



Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

---

Tesi di Laurea Magistrale

**ROBOTICS FOR LIFE: SVILUPPO DI  
DISPOSITIVI DI SICUREZZA E DI  
MANIPOLAZIONE PER ROBOT DI  
SALVATAGGIO TELE-OPERATO**

**Relatrice**

Prof.ssa Daniela Maffiodo

**Co-relatore**

Prof. Terenziano Raparelli

**Candidato**

Raffaele Sanchirico

---

Anno accademico 2024-2025

---

## SOMMARIO

Il presente elaborato descrive la progettazione e lo sviluppo di dispositivi di sicurezza e di manipolazione destinati a un robot mobile per operazioni di salvataggio in pozzi artesiani, un contesto in cui le attuali tecniche di intervento risultano estremamente complesse e spesso inefficaci.

Il tragico incidente di Vermicino del 1981, in cui il piccolo Alfredo Rampi perse la vita dopo essere caduto in un pozzo artesiano, così come tanti altri casi analoghi, misero in luce la mancanza di tecnologie adeguate per affrontare con tempestività e sicurezza emergenze di questo tipo. Ancora oggi, a distanza di decenni, la maggior parte dei tentativi di recupero in scenari analoghi si conclude purtroppo con esito negativo, a causa delle difficoltà operative e dei rischi connessi ai metodi tradizionali [3].

In tale contesto, presso il DIMEAS del Politecnico di Torino, in collaborazione con l'Università dell'Aquila e su proposta dello speleologo Tullio Bernabei, è stato avviato lo sviluppo di un robot di salvataggio tele-operato, con l'obiettivo di mettere in sicurezza e recuperare la vittima nel minor tempo possibile. Il lavoro svolto in questa tesi si concentra sull'implementazione di nuovi sottosistemi meccanici ed elettronici su un prototipo preesistente, finalizzati a migliorarne le prestazioni e l'efficienza operativa.

In particolare, è stato progettato e realizzato un sistema di scorrimento per il dispositivo di sicurezza e un sistema di manipolazione composto da due braccia robotiche tele-operate.

Il sistema di scorrimento, sviluppato a partire da un'idea dell'ing. Astuti, è stato opportunamente modificato per migliorarne la robustezza strutturale e l'affidabilità operativa. La movimentazione è controllata da una scheda Raspberry Pi Pico tramite comunicazione a infrarossi, soluzione adottata per evitare l'attorcigliamento dei cavi di collegamento del circuito durante le operazioni di movimento all'interno del pozzo. Il dispositivo è stato successivamente realizzato fisicamente e integrato nel robot insieme al relativo circuito elettronico di controllo, garantendo un funzionamento stabile e coordinato con gli altri sottosistemi.

Le braccia robotiche tele-operate, invece, sono state originariamente progettate presso l'Università dell'Aquila sotto la supervisione dell'ing. Durante, che ha seguito l'intero sviluppo del progetto e ne ha coordinato la fase di realizzazione. Il mio contributo si è concentrato sull'adattamento del progetto originale alle specifiche esigenze del robot di

---

---

salvataggio, sulla realizzazione fisica dei moduli master e slave e sulla successiva fase di test sperimentale. Il sistema, basato su microcontrollori Arduino, utilizza un controllo master/slave che replica in tempo reale i movimenti dell'operatore, consentendo una manipolazione precisa, intuitiva e reattiva durante le operazioni di soccorso.

La progettazione meccanica è stata condotta in ambiente SolidWorks, mentre i componenti sono stati realizzati mediante stampa 3D e successivamente sottoposti a prove funzionali. I risultati ottenuti dimostrano la piena operatività dei sistemi sviluppati e rappresentano un passo significativo verso la realizzazione di un robot di soccorso completamente operativo, in grado di intervenire in scenari reali con rapidità e sicurezza.

---

# Indice

<b>Indice delle Figure.....</b>	<b>IV</b>
<b>Indice delle Tabelle.....</b>	<b>VIII</b>
<b>CAPITOLO 1. Analisi del problema e stato dell'arte.....</b>	<b>1</b>
1.1    Introduzione.....	1
1.2    Incidenti in pozzi artesiani: criticità e limitazioni delle tecniche di soccorso tradizionali .....	3
1.3    Requisiti operativi per un sistema di salvataggio robotico .....	7
1.4    Soluzioni robotiche esistenti per ambienti confinati e soccorsi verticali .....	9
1.5    Specifiche funzionali del progetto.....	15
<b>CAPITOLO 2. Architettura generale del sistema di soccorso.....</b>	<b>17</b>
2.1    Idea di partenza .....	17
2.2    Struttura e componenti principali del robot .....	18
2.3    Sottosistemi meccanici, elettronici e di controllo .....	20
2.3.1    Sottosistema meccanico .....	21
2.3.2    Sottosistema elettronico.....	25
2.3.3    Sottosistema di controllo.....	27
2.4    Logica di funzionamento generale.....	28
2.5    Obiettivi del progetto di tesi .....	30
<b>CAPITOLO 3. Ottimizzazione del prototipo e progettazione dell'ambiente di test .....</b>	<b>32</b>
3.1    Modifiche e ottimizzazioni del robot.....	32
3.2    Progettazione dell'ambiente di test.....	34
<b>CAPITOLO 4. Movimentazione del dispositivo di sicurezza.....</b>	<b>39</b>
4.1    Progettazione del sistema di scorrimento .....	39
4.2    Schema elettrico e comunicazione infrarossi .....	43
4.2.1    Lato trasmettitore.....	44
4.2.2    Lato ricevitore .....	45

---

---

4.3	Software di gestione e interfaccia di comando.....	47
4.4	Implementazione sul prototipo .....	50
4.5	Risultati ottenuti .....	54
<b>CAPITOLO 5. Braccia robotiche tele-operate.....</b>		<b>57</b>
5.1	Obiettivi e requisiti funzionali delle braccia.....	58
5.2	Cinematica e configurazione del sistema Slave .....	61
5.2.1	Spalla (1° grado di libertà) .....	62
5.2.2	Gomito (2° e 3° grado di libertà).....	63
5.2.3	Polso (4°, 5° e 6° grado di libertà).....	64
5.2.4	Considerazioni generali sulla progettazione .....	65
5.3	Cinematica e configurazione del sistema Master.....	65
5.3.1	Spalla (1° grado di libertà) .....	66
5.3.2	Gomito (2° e 3° grado di libertà).....	67
5.3.3	Polso (4°, 5° e 6° grado di libertà).....	68
5.3.4	Considerazioni generali sulla progettazione .....	69
5.4	Realizzazione fisica e assemblaggio.....	69
5.4.1	Assemblaggio dello Slave.....	70
5.4.2	Assemblaggio del Master.....	72
5.4.3	Montaggio dell'encoder AMT102V .....	73
5.4.4	Completamento del sistema .....	75
5.5	Sistema di controllo master/slave.....	76
5.5.1	Architettura di controllo e flusso dei segnali.....	76
5.5.2	Implementazione del controllo tramite SiplexFOC .....	78
5.5.3	Integrazione operativa e prospettive d'uso .....	79
5.6	Risultati ottenuti .....	79
5.6.1	Affidabilità del sistema Master-Slave.....	80
5.6.2	Prestazioni meccaniche del prototipo .....	80
5.6.3	Potenziale miglioramento del sistema di controllo .....	81
5.6.4	Valutazione complessiva e prospettive future.....	81

---

---

<b>CAPITOLO 6. Conclusioni e sviluppi futuri .....</b>	<b>83</b>
6.1    Risultati raggiunti.....	83
6.2    Prospettive di miglioramento e applicazioni future.....	84
<b>Bibliografia.....</b>	<b>86</b>
<b>Appendice A – Distinta componenti del sistema di scorrimento .....</b>	<b>89</b>
A.1 – Componenti commerciali sistema di scorrimento.....	89
A.2 – Componenti realizzati in alluminio (a disegno) sistema di scorrimento .....	89
<b>Appendice B – Codici sorgente del sistema di scorrimento .....</b>	<b>91</b>
B.1 – Interfaccia PC ( <code>pc_sender.py</code> ) .....	91
B.2 – Raspberry Pi Pico trasmittente ( <code>pico_tx.py</code> ) .....	92
B.3 – Raspberry Pi Pico ricevente ( <code>pico_rx.py</code> ) .....	94
<b>Appendice C – Distinta componenti delle braccia tele-operate.....</b>	<b>96</b>
C.1 – Componenti commerciali braccia tele-operate.....	96
C.2 – Componenti realizzati in alluminio (a disegno) braccia tele-operate .....	96
<b>Appendice D – Codici sorgente delle braccia tele-operate .....</b>	<b>97</b>
D.1 – Motore elettrico GIM4310 .....	97
D.2 – Motore elettrico GIM3505-8 .....	99

---

# Indice delle Figure

<b>Figura 1.1:</b> differenze tra pozzo freatico e pozzo artesiano [5] .....	2
<b>Figura 1.2:</b> flow chart operazione di salvataggio convenzionale .....	3
<b>Figura 1.3:</b> descrizione tecnica della procedura di salvataggio seguita a Vermicino .....	4
<b>Figura 1.4:</b> pozzo artesiano in cui è caduto Julien .....	5
<b>Figura 1.5:</b> confronto tra il caso di Tamrout e quello di Vermicino .....	5
<b>Figura 1.6:</b> schema a blocchi dei parametri vitali da monitorare [7].....	5
<b>Figura 1.7:</b> rappresentazione schematica di una classica operazione di salvataggio .....	7
<b>Figura 1.8:</b> procedura di salvataggio .....	9
<b>Figura 1.9:</b> applicazione del sistema.....	10
<b>Figura 1.10:</b> sistema di salvataggio .....	10
<b>Figura 1.11:</b> struttura principale.....	10
<b>Figura 1.12:</b> struttura di supporto.....	10
<b>Figura 1.13:</b> meccanismo di aggangio .....	11
<b>Figura 1.14:</b> Meccanismo di posizionamento rotazionale (in alto) e radiale (in basso).....	11
<b>Figura 1.15:</b> Meccanismo di sollevamento.....	11
<b>Figura 1.16:</b> struttura complessiva.....	12
<b>Figura 1.17:</b> pinze per la presa intercambiabili .....	12
<b>Figura 1.18:</b> RescueBot di Chennai .....	13
<b>Figura 1.19:</b> Robot Pangolin.....	13
<b>Figura 1.20:</b> Snake Robot.....	13
<b>Figura 1.21:</b> Smart Borewell Rescue Robot.....	13
<b>Figura 1.22:</b> Robot del National Institute of Technology di Tiruchirappalli .....	14
<b>Figura 1.23:</b> Robot delle università indiane e del Bahrein.....	14
<b>Figura 1.24:</b> Dispositivo a ventosa del VFSTR Institute.....	14
<b>Figura 1.25:</b> mano robotica.....	14
<b>Figura 1.26:</b> Guanto sensorizzato.....	14
<b>Figura 2.1:</b> modello CAD del prototipo di partenza .....	20
<b>Figura 2.2:</b> prototipo fisico di partenza .....	20

---

<b>Figura 2.3:</b> esploso carcassa esterna.....	21
<b>Figura 2.4:</b> parte superiore del prototipo con sistema anti-impuntamento (filo verde) .....	22
<b>Figura 2.5:</b> dettaglio sistema anti-impuntamento (linea rossa) .....	22
<b>Figura 2.6:</b> corpo centrale del robot .....	23
<b>Figura 2.7:</b> ralla accoppiata al piano base .....	23
<b>Figura 2.8:</b> modello CAD (sinistra) e fisico (destra) del sistema pattino.....	24
<b>Figura 2.9:</b> modello CAD parte inferiore con sede pattini e interfaccia con braccia tele-operate.....	24
<b>Figura 2.10:</b> dispositivo di sicurezza .....	25
<b>Figura 2.11:</b> modello CAD sede alloggiamento componenti elettroniche .....	26
<b>Figura 2.12:</b> circuito elettrico per il controllo del motore .....	26
<b>Figura 2.13:</b> logica di funzionamento del controllo motore principale .....	28
<b>Figura 3.1:</b> a sinistra CAD del sistema ruota, al centro CAD del cardine e a destra CAD della molla .....	33
<b>Figura 3.2:</b> CAD ambiente di test nella configurazione iniziale .....	35
<b>Figura 3.3:</b> CAD ambiente di test nella configurazione con robot calato .....	35
<b>Figura 3.4:</b> modello CAD paranco manuale.....	36
<b>Figura 3.5:</b> vista laterale del sistema tubo-manichino.....	37
<b>Figura 3.6:</b> vista semi-frontale del sistema tubo-manichino .....	37
<b>Figura 3.7:</b> vista dall'alto del sistema tubo-manichino .....	37
<b>Figura 3.8:</b> vista dal basso del sistema tubo-manichino .....	37
<b>Figura 4.1:</b> modello CAD della base più sistema pattino-guida.....	40
<b>Figura 4.2:</b> vista esplosa sistema motore-ruota .....	41
<b>Figura 4.3:</b> modello CAD elemento scorrevole e collegamenti.....	41
<b>Figura 4.4:</b> modello CAD sistema di scorrimento .....	42
<b>Figura 4.5:</b> Raspberry Pi Pico pin out.....	43
<b>Figura 4.6:</b> modulo trasmettitore IR (TX).....	44
<b>Figura 4.7:</b> schema circuitale lato trasmettitore .....	45
<b>Figura 4.8:</b> modulo ricevitore IR (RX) .....	45
<b>Figura 4.9:</b> schema circuitale lato ricevitore .....	47
<b>Figura 4.10:</b> vista esplosa montaggio sistema-motore-base .....	51

---

---

<b>Figura 4.11:</b> modello CAD accoppiamento piastra-ruota condotta .....	52
<b>Figura 4.12:</b> modello CAD accoppiamento piastra-supporto batteria.....	52
<b>Figura 4.13:</b> sistema di scorrimento implementato sulla ruota condotta mediante piastra di collegamento .....	52
<b>Figura 4.14:</b> modello CAD supporti circuito implementati .....	53
<b>Figura 4.15:</b> supporti circuito implementati su prototipo .....	53
<b>Figura 4.16:</b> modello CAD sistema di scorrimento implementato.....	54
<b>Figura 4.17:</b> sistema di scorrimento implementato sul prototipo .....	54
<b>Figura 4.18:</b> dettaglio della camicia in presa tra ruota motrice e rulli passivi.....	55
<b>Figura 5.1:</b> lista dei requisiti funzionali e progettuali delle braccia tele-operate .....	59
<b>Figura 5.2:</b> configurazione cinematica del sistema Slave/Master con convenzione di Denavit-Hartenberg .....	62
<b>Figura 5.3:</b> modello CAD sistema spalla dello Slave.....	63
<b>Figura 5.4:</b> modello CAD sistema gomito dello Slave .....	64
<b>Figura 5.5:</b> modello CAD sistema polso dello Slave .....	64
<b>Figura 5.6:</b> modello CAD dello Slave .....	65
<b>Figura 5.7:</b> modello CAD sistema spalla del Master .....	67
<b>Figura 5.8:</b> modello CAD sistema gomito del Master .....	68
<b>Figura 5.9:</b> modello CAD sistema polso del Master.....	68
<b>Figura 5.10:</b> modello CAD del Master.....	69
<b>Figura 5.11:</b> esempio di componente diviso per problemi dimensionali .....	70
<b>Figura 5.12:</b> esempio di componente diviso per problemi geometrici .....	70
<b>Figura 5.13:</b> sistema fisico polso dello Slave.....	71
<b>Figura 5.14:</b> sistema fisico gomito dello Slave.....	71
<b>Figura 5.15:</b> sistema fisico polso dello Slave.....	72
<b>Figura 5.16:</b> sistema fisico spalla del Master .....	72
<b>Figura 5.17:</b> sistema fisico gomito del Master .....	73
<b>Figura 5.18:</b> sistema fisico polso del Master .....	73
<b>Figura 5.19:</b> vista esplosa montaggio dell'encoder AMT102-V .....	75
<b>Figura 5.20:</b> sistema fisico Slave .....	75
<b>Figura 5.21:</b> sistema fisico Master .....	75

---

---

<b>Figura 5.22:</b> schema collegamenti del sistema di controllo .....	77
<b>Figura 5.23:</b> sistema fisico Master/Slave di un singolo braccio.....	79
<b>Figura 5.24:</b> modello CAD design definitivo del robot.....	82

---

## Indice delle Tabelle

<b>Tabella 1.1:</b> relazione tra profondità e tasso di sopravvivenza.....	6
<b>Tabella 1.2:</b> relazione tra tempo di estrazione e tasso di sopravvivenza.....	6
<b>Tabella 3.1:</b> valori di rigidezza e coppia al variare dei parametri della molla di torsione.	34
<b>Tabella 3.2:</b> valori delle dimensioni del manichino .....	36
<b>Tabella 3.3:</b> valori delle dimensioni degli spazi liberi.....	38
<b>Tabella 4.1:</b> sintesi moduli software.....	50

---

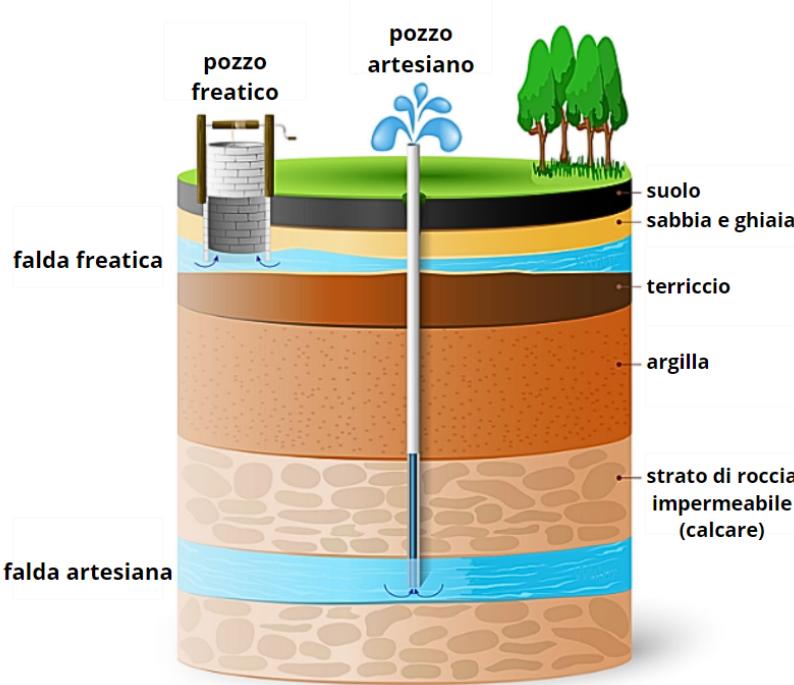
# CAPITOLO 1. Analisi del problema e stato dell'arte

## 1.1 Introduzione

L'acqua rappresenta una delle risorse più preziose e indispensabili per la vita sulla Terra, costituendo un elemento essenziale per la sopravvivenza dell'uomo e per lo sviluppo delle società moderne. Nonostante i progressi tecnologici e infrastrutturali, l'accesso a fonti di acqua potabile rimane ancora oggi una sfida complessa in molte regioni del mondo. In aree caratterizzate da condizioni climatiche estreme o da una limitata disponibilità idrica, come l'Africa subsahariana, l'India, il Medio Oriente o alcune zone montuose dell'Asia e dell'America Latina, ma anche in regioni italiane come la Sicilia, la scarsità d'acqua ha spinto le comunità locali a ricorrere a soluzioni sostenibili e durature come i pozzi artesiani [1].

Un pozzo artesiano è un'opera idraulica di captazione che permette di estrarre acqua sotterranea in modo naturale, senza l'ausilio di pompe meccaniche. A differenza dei pozzi freatici, che attingono a falde superficiali e necessitano di sistemi di sollevamento, i pozzi artesiani intercettano una falda confinata tra due strati impermeabili di terreno. La zona di alimentazione della falda si trova a una quota superiore rispetto al punto di perforazione, generando una differenza di carico piezometrico che consente all'acqua di risalire spontaneamente fino alla superficie, talvolta zampillando in modo naturale. Questo fenomeno può essere descritto attraverso la legge di Darcy, la quale stabilisce che il moto di filtrazione dell'acqua in un mezzo poroso dipende dalla permeabilità del terreno e dal gradiente di pressione idraulica [2].

Dal punto di vista costruttivo, un pozzo artesiano si presenta come una struttura cilindrica di diametro generalmente ridotto, compreso tra 15 e 33 centimetri, e di notevole profondità, che può raggiungere anche i 100 metri [3]. Durante la perforazione, le pareti del pozzo vengono rivestite con materiali impermeabili per prevenire infiltrazioni e dispersioni, mentre la sezione terminale viene forata per consentire l'afflusso dell'acqua proveniente dalla falda. L'assenza di pompe di sollevamento comporta vantaggi significativi in termini di efficienza energetica, riduzione dei costi di manutenzione e minore impatto ambientale [4].



*Figura 1.1: differenze tra pozzo freatico e pozzo artesiano [5]*

Dal punto di vista qualitativo, l'acqua proveniente da un pozzo artesiano è generalmente più pura rispetto a quella superficiale, grazie al naturale processo di filtrazione che avviene durante il suo passaggio attraverso gli strati di roccia e sedimenti. Questo processo, oltre a migliorarne la qualità organolettica, arricchisce l'acqua di minerali come calcio, fluoro ed elettroliti, rendendola adatta a molteplici utilizzi domestici e industriali. Tuttavia, la sua composizione dipende strettamente dalle caratteristiche geologiche del terreno: in alcune zone, ad esempio, la presenza di rocce contenenti arsenico o altre sostanze disciolte può comprometterne la potabilità e richiedere trattamenti di purificazione specifici [2][3].

I pozzi artesiani costituiscono dunque una risorsa idrica preziosa, economica e duratura. Se correttamente gestiti, possono garantire un approvvigionamento idrico costante per decenni o addirittura secoli, ma un loro utilizzo non regolamentato può alterare l'equilibrio idrogeologico locale, con ripercussioni sugli ecosistemi e sulla disponibilità d'acqua nelle aree circostanti [4]. Tali considerazioni rendono evidente la necessità di una gestione sostenibile delle falde e di un monitoraggio costante dell'impatto ambientale connesso alla loro captazione.

## 1.2 Incidenti in pozzi artesiani: criticità e limitazioni delle tecniche di soccorso tradizionali

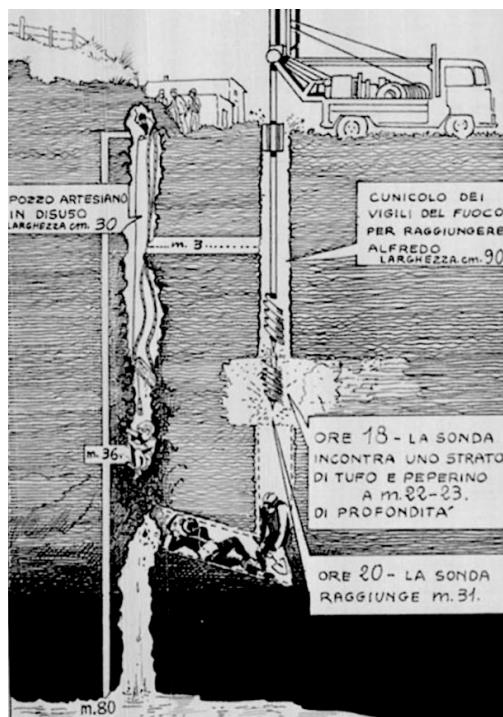
Nonostante la loro importanza come fonte di approvvigionamento idrico, i pozzi artesiani presentano anche criticità significative in termini di sicurezza, soprattutto nei contesti urbani o rurali dove le aperture non vengono adeguatamente protette o segnalate. La ridotta sezione del foro e le elevate profondità rendono queste strutture particolarmente pericolose in caso di caduta accidentale, soprattutto per i bambini, la cui corporatura minuta e la naturale curiosità li rendono più vulnerabili a incidenti di questo tipo. Le statistiche fornite dalla *National Disaster Response Force (NDRF)* in India riportano che, dal 2009, oltre 40 bambini sono caduti accidentalmente in pozzi artesiani, con un tasso di mortalità che supera il 70% nei casi in cui si siano adottate tecniche di recupero convenzionali [3].



*Figura 1.2: flow chart operazione di salvataggio convenzionale*

Tragedie di questo genere si sono verificate in diversi Paesi. In Italia, l'episodio più emblematico è quello di Vermicino, avvenuto nel giugno del 1981, in cui il piccolo Alfredo Rampi, di sei anni, cadde in un pozzo artesiano del diametro di appena 28 centimetri e profondo oltre 80 metri, rimanendo incastrato a circa 36 metri di profondità. Le dimensioni ridotte del condotto resero impossibile l'intervento diretto dei soccorritori. I primi tentativi di recupero, basati sull'impiego di corde e tavolette, si rivelarono inefficaci e contribuirono a ostruire parzialmente il pozzo. Successivamente, venne avviata la realizzazione di un tunnel

parallelo, una tecnica che sarebbe poi diventata la procedura standard nelle operazioni di soccorso in pozzi artesiani. Tuttavia, la durezza del terreno e la presenza di strati granitici rallentarono le perforazioni, mentre le vibrazioni prodotte dai macchinari causarono ulteriori cedimenti, facendo scivolare il bambino a una profondità maggiore. Dopo oltre sessanta ore di tentativi, il 13 giugno 1981, Alfredo Rampi perse la vita. L'enorme impatto mediatico del caso evidenziò la mancanza di un coordinamento efficiente tra le varie forze di soccorso e portò, l'anno successivo, all'istituzione della Protezione Civile italiana [6].

