona precisione la posizione e la forza di contatto. Tuttavia, sono necessari ulteriori miglioramenti e calibrazioni per ottimizzare la sensibilità e ridurre il rumore.

### 3.3 Analisi dei Risultati Finali

Dopo aver completato le fasi di sviluppo e prototipazione, sono stati analizzati i dati raccolti dai sensori installati sulle manopole del deambulatore per valutarne l’affidabilità e la precisione.

I risultati ottenuti sono stati soddisfacenti. I sensori hanno dimostrato una buona capacità di rilevare la forza di pressione applicata sulle manopole, con valori di tensione normalizzati che raggiungono circa 700 su una scala di misura che va da 0 a 1024. Questo suggerisce che il sistema riesca a sfruttare un ampio intervallo di misura dell’ADC di Arduino, indicando così

una buona linearità e sensibilità del sistema. Sebbene non sia stata creata una scala esplicita tra la pressione e la tensione rilevata, è possibile stimare la resistenza del materiale isolante sotto condizioni di alta pressione. Utilizzando una proporzione, possiamo determinare il valore di tensione corrispondente a 700 (valore massimo ritornato da arduino):

$$5V : 1024 = x : 700V \longrightarrow x \approx 3.4V$$

Dalla formula per la resistenza 3.1, si deduce che la resistenza del materiale plastico a tale pressione rilevata sia di circa  $113\Omega$ . Comparando questo valore con le masse di prova, e invertendo la formula 2.1, si ottiene che tale resistenza corrisponderebbe a una massa di prova di circa 249 grammi. Questo risultato appare coerente, considerando che la forza applicata dall'utilizzatore sulle manopole (e quindi sul sensore che le ricopre) è si distribuita su una superficie relativamente grande, ma anche che tale forza è elevata perché comprende il peso corporeo che viene scaricato su di esse. I dati ottenuti indicano che il sistema di rilevamento della forza di pressione applicata sulle manopole del deambulatore funziona in modo abbastanza efficace, con una buona linearità e sensibilità, confermando l'affidabilità del sensore e la validità del design del sistema.



# **Capitolo 4**

## **Discussione dei risultati**

### **4.1 Riepilogo**

La capacità di rilevare pressioni sia elevate che lievi è particolarmente importante per l'uso del deambulatore in contesti clinici o di riabilitazione, dove le variazioni nella forza di presa possono fornire informazioni utili per monitorare i progressi dei pazienti o per adattare le impostazioni del dispositivo alle esigenze individuali. La precisione della misurazione della posizione di pressione sulle manopole è stata discreta. Nonostante il pattern delle manopole e il metodo di fissaggio rudimentale dei sensori possano aver introdotto delle imprecisioni, i sensori sono riusciti a fornire dati coerenti. Questo è particolarmente significativo considerando le evidenti limitazioni del setup, come ad esempio il montaggio rudimentale dei sensori e l'assenza di strumenti particolarmente sofisticati per l'assemblaggio del circuito.

L'intervallo di misura del sensore è stato ottimizzato per coprire una gamma sufficientemente ampia da rilevare variazioni di pressione dalla presa leggera a quella più forte. L'uso delle resistenze da  $240\Omega$  ha dimostrato un buon equilibrio tra sensibilità e rumore. Valori estremamente alti di resistenza avrebbero potuto amplificare il rumore e ridurre la precisione, mentre valori troppo bassi avrebbero potuto limitare la gamma di misura. La scelta di  $240\Omega$  è stata quindi appropriata e ha contribuito a ottenere letture affidabili senza eccessivo rumore.