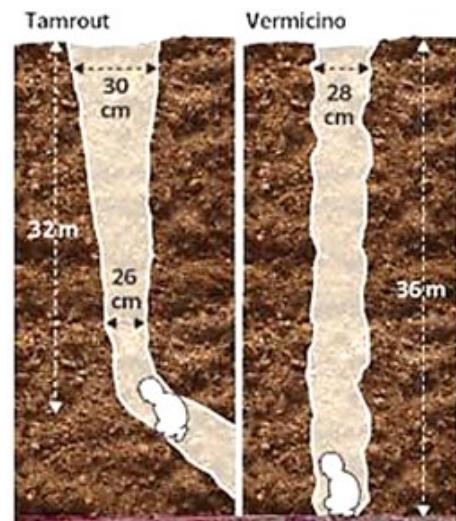


*Figura 1.3: descrizione tecnica della procedura di salvataggio seguita a Vermicino*

Vicende analoghe si sono verificate in tempi più recenti. Nel 2019, in Spagna, il piccolo Julen, di due anni, cadde in un pozzo profondo circa 100 metri e del diametro di soli 25 centimetri, situato nei pressi di Málaga. Anche in questo caso, si tentò di scavare un tunnel parallelo, ma le vibrazioni prodotte dalle macchine perforatrici e l'uso di micro cariche esplosive causarono ulteriori cedimenti del terreno, compromettendo definitivamente le operazioni di salvataggio. Un destino simile ebbe, nel febbraio 2022, il piccolo Rayan, di cinque anni, caduto in un pozzo nel nord del Marocco. Dopo cinque giorni di tentativi incessanti per scavare un tunnel alternativo, il bambino venne ritrovato privo di vita [7].

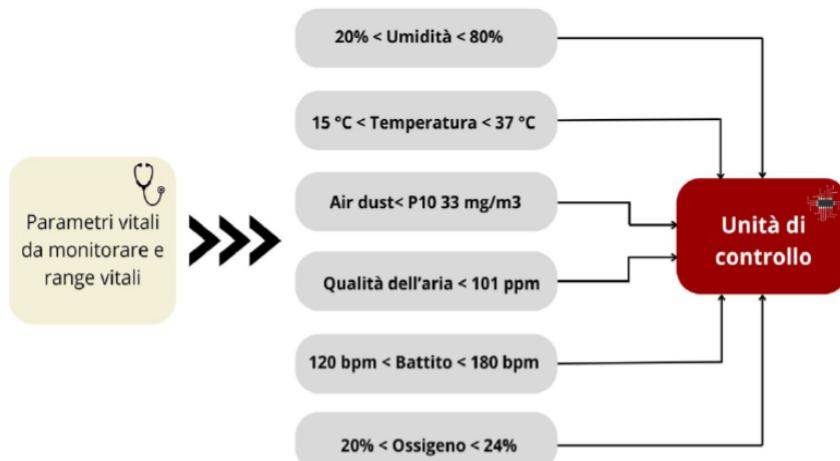


*Figura 1.4: pozzo artesiano in cui è caduto Julien*



*Figura 1.5: confronto tra il caso di Tamrout e quello di Vermicino*

Questi incidenti mettono in luce le enormi difficoltà operative legate al recupero di vittime intrappolate in pozzi così stretti e profondi. La principale criticità è di natura geometrica: un diametro di pochi centimetri rende impossibile la discesa di operatori umani e limita fortemente la possibilità di utilizzare strumenti meccanici di grandi dimensioni. Le condizioni ambientali interne aggravano ulteriormente la situazione: umidità elevata, temperature variabili e presenza di gas nocivi come monossido di carbonio, metano, butano o biossido di azoto possono provocare ipotermia, asfissia o intossicazioni, riducendo drammaticamente i tempi di sopravvivenza della vittima [8].



*Figura 1.6: schema a blocchi dei parametri vitali da monitorare [7]*

Le statistiche riportate in studi condotti dall'*Arab Journal of Forensic Sciences & Forensic Medicine* confermano l'estrema pericolosità di tali situazioni. Su 43 incidenti analizzati tra il 2006 e il 2016, solo il 14% si è concluso con esito positivo. In particolare, oltre i 15 metri di profondità, le probabilità di sopravvivenza risultano pressoché nulle [9].

*Tabella 1.1: relazione tra profondità e tasso di sopravvivenza*

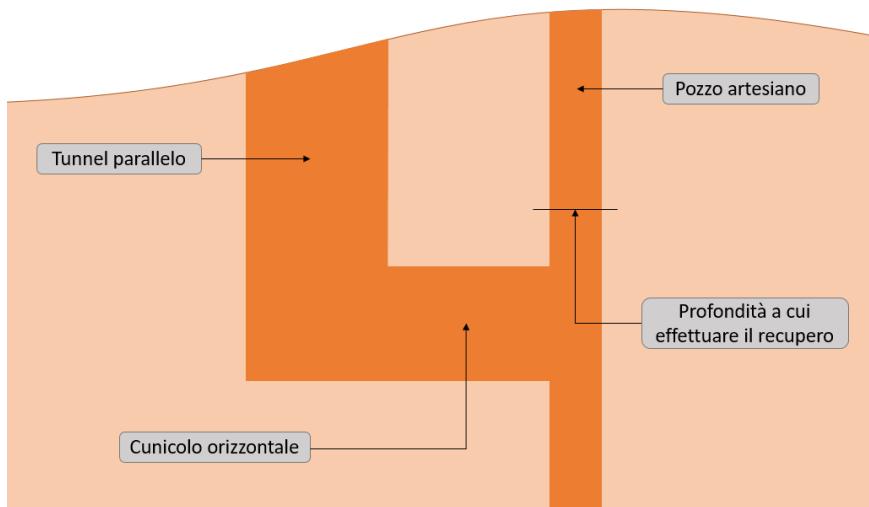
Profondità del pozzo	Sopravvissuti	Deceduti	Totale
0-15 metri	5 (29,4%)	12 (70,6%)	17
15-30 metri	0 (0%)	9 (100%)	9
30-45 metri	0 (0%)	2 (100%)	2
45-60 metri	0 (0%)	7 (100%)	7
60-75 metri	0 (0%)	2 (100%)	2
oltre 75 metri	1 (16,7%)	5 (83,3%)	6
<b>Totale</b>	<b>6 (14%)</b>	<b>37 (86%)</b>	<b>43</b>

Un ulteriore fattore determinante è il tempo di intervento: le possibilità di salvezza diminuiscono drasticamente con il trascorrere delle ore. Secondo gli stessi studi, nessuna vittima è sopravvissuta oltre le 24 ore dalla caduta [9].

*Tabella 1.2: relazione tra tempo di estrazione e tasso di sopravvivenza*

Periodo di estrazione	Sopravvissuti	Deceduti	Totale
0-6 ore	5 (29,4%)	12 (70,6%)	17
6-12 ore	0 (0%)	5 (100%)	5
12-18 ore	0 (0%)	1 (100%)	1
18-24 ore	0 (0%)	3 (100%)	3
24-48 ore	1 (33,3%)	2 (66,7%)	3
48-72 ore	0 (0%)	10 (100%)	10
oltre 72 ore	0 (0%)	4 (100%)	4
<b>Totale</b>	<b>6 (14%)</b>	<b>37 (86%)</b>	<b>43</b>

La procedura di salvataggio comunemente adottata, quella dello scavo di un tunnel parallelo, presenta due limitazioni principali: da un lato, i tempi di esecuzione estremamente lunghi, che possono variare dalle 24 alle 72 ore a seconda della profondità e della natura del terreno; dall'altro, le vibrazioni prodotte dalle macchine perforatrici, che spesso causano ulteriori sprofondamenti o il collasso delle pareti del pozzo [10].



*Figura 1.7: rappresentazione schematica di una classica operazione di salvataggio*

Nel caso di Vermicino, ad esempio, la perforazione di un pozzo di soli 34 metri richiese più di 30 ore, dimostrando l'inadeguatezza dei metodi tradizionali in situazioni di emergenza [6].

La combinazione di questi fattori, vincoli geometrici, instabilità del terreno, condizioni ambientali ostili e limiti tecnologici, evidenzia l'urgenza di sviluppare soluzioni alternative e innovative. Tra queste, i sistemi robotici tele-operati rappresentano oggi una delle prospettive più promettenti: dispositivi in grado di muoversi in spazi angusti, garantendo la sicurezza dei soccorritori e intervenendo direttamente sulla vittima per stabilizzarla e riportarla in superficie nel minor tempo possibile.

### 1.3 Requisiti operativi per un sistema di salvataggio robotico

Le criticità emerse dall'analisi degli incidenti in pozzi artesiani evidenziano la necessità di sviluppare un sistema di salvataggio capace di operare in condizioni estreme, dove l'intervento umano diretto risulta impossibile. Un robot destinato a tali operazioni deve rispondere a requisiti di natura meccanica, elettronica, sensoriale e operativa, garantendo al contempo affidabilità, sicurezza e precisione nei movimenti. L'obiettivo principale è consentire il raggiungimento, la stabilizzazione e l'estrazione della vittima nel minor tempo possibile, minimizzando il rischio di aggravare la situazione o di provocare ulteriori cedimenti strutturali del terreno.

Dal punto di vista meccanico e funzionale, il robot deve garantire stabilità e precisione nei movimenti. È quindi opportuno prevedere sistemi di ancoraggio o scorrimento controllato lungo le pareti del pozzo, che permettano di regolare la velocità di discesa e di mantenere la

centratura rispetto all'asse verticale. Inoltre, la presenza di bracci robotici o meccanismi di presa risulta indispensabile per interagire con la vittima, consentendo di agganciarla, sostenerla o imbracarla in modo sicuro senza generare pressioni eccessive.

Un ulteriore requisito riguarda la tele-operazione, ossia la possibilità di controllare il robot a distanza da parte di un operatore umano. Il sistema di controllo deve quindi essere intuitivo, reattivo e basato su un collegamento affidabile, preferibilmente via cavo o mediante moduli di comunicazione a infrarossi o radiofrequenza, a seconda delle condizioni del terreno.

Per quanto riguarda la percezione e il monitoraggio dell'ambiente, il robot deve essere dotato di un sistema di sensori integrato, comprendente telecamere ad alta risoluzione, sensori di distanza e sensori di qualità dell'aria (come rilevatori di gas tossici o di ossigeno) [7]. Questi strumenti permettono non solo di orientare il robot e garantire la sicurezza della vittima, ma anche di fornire un flusso informativo costante agli operatori in superficie, utile per prendere decisioni rapide e mirate durante le operazioni di soccorso.

Dal punto di vista energetico, il sistema deve poter operare in modo autonomo per un tempo sufficiente a completare la missione di salvataggio. È quindi opportuno prevedere l'alimentazione mediante batteria integrata ad alta densità energetica, eventualmente supportata da un cavo di alimentazione esterno che garantisca continuità operativa e trasmissione dati simultanea.

La sicurezza operativa rappresenta infine un requisito imprescindibile. Il robot deve essere progettato in modo da evitare qualsiasi rischio di urto o di compressione accidentale della vittima e, inoltre, deve prevedere un sistema che impedisca al bambino di scivolare ancora più in basso durante la procedura di salvataggio. Tutte le parti mobili devono muoversi con velocità e forza controllate, e i materiali impiegati devono essere leggeri, resistenti e privi di spigoli o elementi taglienti.

In sintesi, un sistema robotico destinato al salvataggio in pozzi artesiani deve integrare miniaturizzazione meccanica, precisione di movimento, capacità sensoriali avanzate, sicurezza operativa e teleoperazione affidabile. Solo la combinazione di questi elementi può consentire un'azione di recupero tempestiva e sicura, colmando le lacune che rendono oggi inefficaci le tecniche di soccorso tradizionali. Il robot deve quindi configurarsi come un dispositivo altamente specializzato, concepito per operare in un contesto estremo in cui ogni secondo risulta determinante per la sopravvivenza della vittima.

## 1.4 Soluzioni robotiche esistenti per ambienti confinati e soccorsi verticali

Negli ultimi anni la ricerca nell'ambito della robotica applicata alle operazioni di salvataggio in pozzi artesiani ha registrato un notevole sviluppo, grazie al contributo di università, istituti di ricerca e gruppi di ingegneri indipendenti. Queste soluzioni, pur differendo per struttura, approccio e grado di automazione, condividono un obiettivo comune: fornire un intervento rapido, sicuro e preciso in scenari estremamente complessi, dove la presenza umana risulta impossibile.

L'analisi delle principali soluzioni robotiche consente di evidenziare l'evoluzione tecnologica avvenuta nel tempo, dai primi sistemi meccanici di supporto e presa, fino ai moderni robot tele-operati e dotati di sensori avanzati e intelligenza artificiale per l'analisi ambientale.

Di seguito vengono descritte le principali realizzazioni sperimentali sviluppate tra il 2011 e il 2022, che rappresentano un panorama completo delle strategie ingegneristiche adottate per affrontare il problema del salvataggio in pozzi profondi e di diametro ridotto.

Nel 2011, l'Università di Scienza e Tecnologia di *Shandong* ha presentato un robot di soccorso per pozzi profondi, dotato di due bracci principali: uno estendibile e uno di presa, capaci di sostenere fino a 100 kg e di adattarsi alla postura della vittima. Il sistema veniva calato tramite un meccanismo di sollevamento e stabilizzato contro le pareti del pozzo per effettuare l'estrazione in sicurezza [11].

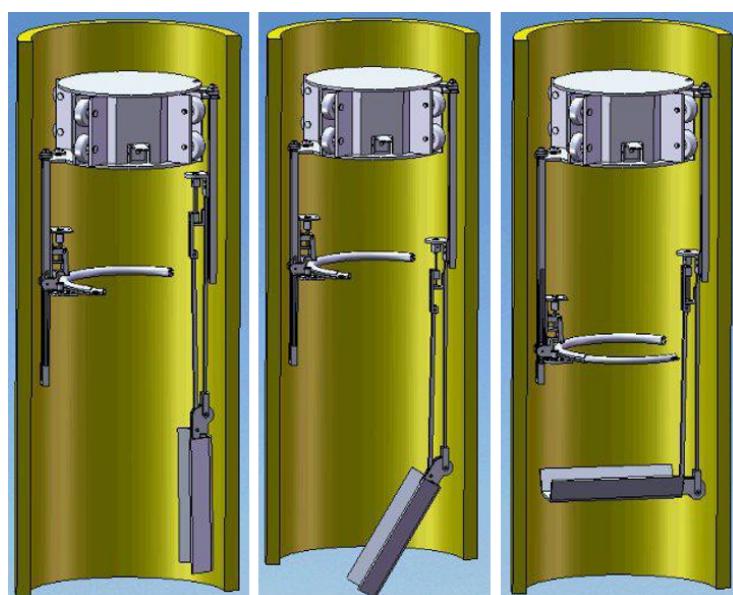
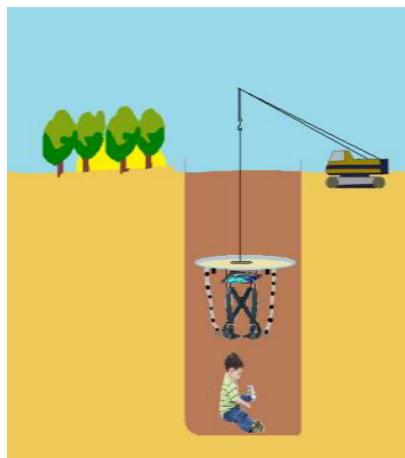


Figura 1.8: procedura di salvataggio

Nel **2013**, il *Priyadarshini College of Engineering* ha sviluppato un robot modulare composto da un veicolo portante e un braccio robotico a sei gradi di libertà, controllato via wireless. Dotato di telecamera, gripper, ventosa, luci LED e sistema di erogazione dell'ossigeno, questo modello integrava per la prima volta una comunicazione diretta con la vittima [12]. Nello stesso anno, l'*Indian Institute of Information Technology* ha proposto lo *Smart Safe Robot Rescue*, una soluzione concettuale basata su due piastre rotanti e bracci robotici equipaggiati con telecamere e imbracatura per il recupero [13].

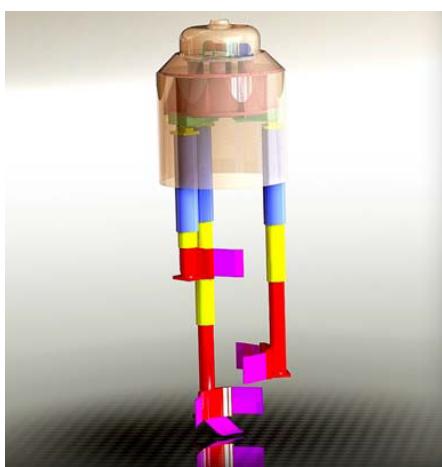


*Figura 1.9: applicazione del sistema*



*Figura 1.10: sistema di salvataggio*

Nel **2014**, la *VIT University* ha introdotto un robot suddiviso in tre sezioni (supporto, corpo principale e modulo operativo), capace di muoversi autonomamente grazie a sensori IR e telecamere. L'innovazione principale consisteva nel sistema di supporto vitale integrato, in grado di fornire ossigeno alla vittima [14].



*Figura 1.11: struttura principale*



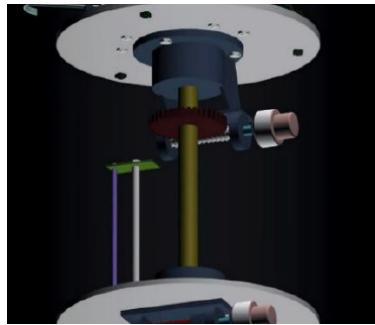
*Figura 1.12: struttura di supporto*

Nel **2015**, l'*IIT Madras* ha realizzato un robot basato su tre meccanismi coordinati: aggancio, posizionamento e sollevamento. Il sistema impiegava un tubo con sacca gonfiabile per

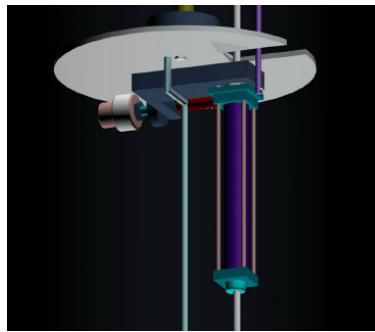
sostenere la vittima e, nella versione successiva, una gabbia di sicurezza per aumentarne la protezione [15].



*Figura 1.13: meccanismo di aggancio*



*Figura 1.14: Meccanismo di posizionamento rotazionale (in alto) e radiale (in basso)*



*Figura 1.15: Meccanismo di sollevamento*

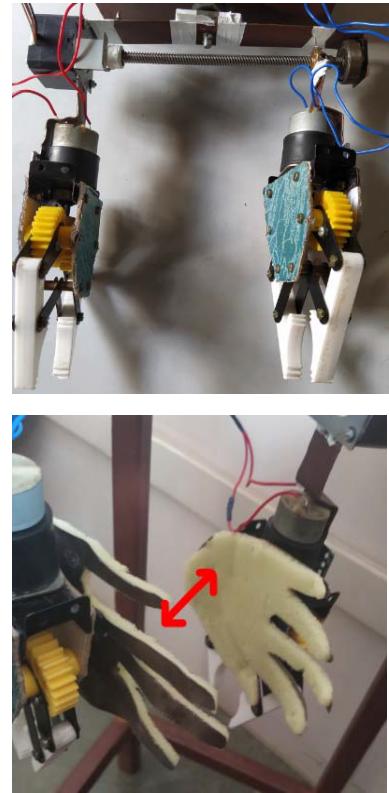
Nel **2016**, studenti della *METS School of Engineering* hanno progettato un robot economico e rapido, dotato di braccio robotico, sensori di distanza e temperatura, videocamera e comunicazione audiovisiva con la vittima [16].

Nel **2018**, presso la *SRM Institution of Science and Technology*, è stato sviluppato un robot con doppia struttura e un sistema pneumatico di sollevamento tramite airbag [17]. Sempre nello stesso anno, il *Ramaiah Institute of Technology* ha ideato un robot esploratore di pozzi, dedicato alla sola ispezione e analisi ambientale tramite sensori di gas, temperatura e umidità, segnando un passo importante verso la diagnostica preventiva nei soccorsi [18].

Nel **2019**, l'*Amrita School of Engineering* ha proposto un robot con due bracci dotati di pinze morbide e una struttura modulare in grado di gestire diversi scenari di salvataggio, garantendo una presa sicura e controllata [19].



*Figura 1.16: struttura complessiva*



*Figura 1.17: pinze per la presa intercambiabili*

Nel **2020**, si registra un'intensa attività di ricerca con numerosi prototipi:

- Il *RescueBot* di Chennai integrava sensori ambientali, bracci regolabili e un airbag pneumatico per creare una piattaforma di supporto alla vittima [20].
- Il robot *Pangolin* del *Mangalam College of Engineering* adottava mani robotiche telesoperate tramite guanti sensorizzati e un sistema di monitoraggio dei parametri vitali [21].
- Lo *Snake Robot* dell'*Easwari Engineering College* introduceva un corpo segmentato con servomotori e sensori, capace di muoversi come un serpente per raggiungere aree difficilmente accessibili [22].
- L'*IFET College of Engineering* di *Villupuram* ha sviluppato un sistema controllato da gesti manuali rilevati tramite accelerometri, con un braccio robotico e cinghia di sicurezza per la presa [23].
- Il *Borewell Child Rescue System* del *Gurudeva Institute of Science and Technology* utilizzava un manipolatore con rivestimento protettivo e cuscino gonfiabile per sollevare delicatamente la vittima [24].

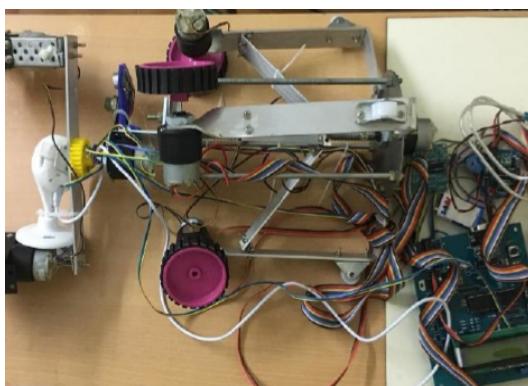
- Lo *Smart Borewell Rescue Robot* dell'Università di Pune impiegava gripper, ruote adattive e sensori a ultrasuoni, consentendo una gestione sicura e interattiva dell'operazione [25].



*Figura 1.18: RescueBot di Chennai*



*Figura 1.19: Robot Pangolin*



*Figura 1.20: Snake Robot*



*Figura 1.21: Smart Borewell Rescue Robot*

Nel **2021**, il *National Institute of Technology di Tiruchirappalli* ha realizzato un robot modulare con sistemi di ancoraggio, traslazione e presa, ottimizzato per un controllo preciso in spazi ristretti [26]. Nello stesso anno, una collaborazione tra università indiane e del Bahrein ha portato alla progettazione di un robot con braccio pneumatico e palloncini di sostegno sotto la vittima, migliorando la stabilità del recupero [27]. Sempre nel 2021, il *VFSTR Institute* ha presentato un dispositivo con tre moduli dedicati a ispezione, sostegno ed estrazione, dotato di ventosa per il riposizionamento della vittima e telecamera a visione notturna [28].



*Figura 1.22: Robot del National Institute of Technology di Tiruchirappalli*

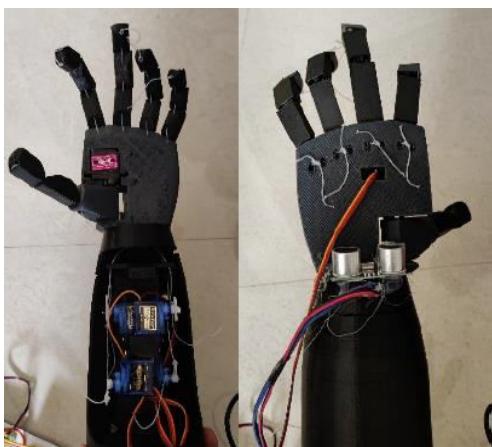


*Figura 1.23: Robot delle università indiane e del Bahrein*



*Figura 1.24: Dispositivo a ventosa del VFSTR Institute*

Infine, nel **2022**, il *Sri Krishna College of Technology* ha introdotto lo *Smart and Safe Robot (SSR)*, una delle soluzioni più evolute dal punto di vista dell'interazione uomo-macchina. Il sistema, controllato tramite guanto sensorizzato, replica in tempo reale i movimenti della mano dell'operatore, integrando visione artificiale, sensori a ultrasuoni e canale audio bidirezionale [29].



*Figura 1.25: mano robotica*



*Figura 1.26: Guanto sensorizzato*

L'analisi comparativa di queste soluzioni mostra un'evoluzione progressiva verso sistemi più compatti, sensorizzati e intuitivi da controllare. L'integrazione di componenti

meccatronici, sensori ambientali e interfacce uomo-macchina ha portato i robot di salvataggio da semplici prototipi accademici a sistemi sofisticati in grado di operare con elevata precisione, rappresentando una base solida per lo sviluppo di progetti futuri orientati alla piena automazione delle operazioni di soccorso.

## 1.5 Specifiche funzionali del progetto

Il progetto del robot di soccorso per interventi in pozzi artesiani nasce con l'obiettivo di realizzare un sistema meccatronico in grado di operare in ambienti fortemente confinati e di eseguire, in modo controllato e sicuro, le principali fasi di un'operazione di salvataggio. Le specifiche funzionali definite in fase di progettazione mirano a garantire un equilibrio tra compattezza strutturale, affidabilità dei sistemi di movimento e precisione operativa durante la fase critica di recupero della vittima.

Il robot deve poter essere calato all'interno di pozzi caratterizzati da diametri di circa 30 cm e profondità fino a 100 m, mantenendo una struttura leggera per permettere la movimentazione tramite un sistema di sollevamento manuale o motorizzato. La struttura modulare del robot consente di alloggiare i principali sottosistemi, meccanico, elettronico e di controllo, ottimizzando lo spazio interno e facilitando la manutenzione e la sostituzione dei componenti.

Nel nostro caso specifico, dal punto di vista meccanico, il robot è costituito da una carcassa cilindrica suddivisa su più livelli funzionali: nella parte centrale trovano posto la batteria di alimentazione, l'elettronica di controllo e il motore BLDC, il cui compito è quello di ruotare la parte centrale del corpo principale. Questo movimento rotatorio consente di orientare con precisione la ruota condotta attraverso la quale scorre il dispositivo di sicurezza, permettendone la rotazione a 360° per individuare il punto ottimale in cui farlo scendere e posizionarlo al di sotto della vittima. Tale configurazione assicura una corretta centratura del sistema e una maggiore efficacia nelle fasi di intervento.

Il dispositivo di sicurezza rappresenta uno dei componenti chiave del robot. Una volta raggiunta la posizione opportuna, esso viene fatto scendere al di sotto del bambino e, grazie a una combinazione di gravità e forza elastica, si apre in modo controllato formando una sorta di piattaforma di sostegno. In caso di pozzi di diametro ridotto, l'apertura si arresta a contatto con le pareti interne, adattandosi così automaticamente alla geometria dell'ambiente. La sua

funzione primaria è quella di impedire l'ulteriore caduta della vittima, stabilizzandola in una posizione di sicurezza durante le successive operazioni di recupero.

Per garantire un'adeguata capacità di intervento, il robot è inoltre equipaggiato con due braccia robotiche tele-operate, controllate da remoto tramite un sistema master/slave basato su Arduino. Le braccia, dotate di pinze terminali, hanno il compito di manovrare e posizionare con precisione il dispositivo di sicurezza, e magari, come prospettiva futura, anche il compito di fissare un'imbracatura attorno al corpo della vittima per consentirne il recupero in superficie. Il sistema di tele-manipolazione, assistito da una stereo-camera e da sensori di prossimità, consente un controllo fine dei movimenti anche in spazi estremamente ristretti.

Sul piano elettronico e di controllo, il robot utilizza una doppia architettura di gestione: il motore BLDC e il sistema di scorrimento sono governati da una scheda Raspberry Pi Pico programmata in MicroPython, mentre le braccia tele-operate sono gestite da un sistema Arduino indipendente.

Le specifiche funzionali del progetto possono dunque essere sintetizzate come segue:

1. Operatività in pozzi con diametri di circa 30 cm.
2. Struttura modulare, leggera e facilmente manutenibile.
3. Rotazione controllata della sezione centrale per la ricerca del punto ottimale di intervento.
4. Movimentazione precisa del dispositivo di sicurezza mediante sistema di scorrimento dedicato.
5. Tele-manipolazione tramite braccia robotiche per il posizionamento dell'imbracatura.
6. Controllo remoto integrato tra Raspberry Pi Pico e Arduino.
7. Possibilità di futura integrazione di un piatto sensori per il monitoraggio ambientale (temperatura, gas nocivi, ossigeno), attualmente solo progettato.

Tali specifiche definiscono le linee guida per l'intero sviluppo del robot, garantendo la compatibilità tra i vari sottosistemi e ponendo le basi per l'ulteriore ottimizzazione delle prestazioni in vista delle prove sperimentali e delle future implementazioni.

---

## CAPITOLO 2. Architettura generale del sistema di soccorso

La progettazione di un sistema robotico per il soccorso in pozzi artesiani richiede una profonda analisi delle condizioni operative e dei vincoli fisici e ambientali che caratterizzano tali contesti. L'obiettivo principale è quello di sviluppare una piattaforma tele-operata capace di operare in spazi ristretti, con geometrie verticali e profondità elevate, garantendo al contempo sicurezza, affidabilità e precisione nelle operazioni di recupero [7].

Il sistema deve essere concepito per muoversi autonomamente all'interno del pozzo, stabilizzarsi durante la discesa e l'intervento, e consentire all'operatore di manipolare con accuratezza gli oggetti o il corpo da soccorrere. Questi requisiti hanno guidato la definizione dell'architettura complessiva del robot, composta da sottosistemi meccanici, elettronici e di controllo strettamente integrati tra loro.

Nel presente capitolo vengono illustrate le principali scelte progettuali che hanno portato allo sviluppo del robot di soccorso, a partire dall'idea iniziale maturata in collaborazione con il DIMEAS del Politecnico di Torino e nata dall'esigenza, evidenziata dallo speleologo Tullio Bernabei, di migliorare le tecniche di intervento nei pozzi artesiani. Vengono descritte la struttura generale del robot, le sue componenti principali e la logica di funzionamento complessiva, evidenziando come ogni elemento sia stato pensato per rispondere a specifiche esigenze operative.

Infine, viene delineato il ruolo di questa tesi all'interno del progetto generale, con particolare attenzione agli obiettivi di miglioramento e innovazione dei sistemi di scorrimento e di manipolazione, che rappresentano le principali aree di sviluppo affrontate nel lavoro sperimentale.

### 2.1 Idea di partenza

L'idea alla base dello sviluppo di un robot mobile per operazioni di soccorso in pozzi artesiani nasce dalla necessità di affrontare un problema che, ancora oggi, non dispone di una soluzione tecnologicamente efficace e sicura. Gli incidenti che coinvolgono bambini caduti all'interno di pozzi stretti e profondi rappresentano una sfida complessa dal punto di vista tecnico e umano: la ridotta sezione del foro, la profondità elevata, la fragilità delle pareti e la

difficoltà di accesso rendono impossibile un intervento diretto da parte di operatori umani e spesso inefficaci le tecniche di recupero tradizionali.

L'episodio emblematico di Vermicino (1981), in cui il piccolo Alfredo Rampi perse la vita dopo tre giorni di tentativi di salvataggio infruttuosi, ha segnato profondamente l'opinione pubblica italiana e ha posto le basi per la riflessione su un approccio tecnologico alternativo al soccorso in ambienti confinati di questo tipo. A seguito di quell'evento, lo speleologo Tullio Bernabei, che partecipò in prima persona alle operazioni di soccorso, propose l'idea di un sistema robotico in grado di intervenire direttamente nel pozzo per mettere in sicurezza la vittima e consentirne il recupero in tempi rapidi e in condizioni di sicurezza.

Sulla base di questa visione, presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale (DIMEAS) del Politecnico di Torino e in collaborazione con l'Università dell'Aquila, è stato avviato un progetto di ricerca e sviluppo volto alla realizzazione di un rescue robot teleoperato capace di:

- calarsi autonomamente all'interno del pozzo, adattandosi a diametri ridotti e pareti irregolari;
- garantire la stabilità del sistema durante le operazioni;
- interagire con la vittima attraverso bracci robotici controllati a distanza;
- fornire un canale visivo e sensoriale all'operatore per monitorare in tempo reale l'ambiente di intervento.

## 2.2 Struttura e componenti principali del robot

Il lavoro di tesi ha preso avvio a partire da un prototipo già realizzato dall'Ing. Simone Astuti [7], il quale rappresentava l'evoluzione più avanzata e completa tra i vari studi precedenti. Tale prototipo ha costituito la base operativa da cui sono state poi sviluppate le modifiche, le ottimizzazioni e le integrazioni descritte nei capitoli successivi.

Il robot si presenta come un dispositivo cilindrico multi-livello progettato per operare all'interno di pozzi artesiani di diametro di circa 30 cm. La sua architettura ruota attorno a una colonna centrale in materiale metallico, elemento strutturale e cinematico fondamentale. La rotazione della colonna, necessaria per orientare il robot e gli strumenti collegati, avviene tramite un motore brushless (BLDC) accoppiato a un pignone che ingrana con la ruota

condotta solidale alla colonna. L'azione del pignone genera la rotazione dell'intero corpo centrale.

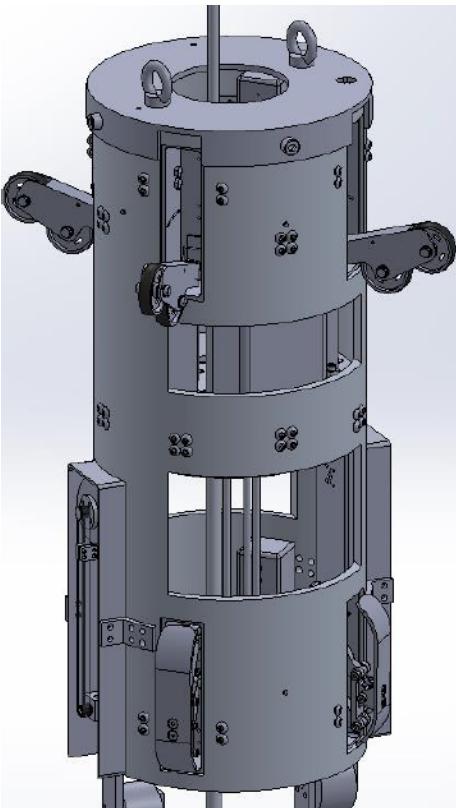
Il robot è dotato di un sistema di ruote folli e pattini elastici, distribuiti lungo la circonferenza esterna, con funzione di centraggio e stabilizzazione durante la discesa lungo il pozzo. Questi elementi sono montati su supporti a molla per compensare le irregolarità delle pareti; tuttavia, già nella configurazione iniziale era evidente come la rigidità delle molle fosse insufficiente, determinando instabilità e possibili impuntamenti del robot nelle fasi di discesa.

Sul piano elettronico e di controllo, il prototipo integra una Raspberry Pi Pico dedicata alla gestione del motore brushless principale tramite un driver apposito. Il software installato sulla Pico consente un controllo elementare del motore tramite input da tastiera (avanti, indietro e stop), senza possibilità di controllo angolare, senza feedback sensoriali e senza forme avanzate di regolazione. Tale software, benché semplice, risulta pienamente funzionante e non è stato modificato nel corso del presente lavoro.

Dal punto di vista meccanico, il prototipo mostra una chiara predisposizione all'integrazione di ulteriori sottosistemi. In particolare, sono presenti due sedi strutturali progettate come interfaccia meccanica per l'installazione futura delle braccia robotiche tele-operate, pur non essendo ancora presenti le braccia stesse. Allo stesso modo, alcune porzioni della struttura e degli spazi interni lasciano intuire la futura installazione di un piatto sensori, che è stato progettato e fisicamente assemblato ma non ancora integrato nel robot.

Non è invece presente un sistema di scorrimento dedicato alla gestione della camicia del dispositivo di sicurezza: manca infatti un meccanismo capace di guidare e controllare la discesa del dispositivo all'interno del pozzo. Questa assenza rappresenta una delle principali limitazioni operative del prototipo consegnato.

Complessivamente, il robot realizzato dall'Ing. Astuti (Figura 2.1 e Figura 2.2) rappresenta una piattaforma funzionale e coerente nelle sue basi meccaniche ed elettroniche, dotata di sistemi di stabilizzazione, di rotazione e di predisposizioni per l'integrazione di nuove funzionalità, ma ancora priva degli elementi essenziali per un sistema di soccorso completo: braccia tele-operate, sistema di scorrimento, piatto sensori integrato e funzionalità avanzate di controllo. Tale configurazione costituisce il punto di partenza del percorso di miglioramento descritto nei capitoli successivi.



*Figura 2.1: modello CAD del prototipo di partenza*



*Figura 2.2: prototipo fisico di partenza*

### 2.3 Sottosistemi meccanici, elettronici e di controllo

Il sistema robotico sviluppato per le operazioni di soccorso in pozzi artesiani è il risultato di una progettazione interdisciplinare che integra componenti meccaniche, elettroniche e di controllo in un'unica architettura coerente.

Ogni sottosistema è stato pensato per garantire affidabilità, compattezza e modularità, nel rispetto dei vincoli imposti dalle dimensioni ridotte dei pozzi e dalla necessità di assicurare una movimentazione fluida e precisa in ambienti confinati e verticali.

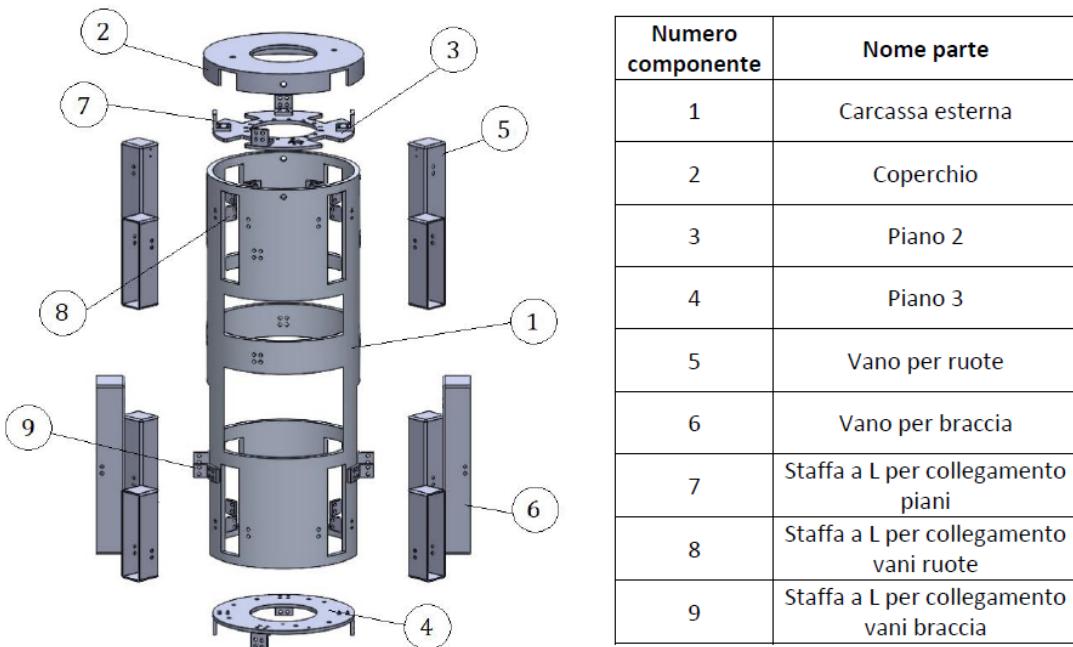
L'intero robot è concepito come un sistema modulare multilivello, nel quale ciascun modulo svolge funzioni specifiche: la struttura meccanica fornisce stabilità e resistenza; il sistema elettronico gestisce l'alimentazione e la comunicazione; mentre il sistema di controllo coordina i movimenti, la tele-manipolazione e la sicurezza operativa.

L'integrazione di questi tre domini ha richiesto un'attenta analisi di compatibilità tra le diverse interfacce, meccaniche, elettriche e informatiche, affinché il robot potesse operare in modo coordinato e tempestivo anche in situazioni di emergenza.

### 2.3.1 Sottosistema meccanico

Il sottosistema meccanico del prototipo finale rappresenta il cuore strutturale e funzionale del robot di salvataggio, assicurandone la stabilità, la resistenza e la precisione nelle fasi operative all'interno del pozzo artesiano. La progettazione, sviluppata nella tesi dell'Ing. Astuti [7], ha avuto come obiettivo principale la realizzazione di una struttura compatta, modulare e pienamente integrata con i sottosistemi di sicurezza e manipolazione, garantendo allo stesso tempo facilità di assemblaggio, riduzione del peso e affidabilità meccanica in condizioni operative critiche.

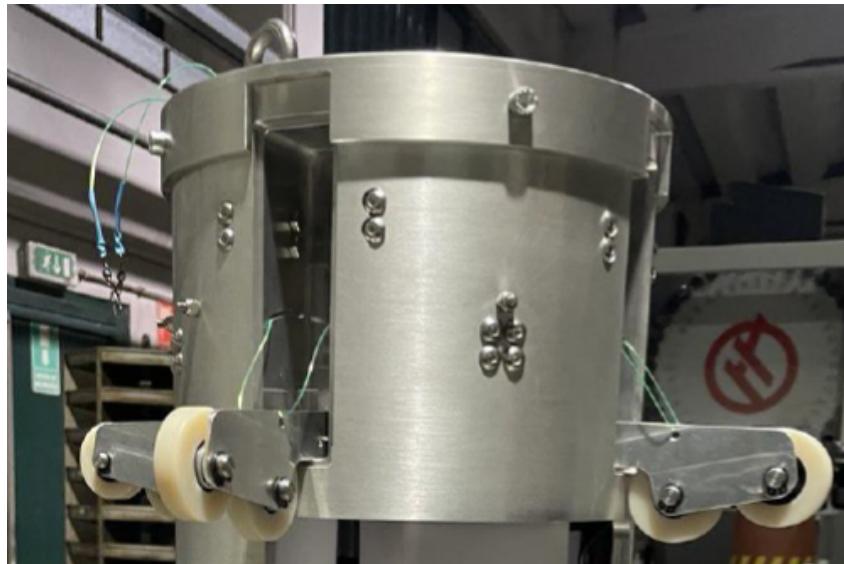
Il robot presenta una configurazione cilindrica con un diametro esterno di circa 200 mm e un'altezza complessiva di circa 600 mm, dimensioni compatibili con i pozzi artesiani di piccolo diametro in cui deve operare. La struttura è costituita da più moduli sovrapposti collegati tramite distanziali e viti in acciaio, soluzione che consente un agevole accesso ai singoli componenti e una distribuzione equilibrata dei pesi. Il materiale impiegato per la realizzazione della carcassa esterna è una lega di alluminio 6061-T6, ottima per i componenti strutturali principali, grazie all'elevato rapporto rigidezza/peso.



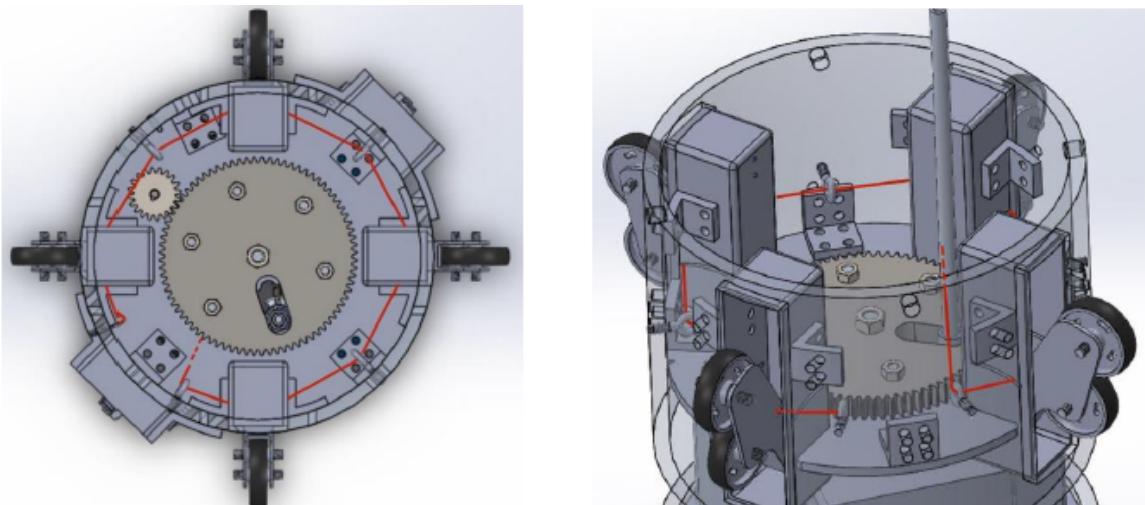
*Figura 2.3: esploso carcassa esterna*

La parte superiore del robot integra il sistema di collegamento con la fune di calata e un set di ruote folli disposte a 90°, che assicurano la centratura del dispositivo e riducono l'attrito durante la discesa lungo le pareti del pozzo. Inoltre è stato previsto anche un sistema anti-

impuntamento, progettato per ridurre il rischio di blocco delle ruote e garantire una migliore mobilità anche su terreni molto sconnessi, il cui principio di funzionamento si basa su un cavo che attraversa le staffe delle ruote, creando un “anello” mobile. Questo cavo è fissato a un'estremità ed è libero di essere tirato dall'altra. Così, quando le ruote si impuntano, tirando l'estremità libera si provoca un restringimento dell'anello, tirando le ruote verso la loro sede.



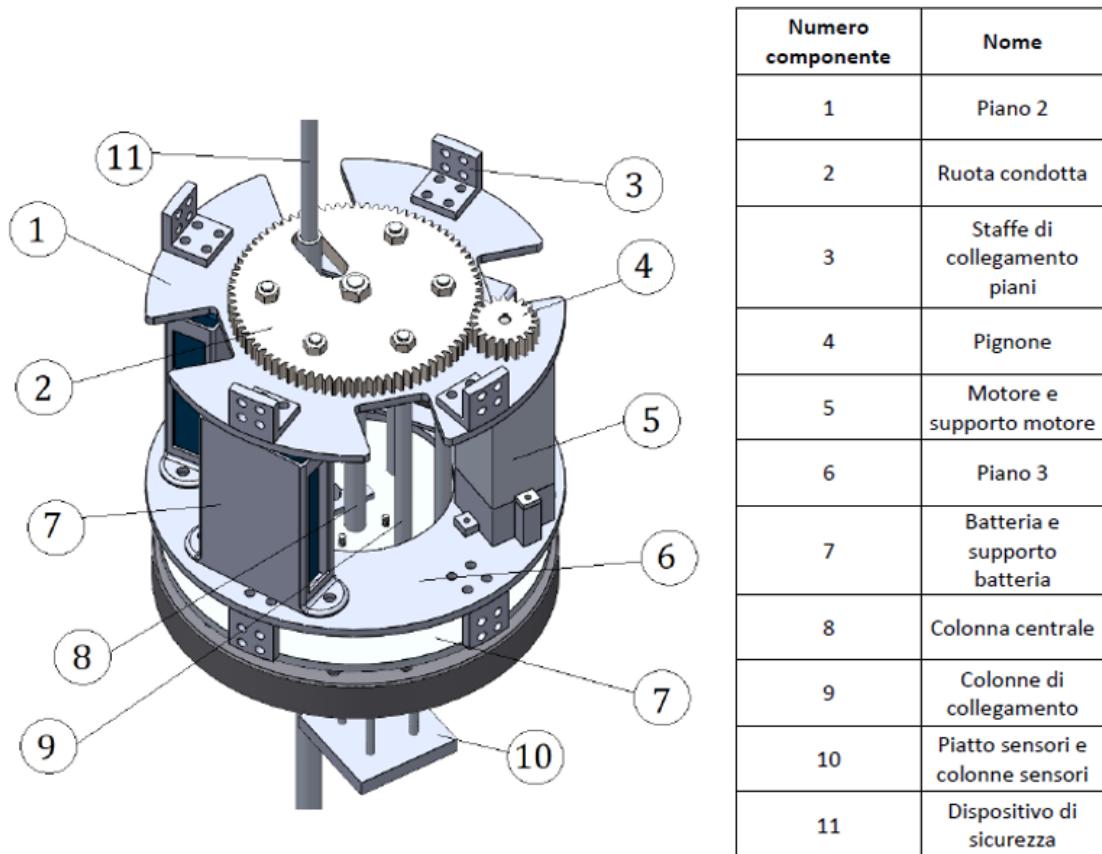
*Figura 2.4: parte superiore del prototipo con sistema anti-impuntamento (filo verde)*



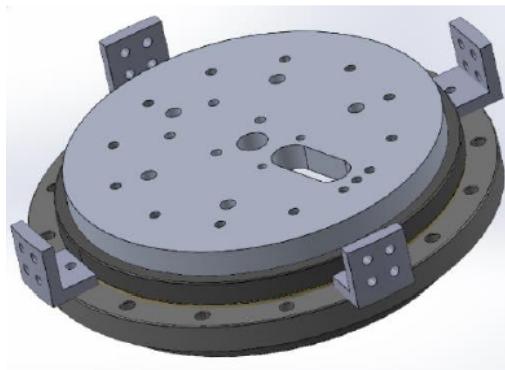
*Figura 2.5: dettaglio sistema anti-impuntamento (linea rossa)*

Il corpo centrale è dedicato agli elementi di trasmissione del moto. Ospita i componenti principali del sistema di movimento, ossia una ruota dentata condotta e un pignone, i quali consentono la movimentazione del dispositivo di sicurezza passante nell'asola della ruota condotta. Inoltre sono presenti anche corpi volventi cilindrici stampati in 3D in materiale iglidur, per ridurre l'attrito da strisciamento, e una ralla accoppiata direttamente al piano base.