### **4.2 Conclusioni**

Il progetto ha dimostrato la capacità della e-skin di rilevare con precisione le variazioni di pressione applicata alle manopole del deambulatore. Nonostante le limitazioni dovute al montaggio rudimentale e alla mancanza di strumenti avanzati per l'assemblaggio, i risultati ottenuti sono stati soddisfacenti e coerenti. Tra i punti di forza emersi, il rilevamento accurato delle pressioni e l'equilibrio tra sensibilità e rumore sono stati particolarmente significativi. Ci sono tuttavia

ampi margini di miglioramento che potrebbero essere esplorati per ottimizzare ulteriormente il dispositivo. Un metodo di montaggio dei sensori più stabile e preciso sarebbe essenziale per ridurre le imprecisioni. Inoltre, ottimizzare l'elettronica attraverso l'uso di un singolo Arduino potrebbe semplificare il circuito e ridurre ancora maggiormente il costo del progetto. Si potrebbe anche verificare la presenza di correnti di ritorno sui pin di output di Arduino e nel caso utilizzare dei diodi per annullare tali correnti oppure esplorare nuove configurazioni per quanto riguarda le resistenze presenti nel circuito, al fine di migliorare il suo tempo di salita, la sua precisione o il rumore rilevato. Infine, condurre sperimentazioni coinvolgendo i veri utenti finali del deambulatore permetterebbe di comprendere meglio il range di pressioni che l'e-skin deve rilevare, consentendo di adattare il circuito di conseguenza.

# Bibliografia

- [1] U. P. Claver e G. Zhao, «Recent Progress in Flexible Pressure Sensors Based Electronic Skin,» *AEM Journal*, 2021.
- [2] D. Silvera-Tawil, D. Rye e M. Velonaki, «Artificial skin and tactile sensing for socially interactive robots: A review,» *Robotics and Autonomous Systems*, 2015.
- [3] C. Lucarotti, C. M. Oddo, N. Vitiello e M. C. Carrozza, «Synthetic and Bio-Artificial Tactile Sensing: A Review,» *MDPI*, 2013.
- [4] M. Teyssier, B. Parilusyan, A. Roudaut e J. Steimle, «Human-Like Artificial Skin Sensor for Physical Human-Robot Interaction,» *ICRA*, 2021.
- [5] G. H. Büscher, R. Kõiva, C. Schürmann, R. Haschke e H. J. Ritter, «Flexible and stretchable fabric-based tactile sensor,» *Robotics and Autonomous Systems*, 2015.
- [6] R. B. Mishra, S. M. Khan, S. F. Shaikh, A. M. Hussain e M. M. Hussain, «Low-cost foil/paper based touch mode pressure sensing element as artificial skin module for prosthetic hand,» *AIP Advances*, 2020.
- [7] D. S. Tawil, D. Rye e M. Velonaki, «Improved Image Reconstruction for an EIT-Based Sensitive Skin With Multiple Internal Electrodes,» *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS*, 2011.
- [8] H. Alirezaei, A. Nagakubo e Y. Kuniyoshi, «A Tactile Distribution Sensor Which Enables Stable Measurement Under High and Dynamic Stretch,» *2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 2007.
- [9] K. Liu, Y. Wu, S. Wang et al., «Artificial Sensitive Skin for Robotics Based on Electrical Impedance Tomography,» *Advanced Intelligent Systems*, 2020.
- [10] M. Jamshidi, C. B. Park e F. Azhari, «An EIT-based piezoresistive sensing skin with a lattice structure,» *Materials Design*, 2023.
- [11] A. Team, *ArduinoJson Library*, Version 7.0.4, arduinojson.org, 2024. indirizzo: <https://arduinojson.org/>.
- [12] R. A. Serway e J. W. Jewett, *Fisica per scienze e ingegneria*. Edises, 2023.

- [13] A. Devices, *Ltspice*, Version 17.0, 2024. indirizzo: <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltpice-simulator.html>.
- [14] P. Mazzoldi, M. Nigro e C. Voci, *Elementi di fisica Elettromagnetismo onde*. Edises, 2008.
- [15] Arduino. (2024), indirizzo: <https://www.arduino.cc/reference/en/language/variables/constants/highlow/>.
- [16] Arduino. (2024), indirizzo: <https://www.arduino.cc/reference/it/language/functions/analog-io/analogread/>.