Infine ospita i componenti elettronici, tra cui la batteria, i driver, il microcontrollore, i vari supporti e alloggiamenti secondari (realizzati in nylon PA12 mediante stampa 3D SLS).



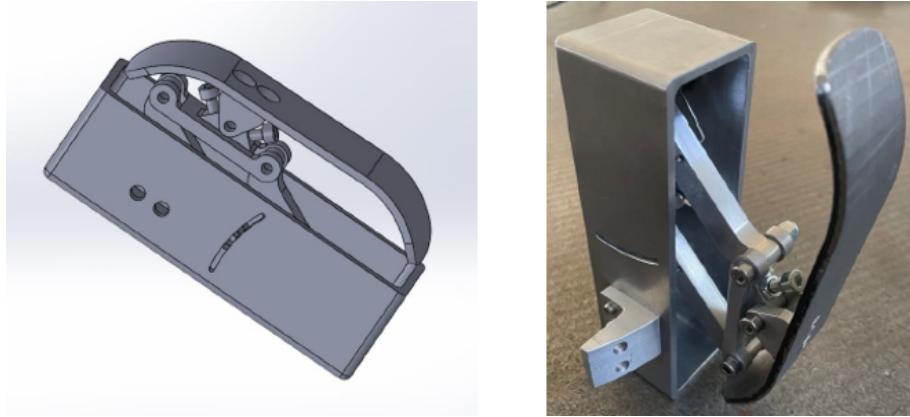
*Figura 2.6: corpo centrale del robot*



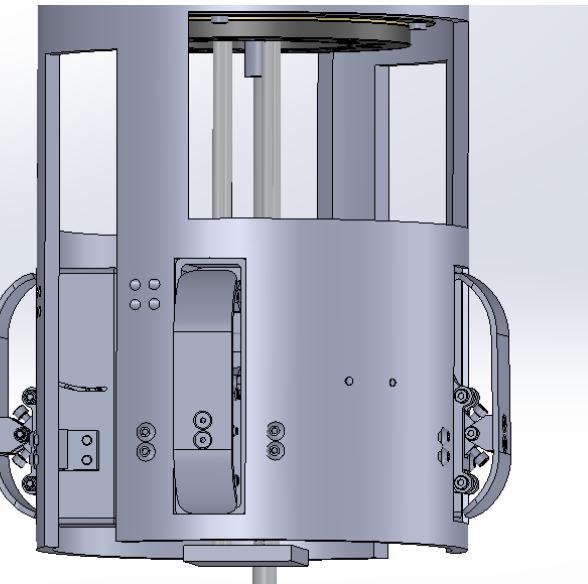
*Figura 2.7: ralla accoppiata al piano base*

La parte inferiore accoglie un sistema di pattini disposti a 90°, utile per ridurre il rischio di impuntamento e migliorare la fluidità del movimento verticale, e l'interfaccia meccanica dedicata alle braccia robotiche tele-operate. Tale interfaccia è stata appositamente progettata per assicurare la corretta coassialità tra il robot e i manipolatori, evitando interferenze tra i

movimenti delle braccia e la struttura del pozzo. La geometria di aggancio, composta da flange in alluminio con sede di allineamento e fissaggio rapido, consente un montaggio stabile ma reversibile, agevolando la manutenzione o la sostituzione dei componenti.

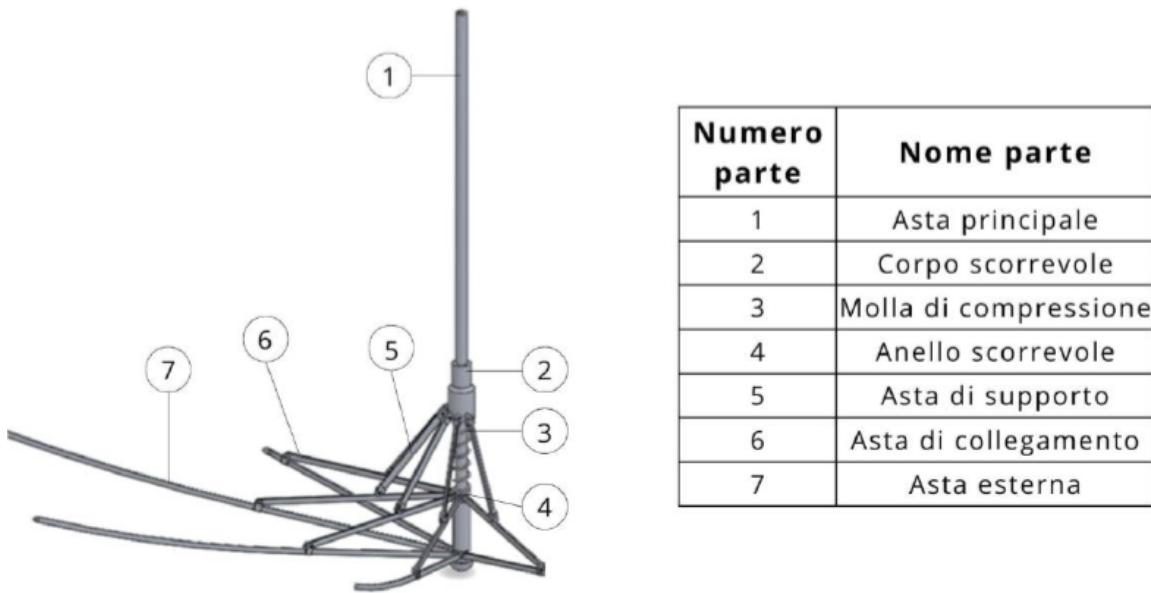


*Figura 2.8: modello CAD (sinistra) e fisico (destra) del sistema pattino*



*Figura 2.9: modello CAD parte inferiore con sede pattini e interfaccia con braccia tele-operate*

Il dispositivo di sicurezza [30] è collocato in posizione coassiale rispetto all'asse principale del robot e può essere movimentato verticalmente grazie a un sistema di scorrimento lineare da implementare e controllare tramite Raspberry Pi Pico. Tale sistema consentirà la discesa controllata del dispositivo fino al punto desiderato, dove viene aperto per bloccare in sicurezza la vittima e impedirne un ulteriore sprofondamento. La struttura telescopica del dispositivo, basata su aste collegate tramite giunti articolati e molle di espansione, garantisce un'apertura progressiva e adattabile ai diversi diametri del pozzo, mantenendo al contempo una notevole stabilità.



*Figura 2.10: dispositivo di sicurezza*

In sintesi, il sottosistema meccanico del robot realizzato dall'Ing. Astuti (Figura 2.2) rappresenta un'evoluzione concreta e funzionale delle versioni precedenti, riuscendo a integrare in un unico corpo compatto il dispositivo di sicurezza, il sistema di scorrimento e l'interfaccia per le braccia tele-operate. Questa configurazione ha portato alla realizzazione del primo prototipo operativo, pronto per future implementazioni elettroniche e prove sperimentali in ambiente controllato.

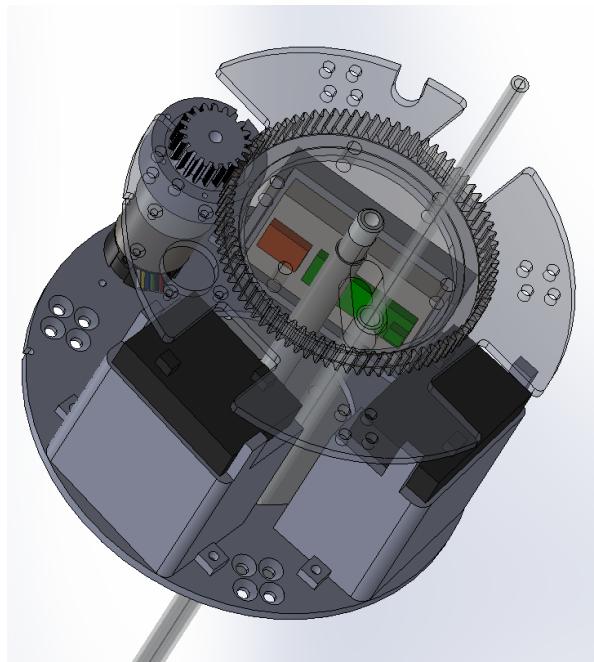
### 2.3.2 Sottosistema elettronico

Il sottosistema elettronico del prototipo finale rappresenta il cuore operativo dell'intero sistema, consentendo la gestione coordinata dei motori, della comunicazione e delle future integrazioni sensoriali. L'obiettivo principale di questa sezione progettuale è stato quello di realizzare un'architettura compatta, modulare e facilmente manutenibile, capace di garantire l'affidabilità operativa in un contesto complesso come quello dei pozzi artesiani.

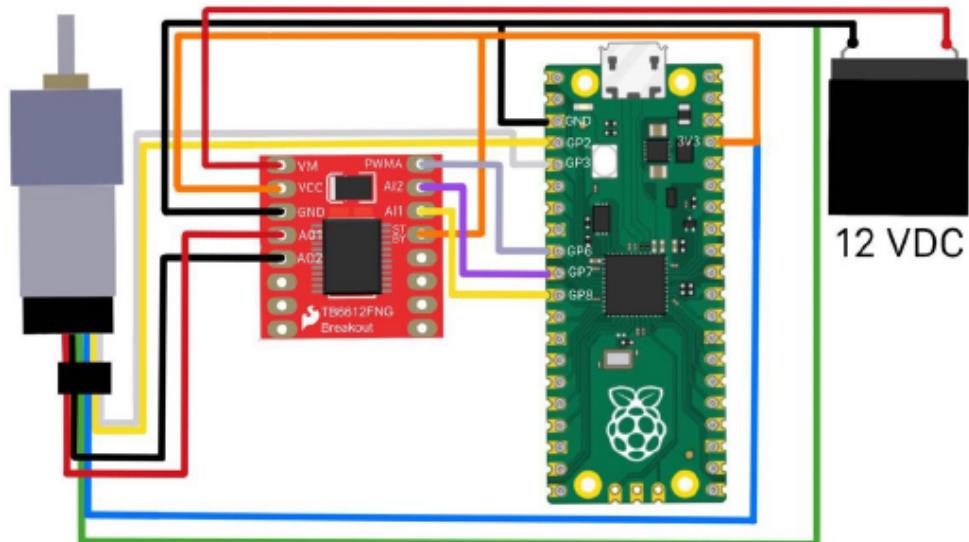
L'alimentazione del robot è fornita da due batterie al piombo da 6V e 4Ah collegate in serie per ottenere la tensione di 12V necessaria per alimentare il motore principale. Le batterie sono alloggiate in un vano centrale progettato per minimizzare le vibrazioni e favorire la distribuzione bilanciata dei pesi. Dal punto di vista elettrico, il sistema è stato dotato di fusibili di protezione e filtri RC per attenuare i disturbi elettromagnetici generati dai motori e salvaguardare i componenti logici.

La gestione della potenza e dei segnali di comando è affidata a un driver TB6612FNG in grado di pilotare il motore BLDC principale, responsabile del movimento rotatorio del corpo centrale e il posizionamento del dispositivo di sicurezza.

L'elaborazione e il coordinamento dei segnali sono gestiti da un microcontrollore Raspberry Pi Pico, scelto per la sua architettura dual-core e l'ampia disponibilità di interfacce digitali (UART, I<sup>2</sup>C, SPI). Il microcontrollore rappresenta il punto di connessione tra la parte di potenza e quella di supervisione, coordinando i flussi informativi in tempo reale e assicurando una risposta rapida ai comandi inviati dall'interfaccia utente.



**Figura 2.11:** modello CAD sede alloggiamento componenti elettroniche



*Figura 2.12: circuito elettrico per il controllo del motore*

Un aspetto di particolare rilievo del progetto elettronico riguarda la concezione del piatto sensori, un modulo progettato per ospitare tutti i dispositivi di rilevamento ambientale e visivo del robot. Sebbene non ancora implementato, il piatto sensori è stato completamente ideato e modellato in CAD e realizzato fisicamente, con la previsione di includere:

- una telecamera digitale ad alta risoluzione, destinata al monitoraggio visivo e alla trasmissione in tempo reale all'operatore;
- un sensore a ultrasuoni per la misurazione della distanza dal fondo o dalla vittima;
- sensori di temperatura, umidità, ossigeno e gas nocivi, per la valutazione delle condizioni ambientali del pozzo.

Il modulo, nella sua versione progettuale, è stato concepito come un'unità estraibile e indipendente, collegata alla logica centrale mediante un'interfaccia standardizzata a 10 pin, per facilitarne la sostituzione e la manutenzione.

Il cablaggio interno del robot è stato ottimizzato mediante canaline integrate stampate in 3D e connettori JST-PH per i segnali di bassa potenza e XT30 per l'alimentazione principale. Questa soluzione garantisce una disposizione ordinata, riduce il rischio di interferenze e consente interventi rapidi di diagnostica o manutenzione.

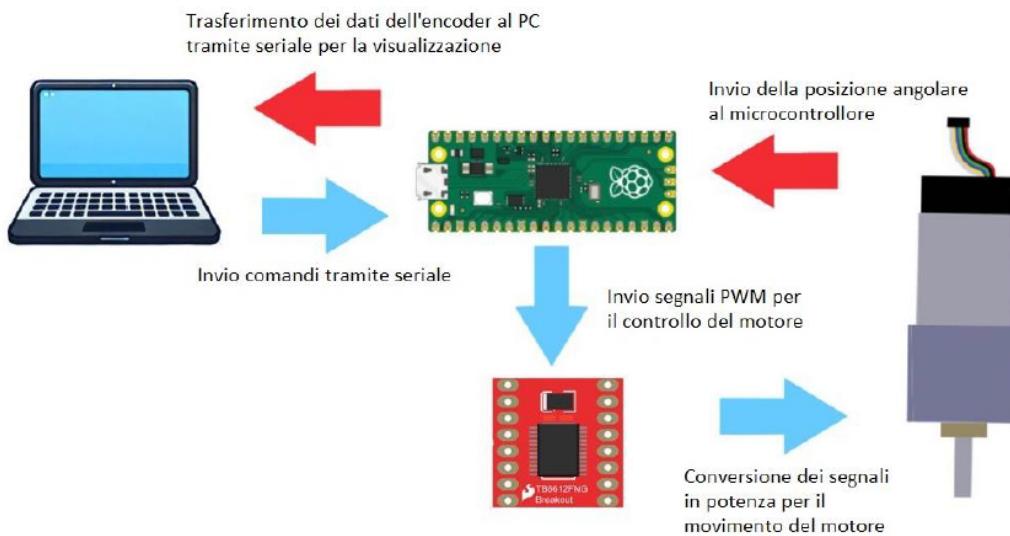
In sintesi, il sottosistema elettronico del prototipo finale coniuga robustezza e flessibilità, offrendo una base solida per l'integrazione futura del piatto sensori, del sistema di scorrimento e delle braccia tele-operate, mantenendo al contempo una chiara separazione tra logica di controllo, potenza e acquisizione dati.

### 2.3.3 *Sottosistema di controllo*

Il sottosistema di controllo costituisce il nucleo logico del robot, responsabile della gestione coordinata di tutti i dispositivi elettronici e della comunicazione tra la parte hardware e la stazione di comando esterna. L'obiettivo è garantire una tele-operazione fluida, precisa e sicura, riducendo al minimo i tempi di risposta e semplificando l'interazione dell'operatore con il sistema.

Il Raspberry Pi Pico funge da unità di controllo principale, gestendo il motore BLDC mediante un algoritmo di controllo in coppia a retroazione chiusa basato su un regolatore PID. I parametri del controllore sono stati determinati sperimentalmente durante la fase di test per ottenere un comportamento stabile anche in presenza di variazioni di carico dovute al peso del dispositivo di sicurezza.

La comunicazione tra il robot e la postazione di comando esterna avviene tramite un canale seriale (UART). I dati trasmessi includono lo stato dei motori, la profondità, le condizioni operative e, in prospettiva, i parametri ambientali che verranno forniti dal piatto sensori una volta implementato. Sul lato utente è stata sviluppata una GUI in Python, tramite le librerie *Tkinter* e *PySerial*, che consente di controllare con adeguata precisione la ruota condotta e, di conseguenza, anche la movimentazione del dispositivo di sicurezza in modo pratico ed efficiente.



*Figura 2.13: logica di funzionamento del controllo motore principale*

Il sistema include funzioni di sicurezza attiva, come l'arresto automatico in caso di sovraccorrente o perdita di segnale, e procedure di soft start per il motore BLDC, riducendo gli stress meccanici e migliorando la stabilità complessiva del robot.

L'infrastruttura software è stata progettata in modo scalabile, con la possibilità di integrare in futuro il controllo del sistema di scorrimento, delle braccia robotiche tele-operate e dei moduli sensoriali tramite bus I<sup>2</sup>C o SPI, mantenendo invariata la logica generale. Tale architettura rende il sistema di controllo un elemento chiave non solo per la gestione del prototipo attuale, ma anche come base per gli sviluppi successivi del progetto.

## 2.4 Logica di funzionamento generale

Il funzionamento del robot di salvataggio per pozzi artesiani si basa su una sequenza di operazioni coordinate che integrano i sottosistemi meccanico, elettronico e di controllo descritti in precedenza. L'obiettivo principale è garantire un intervento rapido, stabile e sicuro

all'interno di un ambiente estremamente confinato, dove lo spazio di manovra è limitato e l'accessibilità per gli operatori umani è nulla.

La logica generale del sistema può essere suddivisa in quattro fasi principali: discesa e posizionamento, rotazione e allineamento, posizionamento del dispositivo di sicurezza, recupero della vittima.

Nella prima fase, il robot viene collegato a un sistema di sollevamento esterno, generalmente una carrucola o un argano, e calato verticalmente nel pozzo fino a raggiungere la profondità di intervento. Il movimento di discesa è passivo, cioè controllato manualmente dall'operatore, mentre il sistema elettronico monitora in tempo reale la posizione e i parametri ambientali attraverso il piatto sensori. Questi dati, una volta implementato il sistema, permetteranno di valutare la temperatura, l'umidità e l'eventuale presenza di gas pericolosi.

Una volta raggiunta la quota desiderata, entra in gioco il motore BLDC, la cui funzione è quella di ruotare la sezione centrale del robot. Tale rotazione viene trasmessa alla ruota condotta attraverso la quale scorre il dispositivo di sicurezza. In questo modo il dispositivo può compiere un movimento circolare intorno all'asse verticale del robot, consentendo all'operatore di individuare il punto più idoneo in cui procedere con la discesa verso la vittima. Questa fase di rotazione e allineamento è fondamentale per garantire precisione e sicurezza, poiché consente di posizionare il dispositivo esattamente al di sotto del bambino.

La terza fase riguarda la discesa e apertura del dispositivo di sicurezza. Una volta determinata la posizione ottimale, il sistema di scorrimento lineare consentirà di far scendere il dispositivo sotto la vittima collaborando con le braccia robotiche tele-operate, montate sul corpo principale del robot. Queste vengono controllate da remoto dall'operatore attraverso un'interfaccia di tele-manipolazione. Servendosi della visione fornita dalle telecamere integrate, l'operatore muove le braccia in modo da posizionare con precisione il dispositivo di sicurezza. Quando tale dispositivo raggiunge la posizione desiderata, viene azionato il meccanismo di rilascio: grazie alla forza di gravità e all'energia accumulata nella molla di compressione, il dispositivo si apre fino a creare una superficie di supporto stabile. Se il pozzo presenta un diametro inferiore rispetto all'apertura massima, il sistema si espanderà fino a toccare le pareti, adattandosi automaticamente alla sezione interna del pozzo. Il posizionamento del dispositivo di sicurezza

L'ultima fase prevede l'intervento di recupero della vittima. Per ora tale intervento è previsto mediante lo scavo di un tunnel parallelo, come nelle tecniche di soccorso tradizionale, ma l'idea è quella di implementare in futuro un sistema che permetta di imbracare la vittima mediante l'utilizzo delle braccia robotiche. In tal modo, mentre il robot rimane ancorato in posizione, l'imbracatura viene collegata ad un sistema di sollevamento esterno, che provvederà a riportare la vittima in superficie in modo controllato e sicuro.

L'intero processo è supervisionato dall'unità di controllo esterna, che coordina la comunicazione tra i microcontrollori, il motore BLDC, il sistema di scorrimento e l'interfaccia grafica dell'operatore. Il robot opera in modalità semi-automatica: mentre i movimenti meccanici e la gestione della coppia del motore sono automatizzati, le azioni delicate, come la discesa del dispositivo di sicurezza e la manipolazione con le braccia, restano sotto il diretto controllo umano. Questo approccio ibrido garantisce la massima sicurezza, mantenendo al tempo stesso la flessibilità necessaria per affrontare le variabili impreviste che caratterizzano ogni intervento reale.

## 2.5 Obiettivi del progetto di tesi

Il presente lavoro di tesi ha come obiettivo principale il proseguimento e il miglioramento del un progetto del robot mobile descritto precedentemente. L'intento complessivo è quello di contribuire alla realizzazione di un sistema robotico tele-operato capace di operare in ambienti estremamente confinati, garantendo la sicurezza del bambino durante le fasi di salvataggio e consentendone il recupero in tempi rapidi e con la massima affidabilità.

Il lavoro svolto si è concentrato in particolare sull'ottimizzazione di alcuni sottosistemi fondamentali del robot e sull'introduzione di nuovi moduli funzionali, con l'obiettivo di migliorare le prestazioni meccaniche e di controllo. Le attività di tesi, dopo una prima revisione che ha portato ad alcune modifiche meccaniche, si sono articolate lungo due principali direttive progettuali:

- Progettazione e realizzazione di un sistema di scorrimento per il dispositivo di sicurezza ad arpionismo: tale sistema ha la funzione di gestire in modo controllato la discesa del dispositivo di aggancio, che costituisce uno degli elementi più critici durante la fase di salvataggio. L'obiettivo è garantire un movimento fluido e preciso, evitando urti o impuntamenti che potrebbero compromettere l'integrità del pozzo o mettere a rischio il

soggetto da soccorrere. Il sistema è gestito tramite un microcontrollore Raspberry Pi Pico e un modulo di comunicazione a infrarossi, che consente di separare la parte di controllo, situata sulla carcassa fissa del robot, da quella di movimentazione, situata sulla parte rotante.

- Progettazione e sviluppo di due braccia robotiche tele-operate: queste costituiscono il principale sistema di manipolazione del robot e sono state concepite per riprodurre i movimenti dell'operatore in superficie attraverso un sistema master/slave. Il controllo è affidato a microcontrollori Arduino e l'interfaccia di comando prevede l'utilizzo di sensori di posizione installati sul braccio dell'operatore. Tale approccio consente un'elevata precisione nei movimenti e un controllo intuitivo durante le operazioni di recupero.

Oltre a questi due obiettivi principali, il progetto di tesi ha previsto anche la progettazione concettuale di un ambiente di test dedicato, pensato per simulare in modo realistico le condizioni operative di un pozzo artesiano e consentire in futuro una valutazione sperimentale del sistema robotico. Sebbene tale ambiente non sia ancora stato fisicamente realizzato, la sua definizione progettuale costituisce un passo importante per la validazione e l'affinamento delle soluzioni sviluppate.

In sintesi, l'obiettivo del lavoro è stato quello di proseguire l'evoluzione del progetto originario, introducendo miglioramenti concreti nei sistemi di movimento e manipolazione del robot, e gettando le basi per la successiva fase di sperimentazione. Tali risultati contribuiscono in modo significativo all'avanzamento di un progetto fortemente innovativo, il cui fine ultimo è quello di salvare vite umane in scenari di emergenza complessi e ad alto rischio.

---

## CAPITOLO 3. Ottimizzazione del prototipo e progettazione dell'ambiente di test

A seguito della definizione dell'architettura generale del sistema robotico, si è ritenuto necessario avviare una fase di revisione volta ad apportare alcuni accorgimenti meccanici per ridurre i fenomeni di impuntamento e garantire una maggiore fluidità nei movimenti verticali.

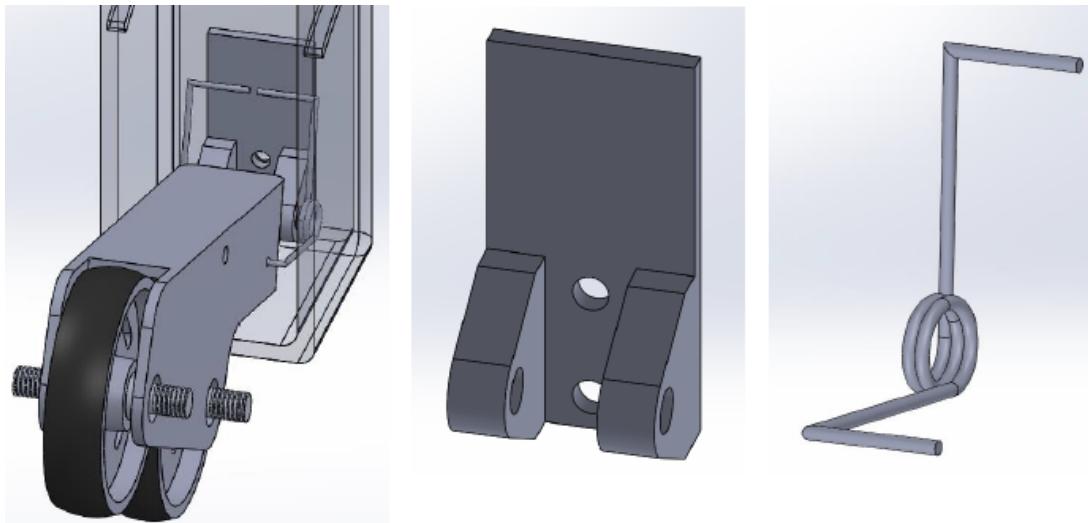
Parallelamente, è stata avviata anche la progettazione di un ambiente di test dedicato, concepito per simulare in maniera controllata le condizioni operative tipiche dei pozzi artesiani. Sebbene tale ambiente non sia ancora stato realizzato fisicamente, la sua progettazione ha permesso di definire in modo preliminare le caratteristiche geometriche e funzionali necessarie per una futura fase sperimentale del progetto.

### 3.1 Modifiche e ottimizzazioni del robot

Le prime attività svolte durante il progetto di tesi hanno riguardato una serie di modifiche e ottimizzazioni sul prototipo esistente, con l'obiettivo di incrementarne l'affidabilità meccanica e la precisione nel controllo del movimento.

Dal punto di vista meccanico, l'eccessiva morbidezza delle molle di torsione elicoidali montate sulle ruote folli e sui pattini di guida del prototipo evidenziano problemi di stabilità. La bassa rigidezza di tali molle potrebbe portare ad irregolarità del sistema, in quanto causerebbero frequenti episodi di impuntamento lungo le pareti interne del tubo di prova. Questo fenomeno potrebbe rendere difficoltosa la discesa controllata del robot, compromettendo la linearità del movimento.

Per ridurre tali criticità, si è proceduto alla sostituzione delle molle esistenti con elementi più rigidi, caratterizzati da una costante elastica maggiore. Tale modifica porterà ad un miglioramento della capacità delle ruote e dei pattini di mantenere un contatto costante con le pareti del condotto, assicurando una maggiore stabilità laterale e una riduzione significativa delle vibrazioni e delle sollecitazioni anomale.



*Figura 3.1: a sinistra CAD del sistema ruota, al centro CAD del cardine e a destra CAD della molla*

In particolare è stato fatto un calcolo sulla rigidezza e sulla coppia variando i parametri delle molle originarie presenti sul prototipo per evidenziare un effettivo aumento delle prestazioni meccaniche. Le formule utilizzate per il calcolo della rigidezza torsionale  $k$  e per la coppia elastica di reazione della molla  $\tau$  sono le seguenti:

$$k = \frac{E \cdot d^4}{10.8 \cdot D \cdot N}$$

dove:

- $k$  = costante torsionale (N·m)
- $E$  = modulo di Young del materiale (Pa)
- $d$  = diametro del filo (m)
- $D$  = diametro medio della spira (m)
- $N$  = numero di spire attive

$$\tau = k \cdot \theta$$

dove:

- $\tau$  = coppia (N·m)
- $k$  = costante torsionale (N·m / rad)
- $\theta$  = angolo di torsione (rad)

Considerando che il modulo di Young, pari a  $E = 210 \cdot 10^9$  Pa (acciaio), rimane invariato in quanto il materiale non viene modificato, i risultati ottenuti vengono riportati nella tabella seguente:

*Tabella 3.1: valori di rigidezza e coppia al variare dei parametri della molla di torsione*

$\theta$ (°)	$d$ (mm)	$D$ (mm)	$N$ (spire)	$k$ (N·m / rad)	$\tau$ (N·m)
90	1	6	2	1.620	2.545
90	1.2	6.2	2	3.252	5.110
90	1.5	6.5	2	6.955	10.980
135	1.2	6.2	1	6.503	15.320
135	1.5	6.5	1	15.144	35.680

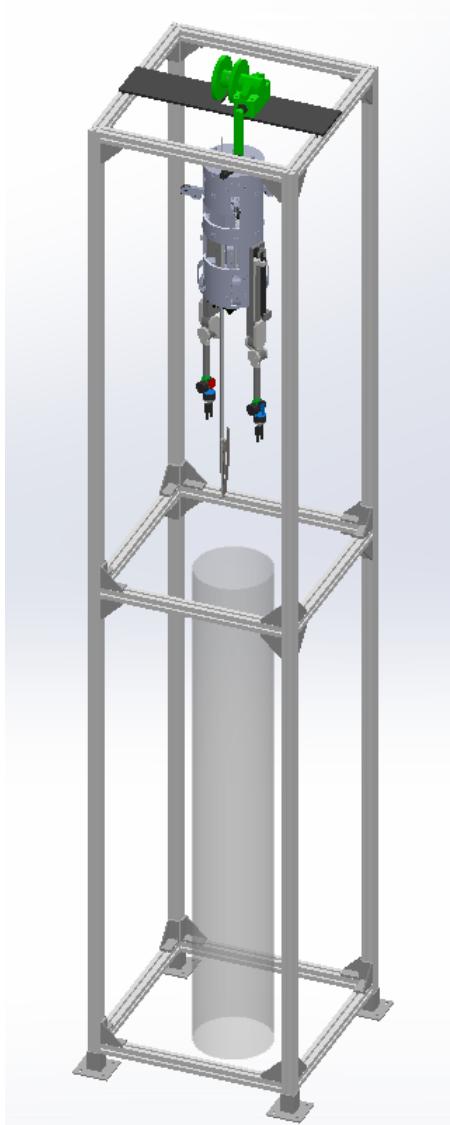
I parametri della prima riga sono quelli relativi alle molle originarie sul prototipo, successivamente si può notare come variano i valori di  $k$  e  $\tau$  al variare prima del diametro del filo  $d$ , e di conseguenza del diametro medio della spira  $D$  poiché il diametro interno della spira deve rimanere costante e pari a 5mm, e poi al variare dell'angolo di torsione  $\theta$ , e di conseguenza del numero di spire  $N$  in quanto devono essere rispettati gli ingombri tra il cardine e la sede di alloggiamento della ruota/pattino.

Dai risultati ottenuti si evince che la molla con caratteristiche di coppia e rigidezza migliori è l'ultima considerata, ma durante la fase sperimentale si è deciso di implementare le molle con  $d$  pari a 1.2mm e  $\theta$  pari a 90°, essendo le altre eccessivamente rigide. Inoltre, le modifiche introdotte, pur non alterando la struttura generale del sistema, hanno apportato un notevole miglioramento nella stabilità dinamica.

### 3.2 Progettazione dell'ambiente di test

Per validare sperimentalmente il comportamento del robot in condizioni operative quanto più vicine a quelle reali, è stata progettata una struttura di test dedicata, concepita per riprodurre fedelmente le condizioni geometriche e dinamiche di un pozzo artesiano. L'obiettivo principale dell'ambiente di prova è quello di valutare l'efficacia delle soluzioni meccaniche ed elettroniche adottate, verificando al tempo stesso la stabilità del sistema e la precisione dei movimenti durante le fasi di posizionamento e di intervento del dispositivo di sicurezza.

L'ambiente di test si compone di due elementi principali: una struttura portante e un tubo di plexiglass che funge da simulatore di pozzo. La struttura portante, modellata interamente in *SolidWorks*, è costituita da profilati in alluminio estruso da 45x45 mm, collegati mediante giunti angolari anti-rotazione che garantiscono rigidità e stabilità all'intero sistema. La base della struttura ha dimensioni pari a 80x80 cm, mentre l'altezza complessiva raggiunge 4 m, consentendo di ospitare il tubo e di eseguire test su una scala realistica.



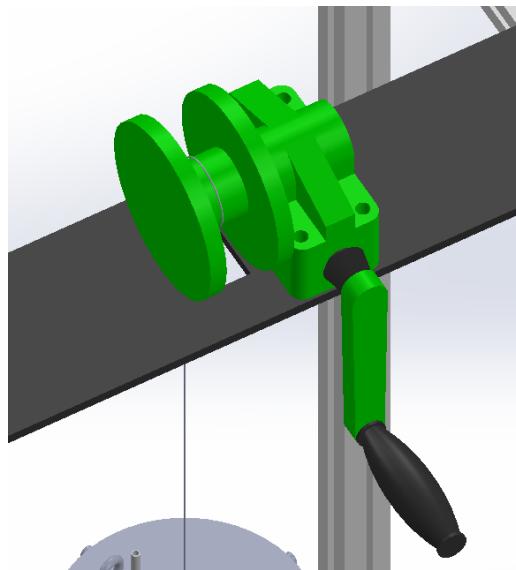
*Figura 3.2: CAD ambiente di test nella configurazione iniziale*



*Figura 3.3: CAD ambiente di test nella configurazione con robot calato*

All'interno del telaio è inserito un tubo cilindrico in plexiglass di 2 m di altezza e 30 cm di diametro, scelto per simulare un pozzo artesiano di dimensioni reali. Il materiale trasparente consente di monitorare visivamente il comportamento del robot durante le prove, facilitando la registrazione di video e l'acquisizione di dati cinematici per successive analisi sperimentali.

Nella parte superiore della struttura è fissato un paranco manuale, utilizzato per calare il robot all’interno del tubo in modo controllato. Il sistema consente di regolare con precisione la velocità di discesa e di arrestare il movimento in qualsiasi momento, garantendo la sicurezza del prototipo e degli operatori durante le prove.



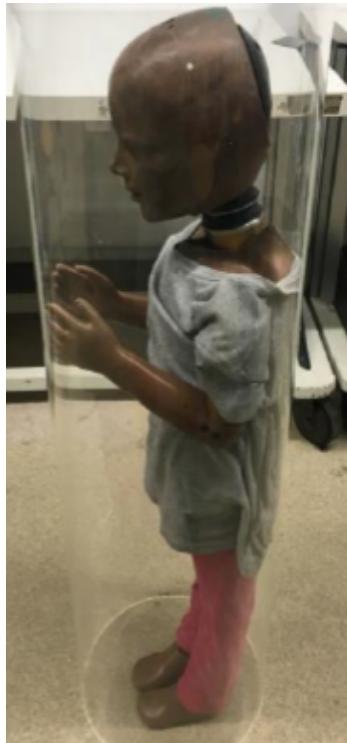
*Figura 3.4: modello CAD paranco manuale*

Per simulare realisticamente la presenza di una vittima, è stato selezionato un manichino antropomorfo per crash test, scelto in base alle caratteristiche fisiche di un bambino di tre anni al novantesimo percentile, ovvero con dimensioni e massa superiori rispetto al 90% dei coetanei. Questa scelta consente di testare le prestazioni del dispositivo in condizioni più gravose, fornendo una valutazione conservativa delle capacità operative del sistema di soccorso. Il manichino verrà posizionato all’interno del tubo di plexiglass in modo da simulare il caso reale di un bambino bloccato nel pozzo, consentendo di testare l’interazione del robot con il dispositivo di sicurezza e le braccia tele-operanti.

Per definire le dimensioni degli spazi liberi, da cui poi sarà possibile far scorrere il dispositivo di sicurezza, sono stati fatti dei primi test sul sistema tubo-manichino andando a simulare una situazione reale e considerando le dimensioni caratteristiche del manichino riportate nella tabella seguente:

*Tabella 3.2: valori delle dimensioni del manichino*

	Altezza con braccia abbassate	Altezza con braccia alzate	Larghezza spalle
Dimensioni manichino	950 mm	1040 mm	290 mm



*Figura 3.5: vista laterale del sistema tubo-manichino*



*Figura 3.6: vista semi-frontale del sistema tubo-manichino*



*Figura 3.7: vista dall'alto del sistema tubo-manichino*



*Figura 3.8: vista dal basso del sistema tubo-manichino*

Sono state effettuate due diverse misurazioni:

- La distanza tra il torace del manichino e la parete del tubo
- La distanza tra il capo del manichino e la parete del tubo

I risultati ottenuti sono riportati nella seguente tabella:

*Tabella 3.3: valori delle dimensioni degli spazi liberi*

	Distanza torace bambino-parete pozzo	Distanza capo bambino-parete pozzo
Dimensioni spazi liberi	132 mm	Circa 110 mm

Ora, considerando che l'ingombro maggiore del dispositivo di sicurezza misura all'incirca 40/50 mm, dai risultati ottenuti si evince che, una volta posizionato correttamente, il dispositivo di sicurezza può scorrere al disotto del bambino senza essere ostacolato [7].

Sebbene la struttura sia stata completamente progettata e dimensionata, la sua realizzazione fisica non è ancora stata completata. Tuttavia, la fase di modellazione ha permesso di definire con precisione i requisiti geometrici, strutturali e di sicurezza necessari alla futura costruzione e sperimentazione. Tale ambiente costituirà un banco di prova fondamentale per l'analisi del comportamento meccanico del robot e per la verifica del corretto funzionamento dei suoi sottosistemi di controllo e movimentazione.

---

## CAPITOLO 4. Movimentazione del dispositivo di sicurezza

Uno degli elementi centrali del progetto del robot di soccorso in pozzi artesiani è rappresentato dal dispositivo di sicurezza ad arpionismo, il cui scopo è quello di assicurare la stabilità e l'incolumità del bambino durante le delicate fasi di recupero. Tale sistema ha il compito di bloccare in modo controllato la posizione del soggetto all'interno del pozzo, impedendone un ulteriore scivolamento verso il basso e fornendo un punto di ancoraggio sicuro per le successive operazioni di estrazione.

La realizzazione di un meccanismo di questo tipo comporta una serie di sfide sia dal punto di vista meccanico sia da quello del controllo. È infatti necessario garantire un movimento fluido e preciso durante la discesa del dispositivo lungo il pozzo, evitando urti con le pareti e mantenendo al contempo una risposta dinamica stabile e prevedibile. Parallelamente, il sistema deve poter essere gestito a distanza in modo affidabile, consentendo all'operatore di monitorare e regolare in tempo reale la posizione e la velocità del dispositivo.

In questo capitolo vengono quindi descritte le modifiche e gli interventi progettuali effettuati sul prototipo del robot, con particolare attenzione al miglioramento del sistema di scorrimento che consente la discesa controllata del dispositivo di sicurezza. L'obiettivo principale di questa fase è stato quello di incrementare l'affidabilità e la precisione del meccanismo, riducendo i rischi di impuntamento e garantendo un funzionamento stabile e sicuro in ogni condizione operativa.

Tutte le componenti utilizzate per la realizzazione di tale sistema sono riportate in Appendice A – Distinta componenti del sistema di scorrimento.

### 4.1 Progettazione del sistema di scorrimento

Nel prosieguo del progetto di sviluppo del robot di soccorso, uno degli aspetti più significativi ha riguardato la realizzazione di un nuovo sistema di scorrimento destinato al controllo della discesa del dispositivo di sicurezza.

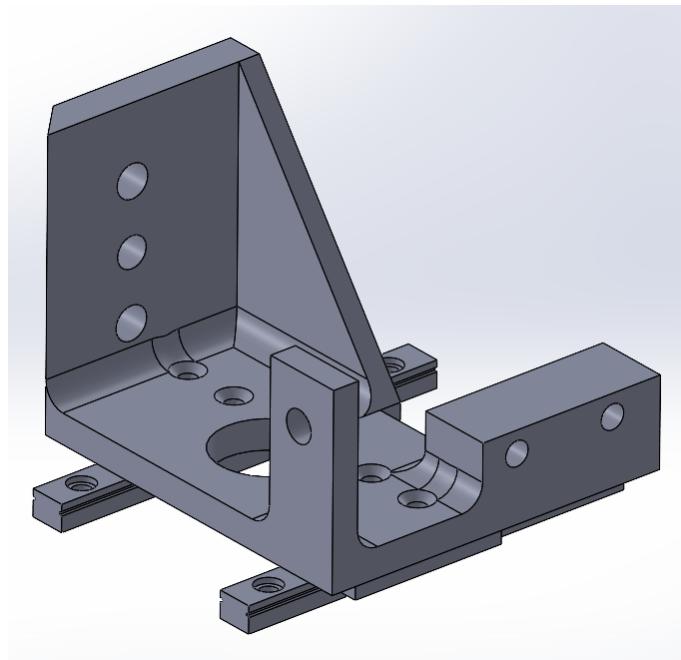
L'idea di partenza, proposta nella tesi di Astuti [7], nasce dall'esigenza di sostituire il precedente meccanismo di ancoraggio, risultato eccessivamente fragile e complesso da integrare nella struttura del robot. Tale sistema è stato concepito per permettere la discesa

controllata della camicia del dispositivo di sicurezza lungo l'asse del robot, garantendo al tempo stesso la stabilità e la precisione del movimento.

La soluzione iniziale prevedeva un dispositivo in grado di muoversi radialmente rispetto alla ruota dentata condotta del robot, restando solidale alla sua rotazione. Su questa base, nel corso di questa tesi, il sistema è stato rivisitato, ottimizzato e successivamente realizzato fisicamente, introducendo miglioramenti sia a livello meccanico che costruttivo per garantirne una maggiore affidabilità e integrabilità con il prototipo finale.

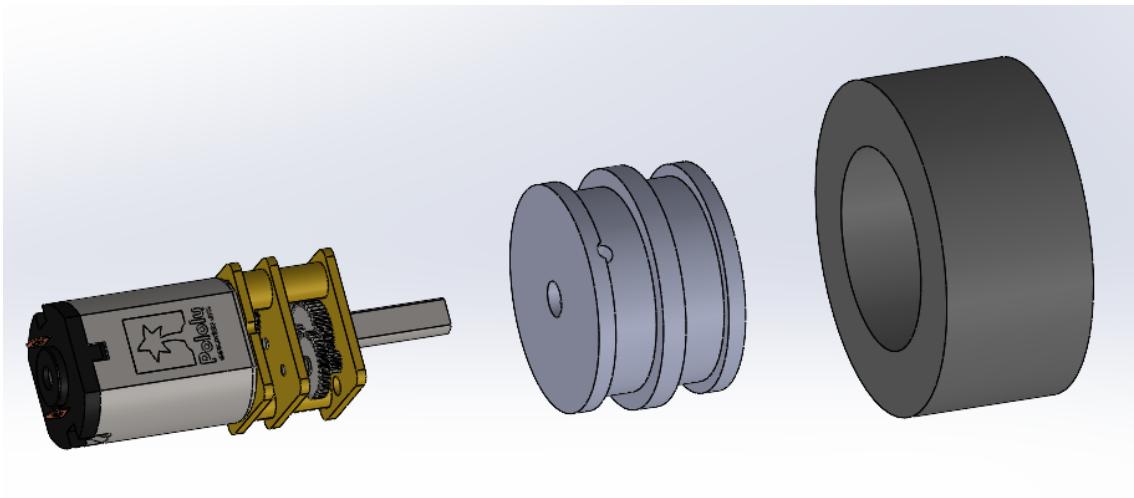
Il sistema di scorrimento aggiornato è costituito da una base strutturale, una ruota motorizzata di controllo e un elemento scorrevole.

La base, realizzata in alluminio, ospita un foro centrale del diametro di 14mm, necessario per il passaggio della camicia del dispositivo di sicurezza, e presenta un profilo compatibile con gli spazi interni della carcassa robotica. Essa è fissata a un sistema di pattini mobili che scorrono su guide lineari disposte ai lati dell'asola di passaggio del dispositivo, permettendo un movimento radiale controllato.



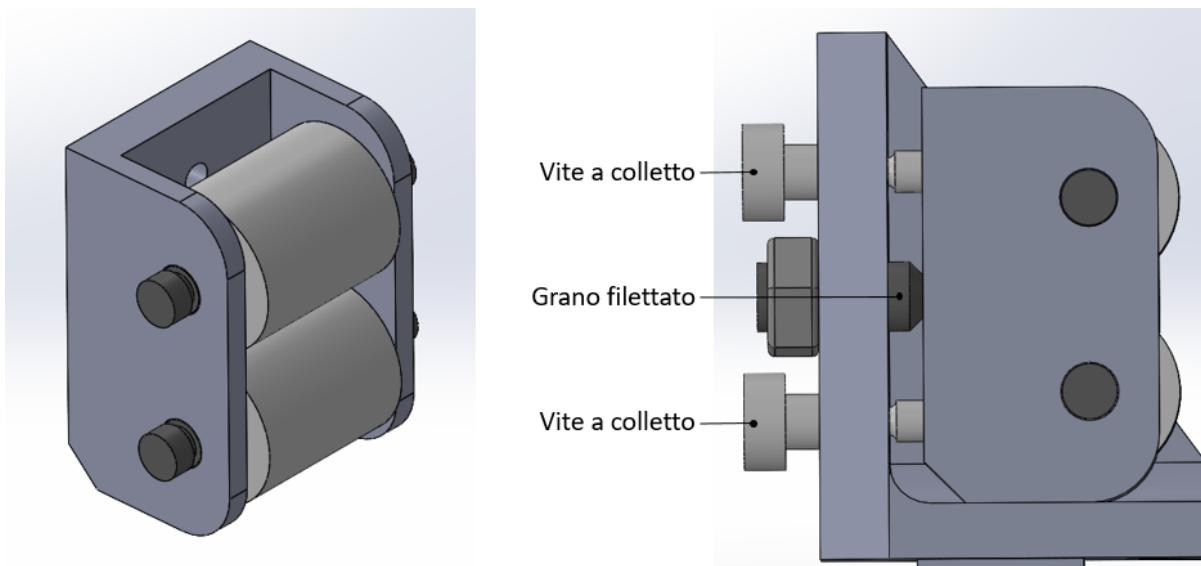
*Figura 4.1: modello CAD della base più sistema pattino-guida*

La ruota motorizzata, elemento attivo del sistema, è una Solarbotics RW2i in gomma del diametro di 28mm, azionata da un motore DC a 6V controllato mediante microcontrollore Raspberry Pi Pico. La scelta del materiale gommato garantisce un contatto ad alto attrito con la camicia, permettendo un controllo fine della discesa e riducendo il rischio di scivolamento.



*Figura 4.2: vista esplosa sistema motore-ruota*

L'elemento scorrevole, invece, integra due rulli passivi montati su un supporto mobile che scorre lungo due viti a colletto, con un grano filettato di regolazione che consente di variare la pressione esercitata sulla camicia in funzione della fase operativa.

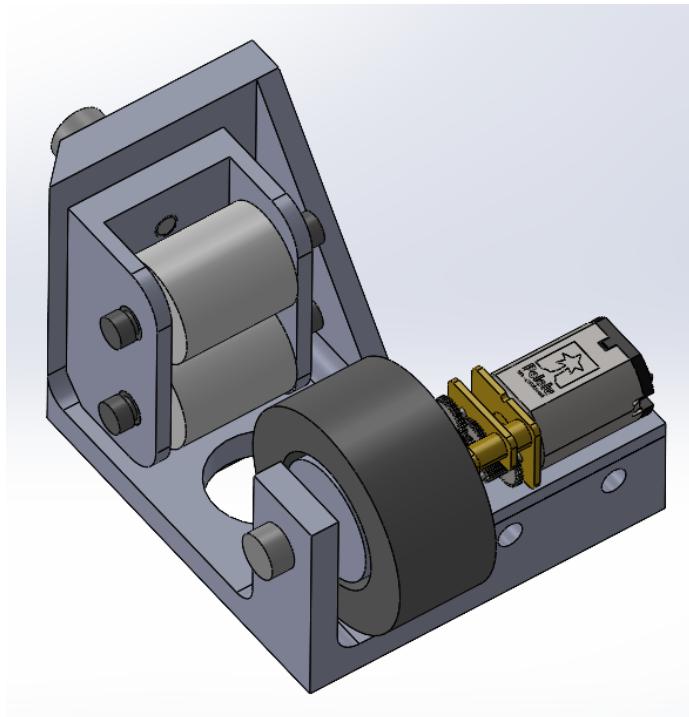


*Figura 4.3: modello CAD elemento scorrevole e collegamenti*

Il funzionamento del sistema si articola in due modalità principali:

- Modalità di fissaggio: la camicia del dispositivo di sicurezza viene inserita nel foro centrale e il grano viene regolato in modo da spingere i rulli contro la ruota motorizzata. L'attrito generato assicura una presa stabile che consente di bloccare la camicia nella posizione desiderata.
- Modalità di discesa controllata: una volta raggiunto il punto ottimale per il rilascio del dispositivo, la ruota motorizzata viene azionata in rotazione controllata,

permettendo una discesa lenta, fluida e continua della camicia. Questa fase è cruciale per il corretto posizionamento del dispositivo di sicurezza al di sotto della vittima, evitando urti o vibrazioni indesiderate.



*Figura 4.4: modello CAD sistema di scorrimento*

Il movimento radiale del dispositivo di sicurezza, ossia la sua traslazione lungo la ruota condotta per posizionarsi nel punto ottimale sotto la vittima, non è gestito direttamente dal sistema di scorrimento, ma è guidato e assistito dalle braccia tele-operate.

Queste ultime, grazie ai loro sei gradi di libertà e al controllo remoto dell'operatore, posizionano con precisione il dispositivo di sicurezza, supervisionando e coordinando l'intera fase di discesa. In questo modo si realizza una sinergia funzionale tra il sistema di scorrimento (che regola la velocità e la stabilità della discesa) e le braccia robotiche (che assicurano l'orientamento e la corretta traiettoria del dispositivo).

I test eseguiti hanno permesso di verificare la precisione del controllo di discesa, la stabilità del contatto ruota–camicia e la robustezza meccanica complessiva del sistema. Le prove hanno evidenziato un comportamento stabile e ripetibile, con movimenti fluidi e privi di fenomeni di impuntamento, confermando la validità della soluzione proposta e la sua idoneità all'integrazione definitiva nel robot.

In sintesi, il sistema di scorrimento rappresenta un'evoluzione sostanziale rispetto alle versioni precedenti, combinando in un unico dispositivo funzioni di sostegno, bloccaggio e movimentazione controllata del dispositivo di sicurezza.

La sua effettiva implementazione e validazione sperimentale costituiscono uno dei principali risultati raggiunti in questa tesi.

## 4.2 Schema elettrico e comunicazione infrarossi

Il sottosistema di comunicazione e pilotaggio del dispositivo di scorrimento è stato realizzato su due sotto unità elettriche distinte e complementari: il lato trasmettitore, fissato alla carcassa del robot, e il lato ricevitore, solidale alla sezione centrale che ruota. La separazione dei due lati è necessaria per mantenere la libertà di rotazione del corpo centrale, su cui è collegato il sistema di scorrimento, evitando i vincoli dei cablaggi. Il sistema è basato su due Raspberry Pi Pico e un modulo a infrarossi (IR) a 433MHz (modulo TX/RX) che invia i comandi dal lato fisso al lato rotante. Tale configurazione ha permesso di ottenere un collegamento stabile e continuo tra le due unità anche durante la rotazione completa del modulo centrale, assicurando l'assenza di interferenze o perdite di segnale nelle prove effettuate.

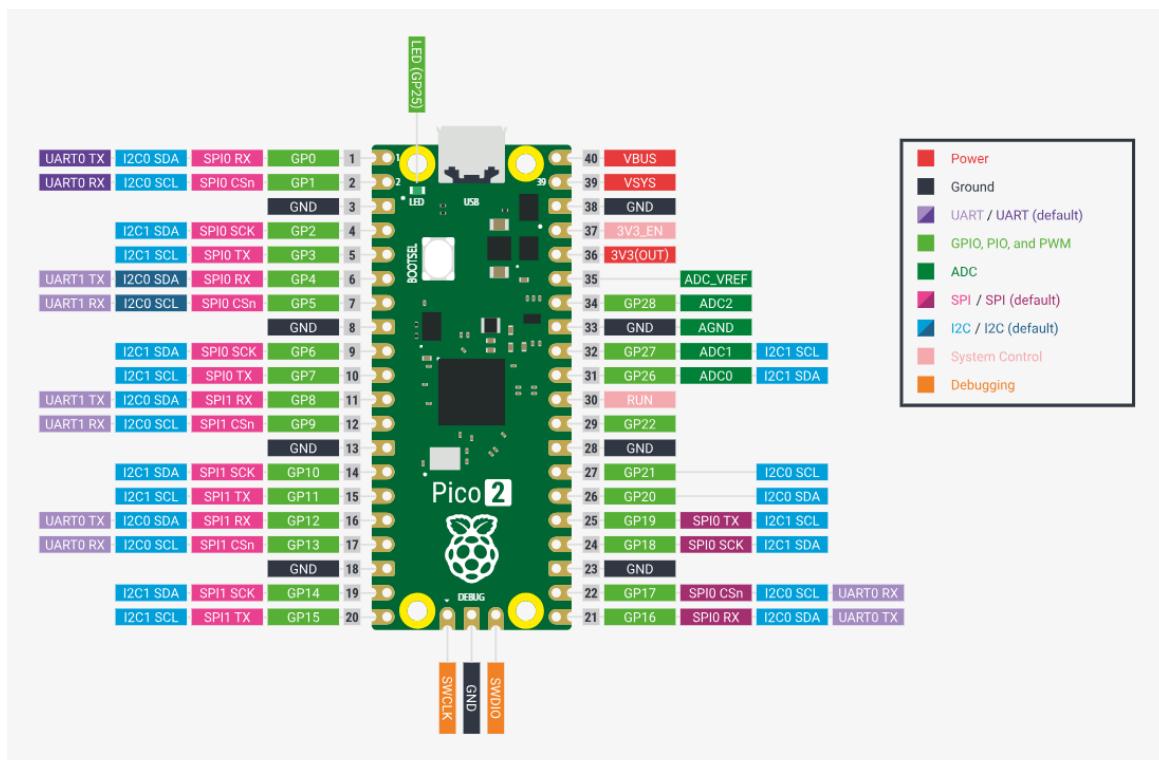


Figura 4.5: Raspberry Pi Pico pin out

#### 4.2.1 Lato trasmettitore

Il lato trasmettitore è alloggiato all'interno della carcassa principale del robot ed è costituito da una Raspberry Pi Pico (la stessa che governa anche il motore BLDC principale), da un modulo trasmettitore a infrarossi (TX) e da un pacco batterie da 12V ricavato collegando in serie le due batterie da 6V già presenti nel sistema per l'alimentazione del motore principale.

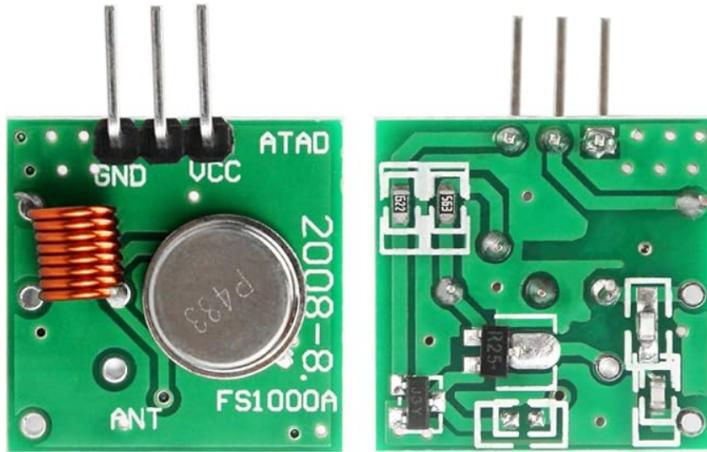
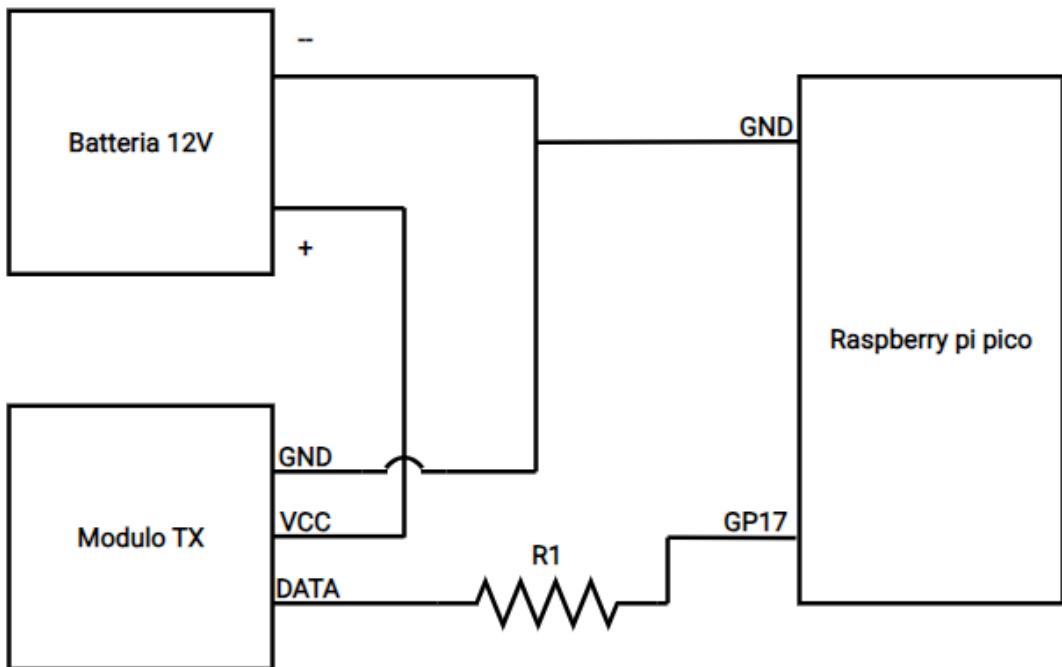


Figura 4.6: modulo trasmettitore IR (TX)

Collegamenti:

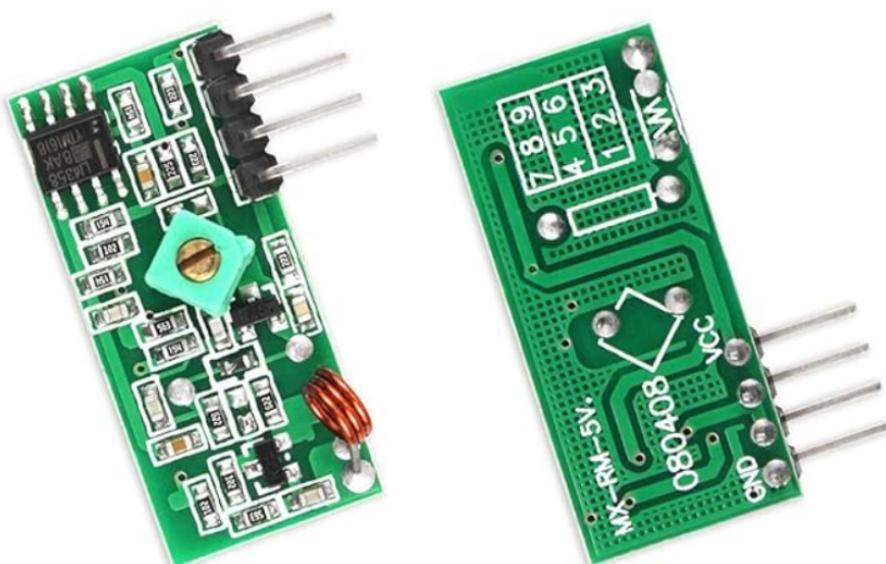
- Il polo negativo (-) del pacco batterie 12V è collegato al GND della Raspberry Pi Pico e al GND del modulo trasmettitore IR (creando la massa comune necessaria per il segnale).
- Il polo positivo (+) del pacco batterie 12V è collegato al VCC del modulo trasmettitore IR (alimentazione del TX).
- Il pin DATA del modulo trasmettitore IR è collegato al pin GP17 della Raspberry Pi Pico attraverso una resistenza R1 da  $1\text{k}\Omega$  ( $R1 = 1000\Omega$ ) che limita la corrente di pilotaggio del modulo TX.



*Figura 4.7: schema circuitale lato trasmettitore*

#### 4.2.2 Lato ricevitore

La parte ricevente è montata sul corpo rotante del robot, integrata nella sezione sottostante a quella che ospita il motore e i sistemi di movimentazione del dispositivo di sicurezza. Essa è alimentata da una batteria da 6V e include due Buck Converter step-down da 6V → 5V, una seconda Raspberry Pi Pico, un transistor 2N2222A per il pilotaggio del motore e un modulo ricevitore IR (RX).



*Figura 4.8: modulo ricevitore IR (RX)*

Collegamenti:

- Il polo negativo (-) della batteria 6V è collegato ai due IN- dei due Buck converter e all'emettitore del transistor 2N2222A (massa principale del lato rotante).
- Il polo positivo (+) della batteria 6V è collegato ai due IN+ dei due Buck converter e al terminale positivo del motore (motore alimentato direttamente dalla batteria 6V).
- Buck Converter 1 (alimentazione Pico rotante):
  - OUT+ (Buck1) → pin VSYS della Raspberry Pi Pico rotante (fornisce 5V alla Pico).
  - OUT- (Buck1) → GND della Pico rotante.
  - Inoltre, il pin GP16 della Pico rotante è collegato in ingresso ai dati del modulo ricevitore IR tramite una resistenza R2 da  $2\text{k}\Omega$  ( $R2 = 2000\Omega$ ). In pratica: DATA(RX) → R2 → GP16, con GND comune (OUT- del Buck1).
- Buck Converter 2 (alimentazione modulo RX):
  - OUT+ (Buck2) → VCC del modulo ricevitore IR (5 V stabilizzati).
  - OUT- (Buck2) → GND del modulo ricevitore IR.
  - Inoltre è prevista una resistenza R4 da  $1\text{k}\Omega$  ( $R4 = 1000\Omega$ ) tra OUT- del Buck2 (GND) e il pin DATA del modulo ricevitore; questa connessione è in effetti parte del circuito di adattamento/condizionamento del segnale di DATA in ingresso.
- Collegamenti del transistor 2N2222A (pilotaggio motore):
  - La base del 2N2222A è pilotata dal pin GP17 della Raspberry Pi Pico rotante tramite una resistenza R3 da  $330\Omega$  ( $R3 = 330\Omega$ ).
  - L'emettitore del 2N2222A è collegato al polo negativo della batteria 6V (massa comune lato rotante).
  - Il collettore del 2N2222A è collegato al polo negativo del motore (quindi il motore è alimentato dal + batteria 6V e con la massa commuta tramite il collettore del transistor).
- Infine, tra VCC e GND del modulo ricevitore IR è collegato un condensatore elettrolitico C da  $100\mu\text{F}$  a scopo di decoupling per stabilizzare l'alimentazione e filtrare i transienti.

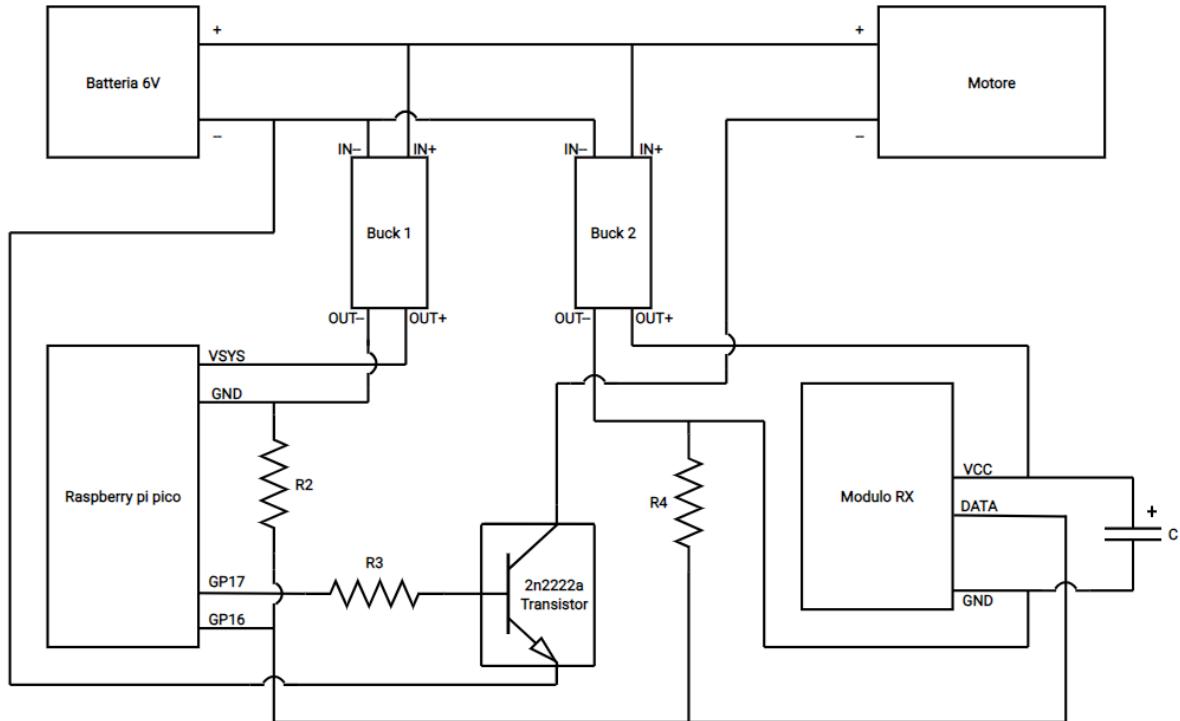


Figura 4.9: schema circuitale lato ricevitore

### 4.3 Software di gestione e interfaccia di comando

Il software di gestione del sistema di scorrimento è stato sviluppato con l'obiettivo di garantire un controllo affidabile e reattivo del motore dedicato al rilascio controllato della camicia del dispositivo di sicurezza.

L'architettura complessiva del sistema prevede una comunicazione tra tre componenti principali:

- un PC, che funge da interfaccia di comando per l'operatore;
- una scheda Raspberry Pi Pico fissa, che agisce come unità trasmittente del segnale a infrarossi;
- una scheda Raspberry Pi Pico solidale alla parte rotante del robot, che riceve il segnale e pilota il motore dedicato al controllo del dispositivo di scorrimento.

La comunicazione tra le due Raspberry è realizzata tramite un collegamento a infrarossi a 433Hz, che consente di mantenere separati elettricamente il corpo rotante e quello fisso, garantendo al tempo stesso la trasmissione affidabile dei comandi.

Il sistema software è stato interamente realizzato e testato. La logica generale prevede che l'operatore, tramite tastiera, possa attivare o arrestare la rotazione del motore in modo diretto e intuitivo. In particolare, il tasto S consente l'attivazione del motore, mentre il rilascio dello

stesso tasto ne comporta l'arresto. Un ulteriore comando, ESC, permette l'uscita dal programma e la disattivazione automatica di ogni segnale.

La struttura del software è suddivisa in tre moduli principali:

1. Interfaccia PC – `pc_sender.py`

Programma scritto in Python ed eseguito in Visual Studio o da terminale. Gestisce la lettura della tastiera e invia tramite porta seriale USB i comandi alla Raspberry Pi Pico trasmittente. La comunicazione avviene con baud rate di 115200 bps. Il codice utilizza la libreria `keyboard` per la gestione in tempo reale della pressione dei tasti e la libreria `pyserial` per la trasmissione dei byte.

Un estratto del codice è riportato di seguito, mentre il sorgente completo è disponibile in appendice (B.1 – Interfaccia PC (`pc_sender.py`)).

```
# callback su pressione/rilascio

def on_press_s(e):
    nonlocal is_on
    if not is_on:
        send(b'1')    # comando ON
        is_on = True
        # print("TX: ON")

def on_release_s(e):
    nonlocal is_on
    if is_on:
        send(b'0')    # comando OFF
        is_on = False
        # print("TX: OFF")
```

Questo frammento mostra la logica base di accensione e spegnimento del motore tramite la pressione del tasto “S”.

2. Unità trasmittente – `pico_tx.py`

Il codice caricato sulla Raspberry Pi Pico fissa, scritto in MicroPython, riceve i comandi seriali dal PC e genera un segnale PWM a circa 1kHz in uscita sul pin connesso al modulo trasmittitore IR. Il programma implementa inoltre un controllo di sicurezza che interrompe automaticamente la trasmissione se non vengono ricevuti nuovi comandi entro 10 secondi.

Il frammento di codice riportato di seguito mostra la gestione della trasmissione PWM, mentre il file completo è disponibile in appendice (B.2 – Raspberry Pi Pico trasmittente (`pico_tx.py`)).

```
def set_tx_on(on: bool):
    if on:
        # abilita PWM a 1 kHz, duty ~50%
        pwm.init(freq=PWM_FREQ_HZ, duty_u16=32768)
    else:
        pwm.deinit()
        tx_pin.value(0)
```

La funzione `set_tx_on()` abilita o disattiva il segnale PWM utilizzato per la trasmissione del comando al modulo infrarossi.

### 3. Unità ricevente – `pico_rx.py`

Questo script, anch'esso in MicroPython, viene eseguito sulla Raspberry Pi Pico solidale al corpo rotante. Essa riceve il segnale PWM dal modulo ricevitore IR e comanda il motore tramite un transistor di tipo 2N2222A.

La logica principale è basata su due routine: una interrupt (`_on_edge`) che rileva ogni fronte del segnale PWM e un watchdog temporizzato che disattiva il motore se non vengono ricevuti impulsi per oltre 150ms, garantendo un comportamento sicuro anche in caso di perdita del segnale.

Un estratto del codice è riportato di seguito, mentre il sorgente completo è riportato in appendice (B.3 – Raspberry Pi Pico ricevente (`pico_rx.py`)).

```
def _on_edge(pin):
    # IRQ: chiamata a ogni fronte (salita/discesa)
    global _last_edge_ms
    _last_edge_ms = time.ticks_ms()
    # Appena vediamo attività, alziamo subito l'uscita
    out17.value(1)

def _watchdog(_t):
    now = time.ticks_ms()
    if time.ticks_diff(now, _last_edge_ms) > TIMEOUT_MS:
        # Niente fronti da troppo tempo: consideriamo PWM assente
        out17.value(0)
```

Le funzioni `_on_edge()` e `_watchdog()` assicurano che il motore resti attivo solo in presenza di un segnale PWM continuo, spegnendolo automaticamente in caso di interruzione.

Di seguito, per riassumere tutto ciò che è stato detto, viene riportata una tabella contenente una sintesi dei moduli software.

*Tabella 4.1: sintesi moduli software*

Modulo	File	Linguaggio	Hardware	Funzione principale
Interfaccia PC	<code>pc_sender.py</code>	Python	PC	Invio dei comandi tramite porta seriale
Trasmettitore	<code>pico_tx.py</code>	MicroPython	Raspberry Pi Pico fissa	Generazione segnale PWM IR
Ricevitore	<code>pico_rx.py</code>	MicroPython	Raspberry Pi Pico rotante	Rilevazione segnale e pilotaggio motore

Nel complesso, il sistema consente un controllo diretto, affidabile e facilmente estendibile del motore principale.

Per una descrizione dettagliata del codice, comprensiva di tutti i commenti e delle istruzioni di esecuzione, si rimanda all'Appendice B – Codici sorgente del sistema di scorrimento.

#### 4.4 Implementazione sul prototipo

Dopo la fase di progettazione e di test funzionali a banco, si è proceduto alla realizzazione fisica e all'integrazione del sistema di scorrimento sul prototipo del robot di salvataggio. L'obiettivo era quello di rendere il sistema pienamente operativo, garantendo la compatibilità meccanica con la struttura esistente e l'integrazione elettronica con l'architettura di controllo del robot.

La prima fase ha riguardato il montaggio del sistema di scorrimento in sé, costituito da una base strutturale, dal supporto motore e dall'alloggiamento dei rulli passivi. Tutti i componenti principali sono stati realizzati in alluminio per assicurare robustezza e leggerezza, mentre i rulli passivi sono stati costruiti in silicone per aumentare l'aderenza con la superficie della camicia del dispositivo di sicurezza e garantire un contatto stabile durante la discesa.

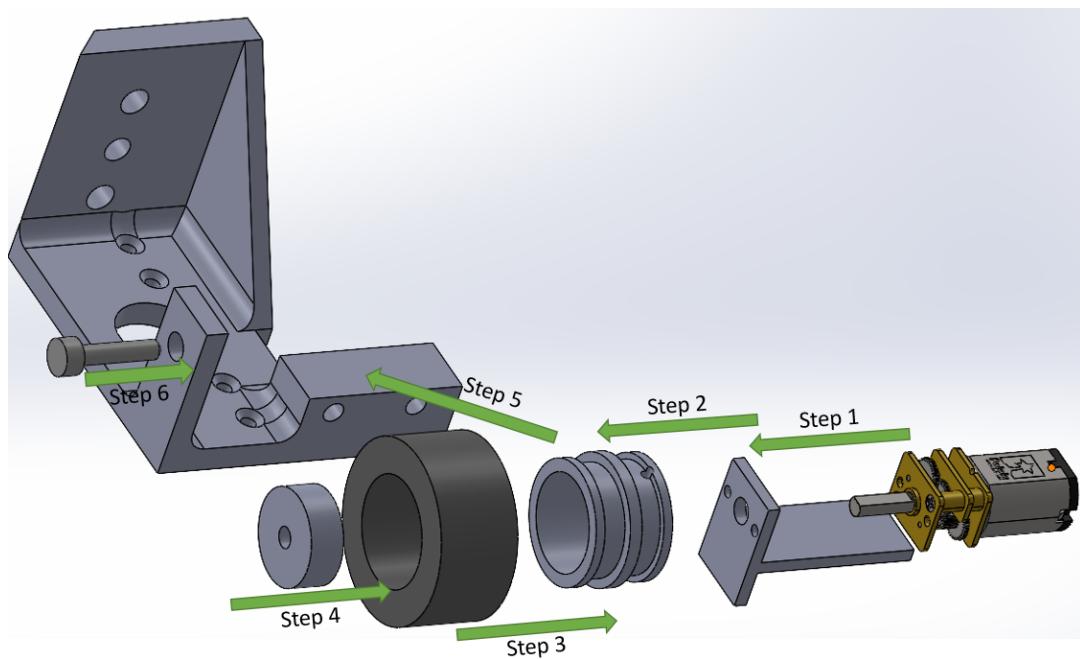
Successivamente, si è proceduto al fissaggio dei rulli nelle apposite sedi. Ogni rullo è stato alloggiato sul proprio supporto, che è stato poi ancorato alla base del sistema mediante viti a

colletto e grani di regolazione, permettendo di adattare la distanza e la pressione di contatto con il dispositivo di sicurezza.

La terza fase ha riguardato l'assemblaggio del sistema ruota-motore-base, in cui è stata individuata la soluzione meccanica ottimale per garantire solidità e semplicità di montaggio. A tale scopo è stata progettata e realizzata una boccola in alluminio con foro filettato da inserire all'interno del supporto della ruota motrice.

La procedura di montaggio prevede i seguenti passaggi:

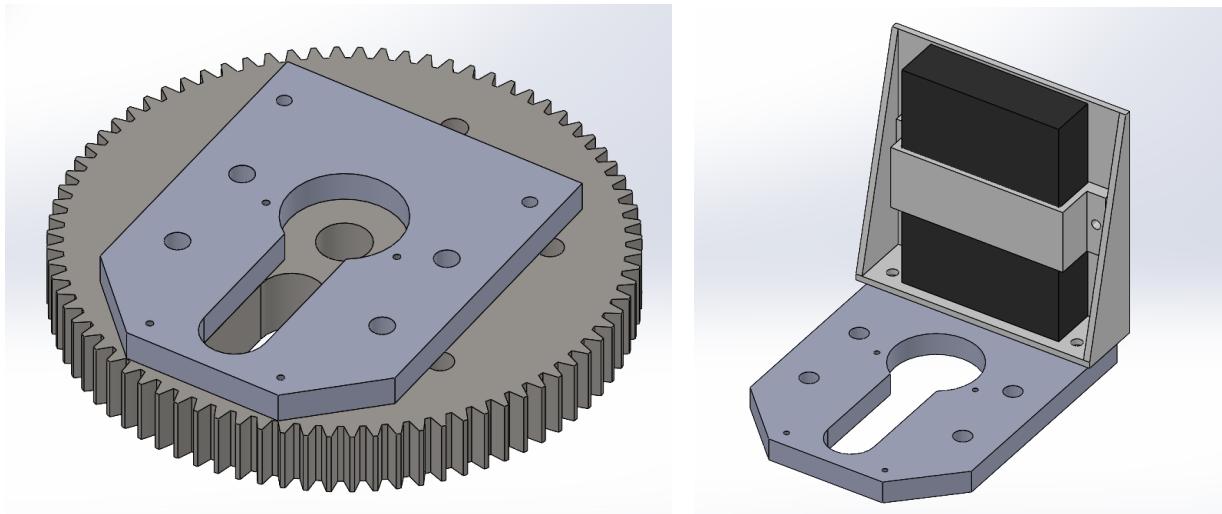
1. fissaggio del motore al suo supporto;
2. inserimento dell'albero motore nel supporto della ruota motrice e collegamento tramite spina di accoppiamento;
3. montaggio della ruota in gomma sul proprio supporto;
4. inserimento della boccola nella cavità del supporto ruota motrice;
5. fissaggio del supporto motore alla base strutturale;
6. collegamento finale tra sistema ruota motrice e base mediante una vite con rondella, che rimane libera di ruotare insieme alla ruota motrice, avvitata nel foro filettato della boccola.



*Figura 4.10: vista esplosa montaggio sistema-motore-base*

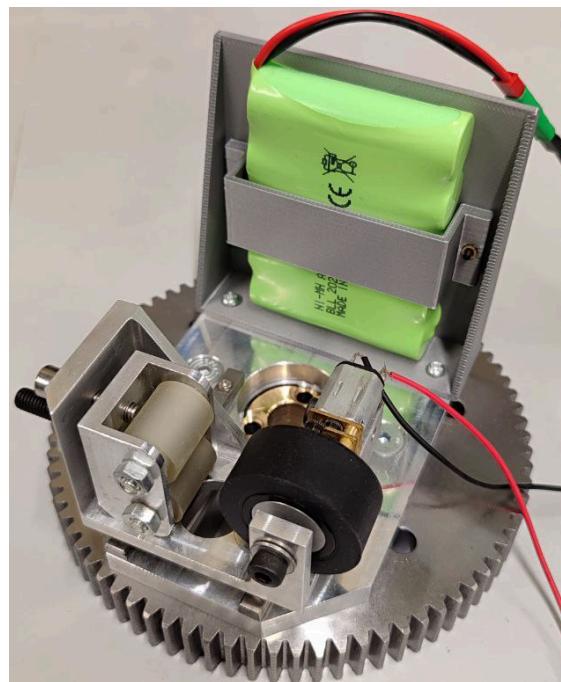
Una volta completato il montaggio del sistema, si è passati alla fase di integrazione con il robot. A tal fine, è stata progettata e realizzata una piastra di collegamento in alluminio che consente l'installazione del sistema di scorrimento direttamente sulla ruota condotta del robot.

Questa piastra funge anche da supporto per la batteria di alimentazione del motore del sistema di scorrimento, per la quale sono stati ricavati due appositi fori di fissaggio.



*Figura 4.11: modello CAD accoppiamento piastra-ruota condotta*

*Figura 4.12: modello CAD accoppiamento piastra-supporto batteria*



*Figura 4.13: sistema di scorrimento implementato sulla ruota condotta mediante piastra di collegamento*

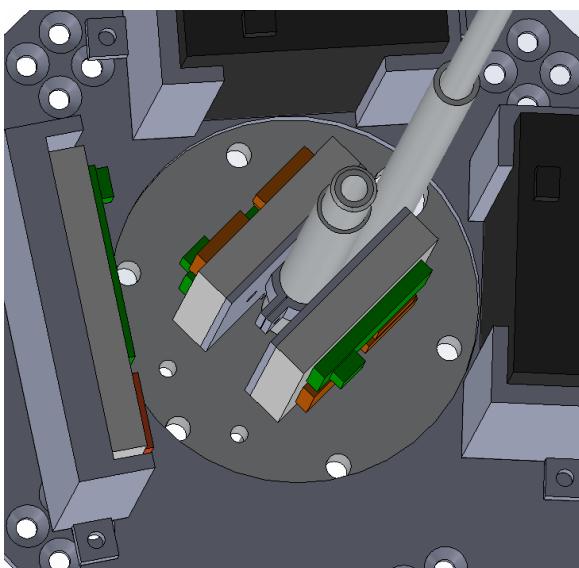
La fase finale ha riguardato l'implementazione del circuito elettronico del sistema di scorrimento.

Il circuito lato trasmettitore è stato collocato all'interno dello stesso alloggiamento che ospita la Raspberry Pi Pico del motore principale; è stata quindi utilizzata la stessa scheda, opportunamente modificata a livello software per consentire il controllo combinato di entrambi i motori (motore principale e motore del sistema di scorrimento).

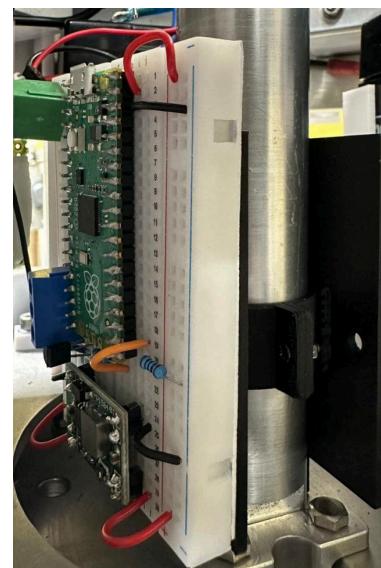
Il circuito lato ricevitore è stato invece suddiviso in tre sezioni distinte ma interconnesse, per ragioni di spazio e distribuzione dei carichi:

- La prima sezione, comprendente il motore e la batteria, è posizionata sullo stesso livello del sistema di scorrimento, direttamente sulla piastra di collegamento fissata alla ruota condotta. La batteria è alloggiata in un supporto realizzato tramite stampa 3D, appositamente disegnato per garantire un fissaggio stabile e rapido.
- La seconda e la terza sezione, contenenti il resto del circuito ricevitore (modulo IR, transistor, Raspberry Pico, buck converter e condensatore), sono installate al livello immediatamente inferiore, in corrispondenza dell'elettronica del motore principale. Queste sezioni sono connesse alla prima mediante cavi passanti attraverso i fori già presenti nella ruota condotta, opportunamente riutilizzati per evitare nuove lavorazioni.

Per il montaggio delle due sezioni elettroniche inferiori sono stati realizzati due supporti simmetrici in stampa 3D, fissati direttamente sulla colonna centrale del robot. Ogni supporto è costituito da una piccola piastra sulla quale è incollato il circuito; sul lato opposto presenta un mezzo anello con fori di serraggio, che consente di bloccare i due supporti attorno alla colonna mediante viti e dadi. In questo modo, l'intero sistema del ricevitore risulta solidale alla rotazione del corpo centrale, mantenendo il corretto allineamento con la parte trasmittente.

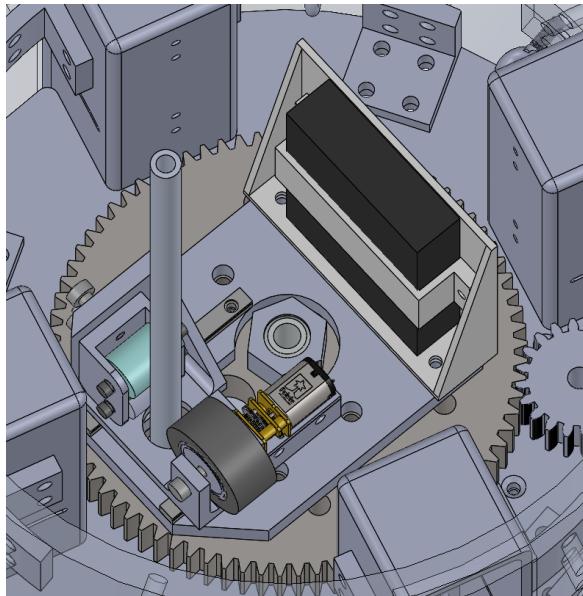


*Figura 4.14: modello CAD supporti circuito implementati*

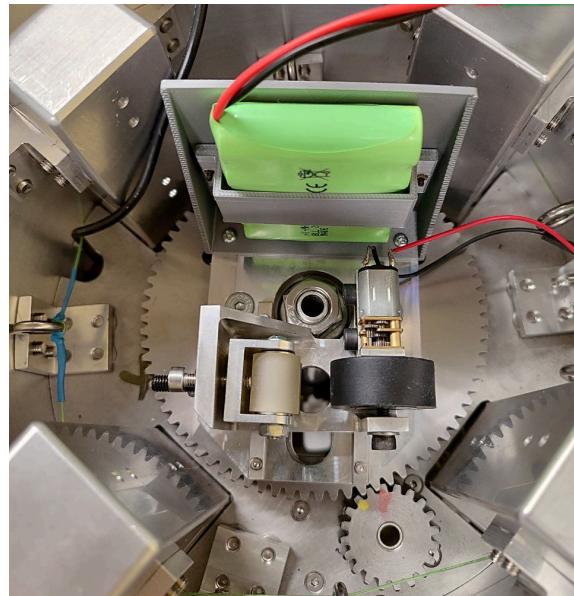


*Figura 4.15: supporti circuito implementati su prototipo*

L'intero processo di implementazione ha permesso di ottenere un sistema di scorrimento completamente funzionante, integrato sia dal punto di vista meccanico che elettronico, e pronto per le successive fasi di collaudo operativo sul prototipo robotico.



*Figura 4.16: modello CAD sistema di scorrimento implementato*



*Figura 4.17: sistema di scorrimento implementato sul prototipo*

## 4.5 Risultati ottenuti

Una volta completato il montaggio e l'integrazione del sistema di scorrimento sul prototipo robotico, è stata avviata una fase di verifica funzionale e test sperimentali con l'obiettivo di valutarne l'efficacia operativa, l'affidabilità e la compatibilità con la struttura del robot. Le prove hanno riguardato in particolare il comportamento del motore, la precisione del controllo tramite comunicazione a infrarossi e la stabilità meccanica del sistema durante il movimento della camicia del dispositivo di sicurezza.

### 1. Verifica del sistema di comunicazione

Il primo set di test ha avuto lo scopo di accertare il corretto funzionamento della comunicazione a infrarossi tra la Raspberry Pi Pico fissa e quella rotante. I risultati hanno confermato una trasmissione stabile e priva di interferenze, con tempi di risposta pressoché immediati. Il segnale di controllo inviato dal PC tramite interfaccia seriale e successivamente trasmesso via IR dal modulo trasmettitore è stato ricevuto e interpretato correttamente dalla Raspberry lato ricevitore, permettendo l'attivazione e l'arresto del motore del sistema di scorrimento con una latenza inferiore a 0,2 secondi.

## 2. Risultati meccanici e prestazioni del sistema di scorrimento

Dal punto di vista meccanico, il sistema ha dimostrato un comportamento regolare e controllato durante la discesa della camicia del dispositivo di sicurezza. La ruota motrice in gomma e i rulli passivi in silicone hanno garantito un buon coefficiente di attrito, assicurando un contatto stabile e continuo, senza fenomeni di slittamento o vibrazioni indesiderate.

Un aspetto particolarmente positivo emerso durante i test è la capacità della camicia del dispositivo di sicurezza, una volta incastrata tra ruota e rulli, di ruotare leggermente attorno a un asse perpendicolare a quello di rotazione della ruota condotta e parallelo a quello della ruota motrice.

Questo grado di libertà aggiuntivo (rotazione intorno ad X in Figura 4.17), seppur limitato ad un angolo ridotto ( $\theta$  pari a circa  $10^\circ - 15^\circ$ ), costituisce un vantaggio funzionale importante: consentirà infatti una maggiore libertà di movimento al dispositivo di sicurezza durante le future operazioni con le braccia robotiche tele-operate, facilitando la cooperazione tra i due sistemi e riducendo i vincoli geometrici durante le manovre di posizionamento.

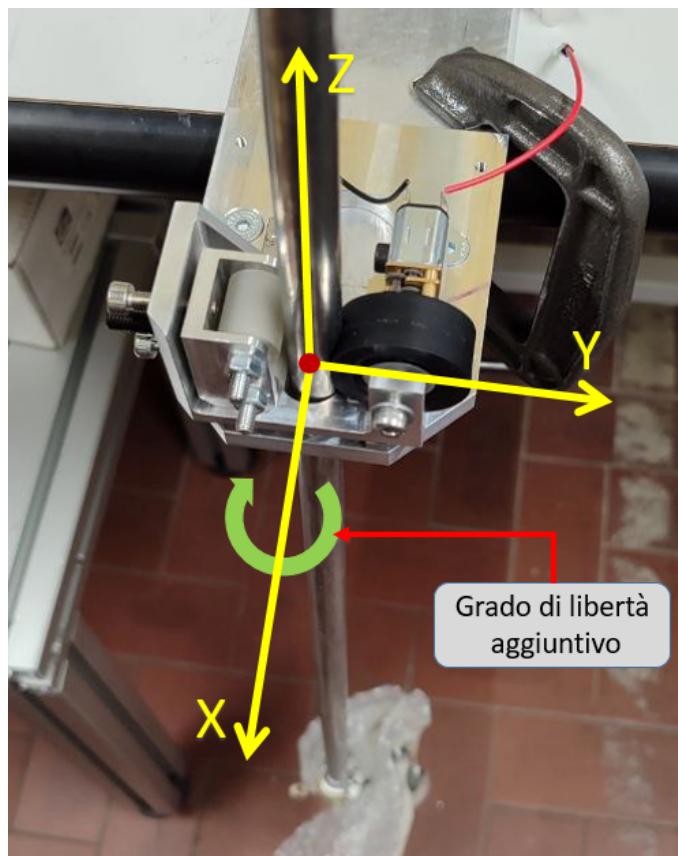


Figura 4.18: dettaglio della camicia in presa tra ruota motrice e rulli passivi

### **3. Integrazione e affidabilità del sistema**

Il sistema di scorrimento ha mostrato una buona integrazione strutturale con la ruota condotta del robot. La piastra di collegamento in alluminio ha garantito rigidità e coassialità del sistema, mentre la distribuzione dei componenti elettronici, divisi tra il livello della ruota condotta e il livello inferiore del corpo centrale, ha permesso una disposizione ordinata e facilmente ispezionabile.

Durante i test, il circuito di alimentazione e controllo ha mantenuto stabilità di tensione e temperatura, e non sono state rilevate interruzioni o cadute di segnale nel collegamento infrarosso.

Sebbene le braccia tele-operate non siano ancora state implementate sul robot, l'intero sistema è stato concepito per consentire una futura cooperazione funzionale: il controllo della discesa tramite la ruota motrice potrà essere facilmente sincronizzato con i movimenti delle braccia, che avranno il compito di guidare e stabilizzare il dispositivo di sicurezza durante le fasi di posizionamento e recupero.

### **4. Valutazione complessiva**

Complessivamente, i risultati ottenuti dimostrano che il sistema di scorrimento è pienamente funzionante e conforme agli obiettivi progettuali.

Il controllo elettronico si è rivelato affidabile, la risposta meccanica coerente con le aspettative e l'intera struttura sufficientemente robusta per sostenere l'integrazione futura con gli altri sottosistemi del robot.

Le prossime fasi di sviluppo prevedranno l'esecuzione di test combinati con le braccia tele-operate, per verificare le effettive potenzialità del sistema nel supportare la movimentazione del dispositivo di sicurezza in condizioni operative reali.

---

## CAPITOLO 5. Braccia robotiche tele-operate

Le braccia robotiche tele-operate rappresentano uno dei sottosistemi più complessi e tecnologicamente avanzati del progetto di robot di soccorso per operazioni in pozzi artesiani. Esse sono progettate per consentire la manipolazione controllata e precisa del dispositivo di sicurezza, permettendo il suo corretto posizionamento al di sotto della vittima e l'esecuzione delle successive operazioni di salvataggio.

Il concetto di partenza trae origine dal lavoro svolto presso l'Università dell'Aquila sotto la supervisione del Prof. Francesco Durante, dove è stato sviluppato un primo prototipo di braccia tele-operate per ambienti confinati. Il presente lavoro di tesi ha avuto come obiettivo la reinterpretazione e l'ottimizzazione di tali braccia, al fine di renderle compatibili con il robot sviluppato presso il Politecnico di Torino.

A partire dai modelli CAD originali forniti, sono state ridisegnate completamente sia le braccia fisiche (slave), che costituiscono gli attuatori robotici montati sul corpo del robot, sia le braccia master, destinate all'operatore umano per la tele-manipolazione. Entrambi i sistemi sono stati progettati in ambiente SolidWorks, adattandone le dimensioni e la cinematica alle esigenze operative e ai vincoli geometrici imposti dal prototipo reale.

Ogni braccio fisico (slave) è dotato di sei gradi di libertà, ciascuno azionato da un motore brushless dedicato. L'intera struttura è costituita da componenti in alluminio e parti realizzate mediante stampa 3D, così da garantire al contempo leggerezza e robustezza. La base del braccio ospita il primo sistema motore-puleggia-cinghia che riproduce il movimento della spalla, mentre i successivi giunti consentono le rotazioni del gomito e del polso, replicando la cinematica del braccio umano. L'end-effector previsto sarà una pinza di presa dedicata alla manipolazione del dispositivo di sicurezza.

Parallelamente, le braccia master sono state progettate per riprodurre la stessa cinematica del braccio fisico, ma in modo inverso: ogni articolazione del master è accoppiata ad un encoder rotativo che registra il movimento dell'operatore e lo converte in un segnale di comando inviato al corrispondente motore del braccio slave. Ogni encoder del master è quindi mappato su un motore del braccio fisico, realizzando una corrispondenza diretta tra il movimento umano e la risposta meccanica del robot.

Il sistema di controllo si basa su un'architettura master/slave completamente indipendente per ciascun asse, in cui il segnale proveniente dagli encoder AMT102V del master viene elaborato da una scheda SimpleFOC Shield v2.0.4 montata su microcontrollore Arduino UNO R3 (ATMega328), la quale gestisce direttamente il motore brushless del corrispondente asse del braccio fisico, dotato di un encoder magnetico AS5048A. Ogni braccio dispone quindi di sei schede di controllo, una per ogni grado di libertà, che operano in parallelo per garantire una risposta fluida e sincronizzata.

Dal punto di vista funzionale, il sistema consente all'operatore di indossare o manovrare direttamente il braccio master, afferrandone l'estremità terminale e muovendo le articolazioni in modo naturale. Gli encoder acquisiscono in tempo reale i movimenti e li trasmettono ai motori del braccio robotico, che ne riproducono fedelmente la posizione e la velocità, permettendo un controllo intuitivo, diretto e proporzionale.

Il lavoro di tesi ha quindi permesso di ottenere un sistema meccanicamente completo e cinematicamente coerente, capace di rappresentare la base operativa per future fasi di integrazione con il robot principale e con il dispositivo di sicurezza. L'implementazione della parte elettronica e del controllo mediante codici personalizzati in ambiente Arduino IDE consentirà di completare l'interfaccia uomo-macchina necessaria per la piena tele-operabilità.

Tutte le componenti utilizzate per la realizzazione di tale sistema sono riportate in Appendice C – Distinta componenti delle braccia tele-operate.

## 5.1 Obiettivi e requisiti funzionali delle braccia

L'obiettivo primario del sottosistema braccia è realizzare un dispositivo di manipolazione tele-operato in grado di posizionare con precisione e sicurezza il dispositivo di sicurezza all'interno del pozzo artesiano. Le braccia devono permettere all'operatore esterno di replicare i movimenti umani (tele-manipolazione) in tempo reale, riducendo il rischio per la vittima e per i soccorritori e consentendo manovre delicate in spazi fortemente confinati.

Sulla base delle esigenze operative e dei vincoli imposti dal robot e dal pozzo, sono stati definiti i seguenti requisiti funzionali e progettuali.



*Figura 5.1: lista dei requisiti funzionali e progettuali delle braccia tele-operate*

### 1. Numero di gradi di libertà

Ogni braccio deve avere sei gradi di libertà (6 DoF) per riprodurre la cinematica del braccio umano: tre assi per la spalla/gomito e tre assi per il polso, in modo da poter orientare e posizionare il dispositivo di sicurezza in tutte le configurazioni richieste.

### 2. Trasmissione del moto

Per il primo grado di libertà, relativo al movimento della “spalla”, è adottata una trasmissione a cinghia dentata (cinghia T5 con pulegge): questa soluzione consente di ottenere un’escursione lineare/traslazionale mediante il sistema puleggia–cinghia e la conseguente rotazione della puleggia primaria. Per i giunti successivi (gomito e polso) la trasmissione è realizzata tramite accoppiamenti diretti e collegamenti meccanici stampati in 3D (link e supporti).

### 3. Motorizzazione e controllo per giunto

Ogni giunto è azionato da un opportuno motore BLDC (tipi GIM3505-8 e GIM4310 selezionati in funzione del requisito di coppia). I motori non hanno encoder

integrità: sul motore dello slave è previsto un encoder magnetico AS5048A per il feed-back; sul master gli encoder AMT102V misurano la posizione dell'operatore. Il controllo di ciascun asse è affidato a una scheda SimpleFOC Shield v2.0.4 su microcontrollore ATMega328 (Arduino UNO R3), in modo da disporre di un controllo distribuito, modulare e con chiusura dell'anello in FOC dove necessario.

#### **4. Tele-operabilità diretta e mapping master→slave**

Il master legge in tempo reale gli angoli di ogni articolazione tramite encoder; i valori sono inviati al sistema di controllo che comanda il motore corrispondente dello slave. L'architettura punta a una replica proporzionale e con latenza minima dei movimenti dell'operatore.

#### **5. Vincoli geometrici e compatibilità strutturale**

Le dimensioni e gli ingombri sono state ridotte rispetto al progetto originario attraverso un ridimensionamento mirato dei link e l'impiego di materiali leggeri (alluminio per gli elementi strutturali principali e parti in PLA per i componenti stampati). Il design deve consentire l'alloggiamento delle braccia all'interno della carcassa cilindrica del robot e l'interazione con il dispositivo di scorrimento.

#### **6. Materiali e costruzione**

Strutture portanti in alluminio per favorire rigidità e dissipazione; elementi funzionali e antropomorfi (link, supporti, pulegge) realizzati in stampa 3D per rapidità di iterazione e facilità di sostituzione.

#### **7. Interfaccia di controllo e scalabilità**

Il controllo è pensato come modulare: ogni asse è indipendente a livello di elettronica e può essere tarato singolarmente; il sistema è scalabile e manutenibile; il software di controllo (caricato sulle Arduino) implementerà profili di movimento, filtri e logiche di sicurezza.

#### **8. Funzionalità estesa: imbracatura della vittima (obiettivo futuro)**

Oltre alla funzione primaria di posizionamento del dispositivo di sicurezza, il progetto prevede la possibilità, da verificare durante le fasi di integrazione, di impiegare le braccia anche per le operazioni di imbracatura della vittima (ovvero per applicare e serrare un'imbracatura o cinghia di sollevamento attorno al bambino). Tale possibilità è considerata un obiettivo operativo secondario e

potenzialmente molto utile; tuttavia la sua fattibilità dipenderà dai test di integrazione reali e dalle valutazioni su forza, precisione e sicurezza una volta le braccia saranno effettivamente montate sul robot.

### 9. Ergonomia e addestramento operatore

Il master è progettato per un utilizzo naturale: l'operatore afferra il pomello terminale e guida il movimento in modo intuitivo. Il tempo di apprendimento previsto per un operatore addestrato è contenuto, grazie alla mappatura uno-a-uno degli assi.

In sintesi, il progetto delle braccia privilegia una soluzione pratica e modulare: trasmissione a cinghia solo per la spalla per sfruttare i vantaggi di quel meccanismo nella fase di movimento lineare/rotazionale iniziale, trasmissioni dirette per i restanti giunti per semplicità e compattezza, controllo decentralizzato per ogni asse e attenzione alla futura integrazione con il sistema di scorrimento e al possibile impiego nell'imbracatura della vittima. Le verifiche definitive circa l'effettiva capacità di imbricare una persona saranno parte integrante delle attività sperimentali successive, dopo l'installazione fisica delle braccia sul prototipo.

## 5.2 Cinematica e configurazione del sistema Slave

La progettazione delle braccia robotiche tele-operate (Slave) è stata svolta integralmente in ambiente SolidWorks, a partire dai modelli CAD delle braccia sviluppate presso l'Università dell'Aquila e successivamente adattate alle esigenze operative del robot destinato al soccorso in pozzo artesiano. Il progetto meccanico è stato rivisto in ogni sua parte, con particolare attenzione alla riduzione degli ingombri, alla compatibilità con la geometria cilindrica del robot, alla leggerezza delle strutture e alla riproduzione più fedele possibile della cinematica del braccio umano.

Le braccia sono costituite ognuna da sei gradi di libertà, ottenuti mediante una combinazione di componenti strutturali in alluminio e collegamenti funzionali realizzati tramite stampa 3D. Il progetto è stato sviluppato seguendo un approccio modulare, suddividendo ciascun braccio nei tre segmenti principali: spalla, gomito e polso, ciascuno progettato per integrare il motore, l'accoppiamento meccanico e l'infrastruttura di collegamento con il resto della catena cinematica.

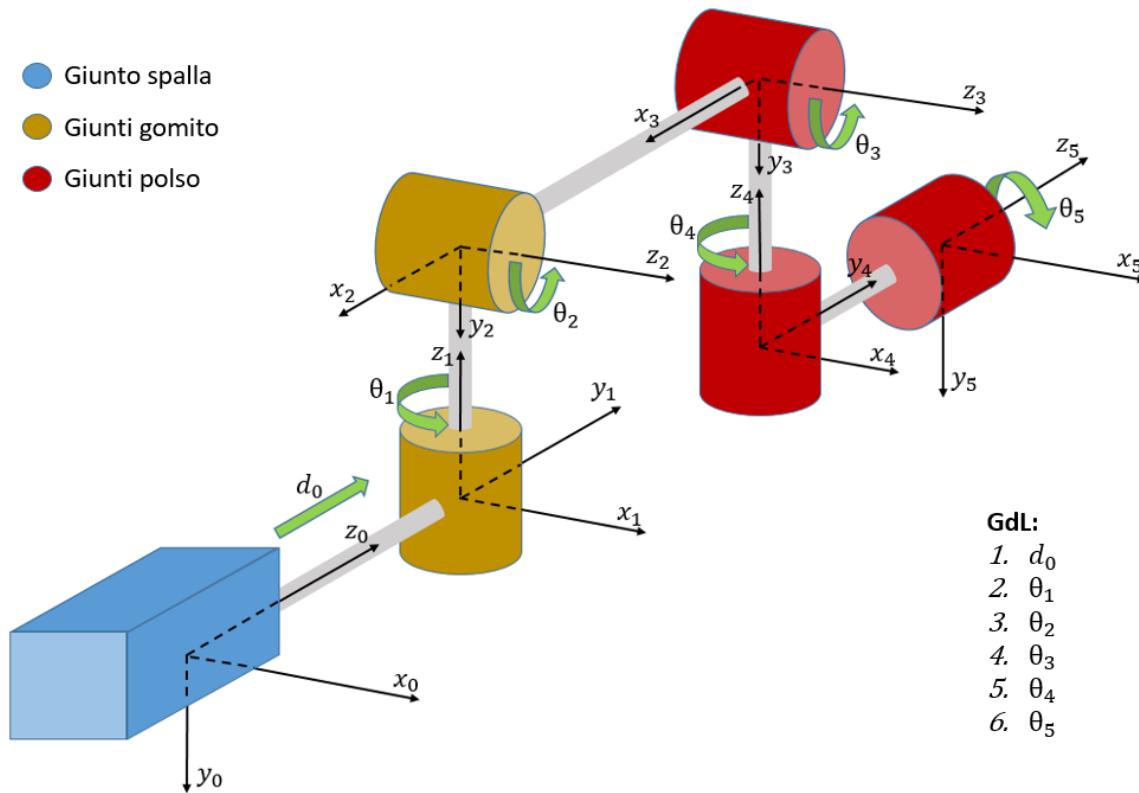


Figura 5.2: configurazione cinematica del sistema Slave/Master con convenzione di Denavit-Hartenberg

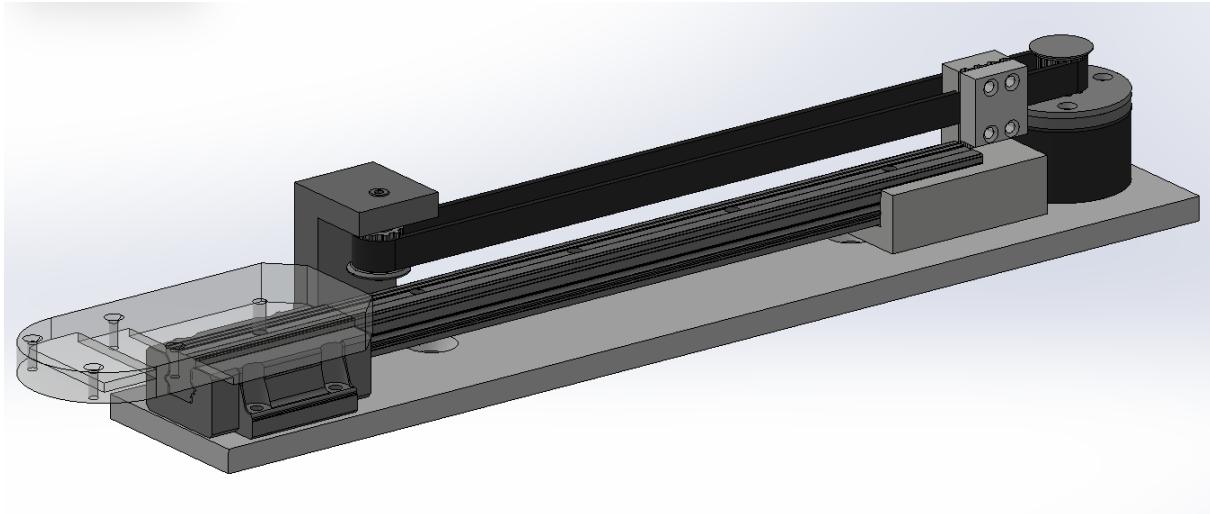
### 5.2.1 Spalla ( $1^{\circ}$ grado di libertà)

Il primo asse è progettato per generare il movimento iniziale del braccio ed è l'unico punto in cui è stata mantenuta una trasmissione a cinghia dentata, essenziale per ottenere un'escursione lineare/rotazionale compatta e precisa. La base del braccio è costituita da una piastra in alluminio che ospita:

- un motore BLDC GIM3505-8 (riduzione 8:1, 0.43 Nm, 243 RPM),
- una puleggia motrice in stampa 3D montata sull'albero motore mediante un apposito supporto,
- una puleggia condotta, anch'essa in stampa 3D, supportata da un apposito alloggiamento,
- una cinghia dentata T5 da 6 mm di larghezza e lunghezza 600 mm (versione aperta).

Il movimento della cinghia è trasferito a un sistema guida-carrello composto da una guida lineare HGR15 (lunghezza 300 mm) e da un carrello a ricircolo di sfere HGW15CC. Il carrello è collegato rigidamente alla cinghia tramite un componente stampato in 3D, permettendo al movimento lineare di tradursi nel movimento di spalla. Questo sistema consente di generare

un movimento estremamente fluido, stabile e con attrito minimo, ideale per replicare la cinematica del braccio umano.

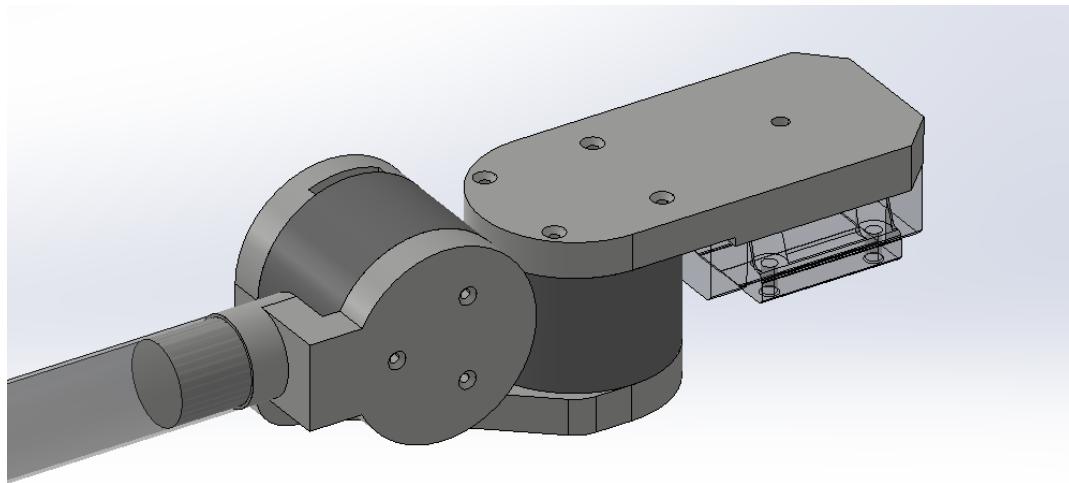


*Figura 5.3: modello CAD sistema spalla dello Slave*

#### 5.2.2 Gomito ( $2^\circ$ e $3^\circ$ grado di libertà)

Il gomito è essenziale per la mobilità del braccio robotico, fornendo due gradi di libertà (G.d.L.) cruciali. Il primo asse del gomito ( $2^\circ$  G.d.L.) è direttamente collegato al carrello della spalla tramite un link stampato in 3D ed è azionato da un motore GIM4310 (riduzione 10:1, coppia 2 Nm). Il montaggio è personalizzato per assicurare accoppiamento diretto, allineamento degli assi di rotazione e rigidità strutturale con un peso contenuto. Il secondo asse del gomito ( $3^\circ$  G.d.L.) è il giunto che permette il movimento più flessorio, fondamentale per posizionare l'end-effector nella zona operativa desiderata. Anche questo asse è controllato da un motore GIM4310, montato su supporti stampati in 3D. L'intera configurazione del gomito è stata attentamente progettata per garantire elevata compattezza e coerenza estetica/strutturale con le proporzioni di un braccio umano, ottimizzando la distribuzione delle masse per proteggere i giunti precedenti da sforzi eccessivi.

La struttura prosegue con l'Avambraccio, costituito da un tubo in alluminio anodizzato ( $\varnothing$  24 mm, spessore 0.75 mm, lunghezza 130 mm). Questo componente funge da struttura intermedia rigida e leggera, capace di resistere alle sollecitazioni. L'avambraccio è connesso al secondo giunto del gomito tramite un adattatore stampato in 3D e rappresenta il collegamento diretto con il sistema del polso.



*Figura 5.4: modello CAD sistema gomito dello Slave*

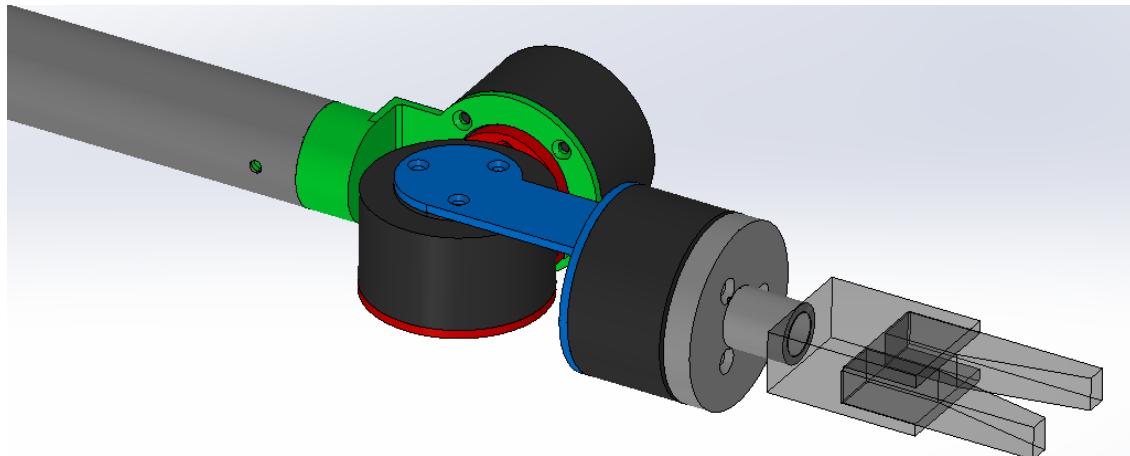
### 5.2.3 Polso ( $4^\circ$ , $5^\circ$ e $6^\circ$ grado di libertà)

Il polso è composto da tre motori GIM3505-8, ciascuno montato su supporti stampati in 3D appositamente sagomati per:

- ridurre l'ingombro complessivo,
- mantenere allineati gli assi di rotazione,
- garantire un volume di lavoro compatibile con l'ambiente ristretto del pozzo.

I tre giunti consentono all'end-effector (che in futuro sarà costituito da una pinza) di assumere qualsiasi orientamento necessario per afferrare il dispositivo di sicurezza, manipolarlo o eventualmente contribuire alla futura fase di imbracatura della vittima.

Sebbene l'End-effector finale non sia ancora stato realizzato, il sistema polso è già predisposto per l'integrazione meccanica ed elettrica di una pinza o di un altro utensile specifico per le operazioni di salvataggio.



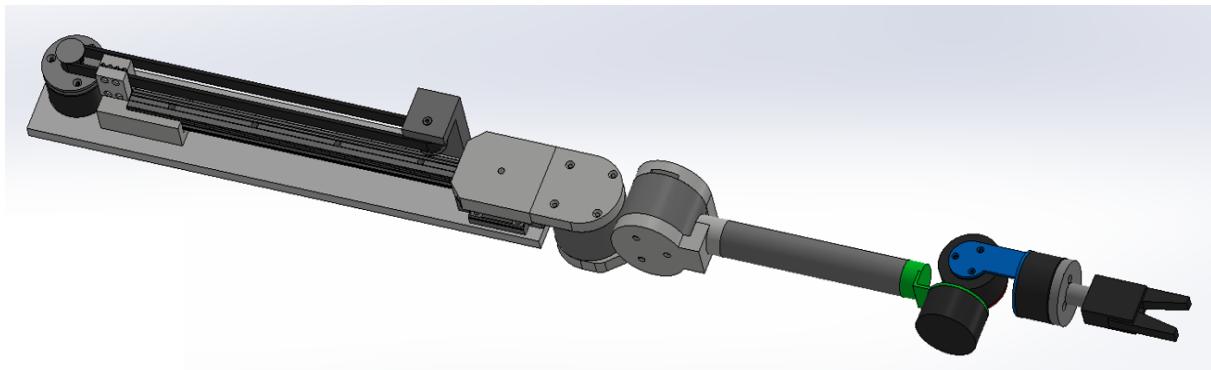
*Figura 5.5: modello CAD sistema polso dello Slave*

#### 5.2.4 Considerazioni generali sulla progettazione

L'intera struttura meccanica è stata progettata seguendo principi di:

- modularità, per facilitare manutenzione e sostituzione dei componenti,
- leggerezza, mediante l'uso estensivo di stampa 3D per tutti i link e supporti non strutturali,
- compatibilità antropomorfica, per garantire movimenti naturali e facile teleoperazione,
- riproducibilità, grazie alla standardizzazione dei componenti e all'uso di motori comuni per più giunti,
- robustezza, ottenuta grazie alla combinazione di alluminio e componenti stampati in 3D.

Le scelte progettuali hanno permesso di ottenere un braccio robotico compatto, funzionale e predisposto per la successiva integrazione con il robot principale.



*Figura 5.6: modello CAD dello Slave*

### 5.3 Cinematica e configurazione del sistema Master

La progettazione del sistema master è stata svolta parallelamente allo sviluppo delle braccia fisiche (slave), con l'obiettivo di ottenere un'interfaccia antropomorfa in grado di replicare in maniera intuitiva e fedele i movimenti del braccio dell'operatore. L'intero sistema master è stato modellato e assemblato in SolidWorks, prendendo come riferimento i principi biomeccanici del braccio umano e garantendo una corrispondenza diretta, giunto per giunto, con la catena cinematica dei sei motori dello slave.

L'approccio progettuale ha perseguito tre obiettivi principali:

1. riprodurre con accuratezza la geometria del braccio umano, così da semplificare l'apprendimento e l'utilizzo;

2. integrare un sistema di acquisizione del movimento affidabile, basato su encoder rotativi assoluti;
3. mantenere una struttura robusta ma leggera, completamente compatibile con i vincoli dimensionali del robot principale.

Il sistema master, come lo slave (vedi Figura 5.2), è articolato in tre sezioni principali ossia spalla, gomito e polso, ciascuna progettata per fornire un singolo grado di libertà e per trasferire in modo diretto il movimento dell'operatore verso il corrispondente motore del braccio fisico.

### 5.3.1 Spalla (1° grado di libertà)

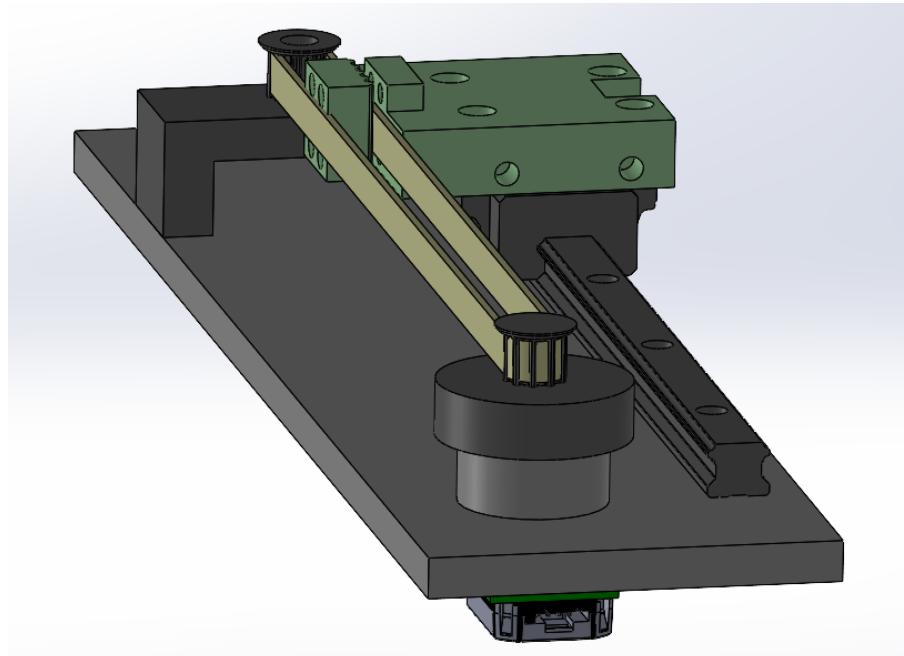
La base del master è costituita da un corpo realizzato tramite stampa 3D, che integra un cilindro cavo progettato per alloggiare una coppia di cuscinetti a sfere (17×26×5 mm). All'interno del cilindro viene inserito un albero rotante che ospita, da un lato, una puleggia stampata in 3D e, dall'altro, un alloggiamento con inserto filettato destinato al fissaggio dell'encoder assoluto AMT102V.

Il sistema riproduce fedelmente la cinematica del primo asse dello slave:

- una puleggia fissa sulla base,
- una puleggia solidale all'albero su cui è montato l'encoder,
- una cinghia dentata T5 identica a quella utilizzata sullo slave.

Il movimento dell'operatore viene trasmesso alla cinghia tramite un carrello montato su guida lineare (HGW15CC + HGR15), analogo a quello installato sulla spalla robotica fisica. In questo modo, lo scorrimento del carrello genera la rotazione dell'albero centrale, che viene misurata dall'encoder AMT102V e inviata alla corrispondente scheda di controllo del motore dello slave.

L'adozione di una trasmissione a cinghia sul primo asse del master garantisce un'elevata fluidità di movimento e al contempo permette di evitare giochi meccanici, problema critico nella tele-operazione.



*Figura 5.7: modello CAD sistema spalla del Master*

### 5.3.2 Gomito ( $2^\circ$ e $3^\circ$ grado di libertà)

I due gradi di libertà del gomito sono riprodotti tramite due moduli meccanici identici, realizzati in stampa 3D. Ogni modulo è composto da:

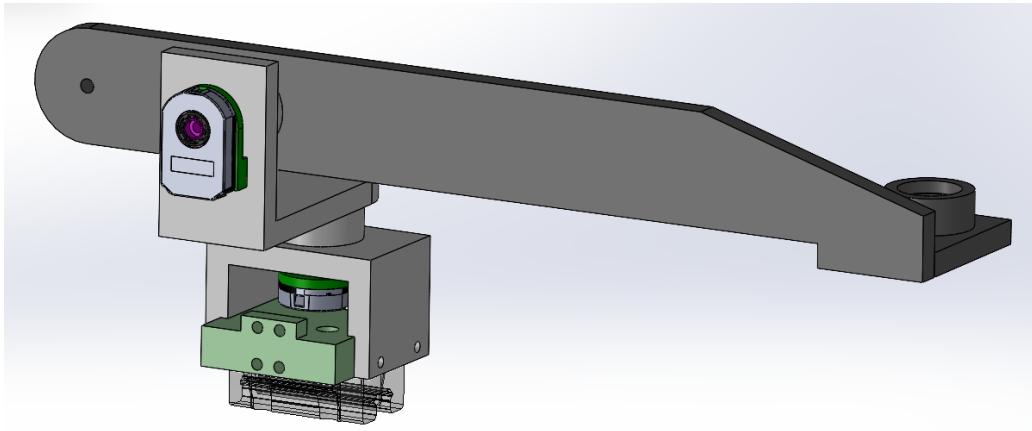
- un cilindro cavo dotato di sede per cuscinetti;
- un albero passante solidale a un inserto filettato per il montaggio dell'encoder AMT102V;
- un link di collegamento che replica la geometria antropomorfa del segmento brachiale e del segmento dell'avambraccio.

Il movimento dell'operatore viene trasmesso direttamente ai due encoder tramite la rotazione dell'albero interno di ciascun modulo, garantendo una misurazione precisa e immediata dell'angolo di ciascun asse.

La scelta di una struttura completamente stampata in 3D permette:

- di mantenere bassi peso e inerzia;
- di riprodurre fedelmente i range di movimento del braccio umano;
- di integrare con precisione i cuscinetti, gli alberi e i supporti per gli encoder.

L'intero sistema gomito è stato progettato con geometrie coerenti con quelle dello slave, così da facilitare la tele-operazione e garantire la corrispondenza diretta tra i movimenti percepiti dall'operatore e quelli eseguiti dal robot.



*Figura 5.8: modello CAD sistema gomito del Master*

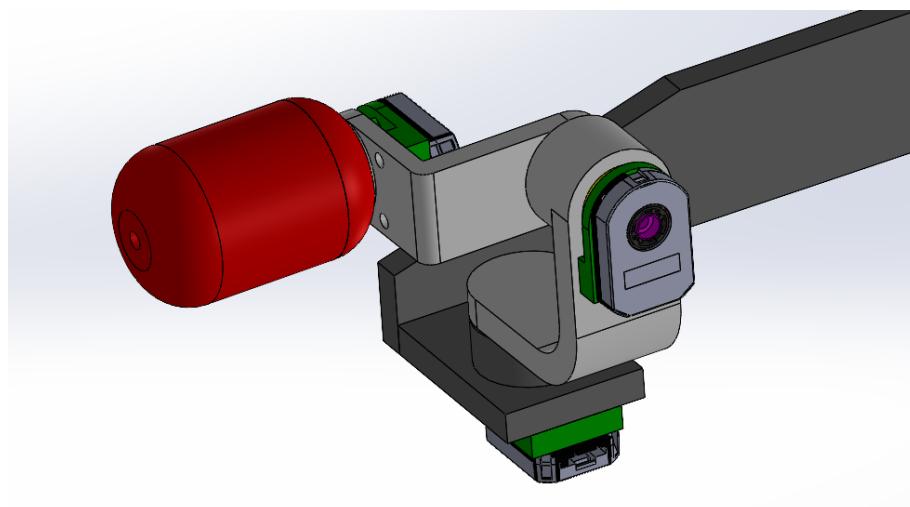
### 5.3.3 Polso ( $4^\circ$ , $5^\circ$ e $6^\circ$ grado di libertà)

La parte terminale del master replica il polso umano tramite tre moduli rotativi in serie, ciascuno realizzato con lo stesso principio costruttivo dei moduli del gomito: cilindro cavo, coppia di cuscinetti, albero rotante e supporto per l'encoder AMT102V.

Le principali caratteristiche del sistema polso sono:

- modularità delle tre unità rotative,
- compattezza dell'assieme,
- coerenza geometrica con le dimensioni dell'avambraccio umano.

L'ultimo elemento della catena è costituito da un link terminale a forma di pomello, stampato in 3D, progettato per essere comodamente impugnato dall'operatore. Questo componente svolge un doppio ruolo: permette la presa naturale e facilita la trasmissione dei movimenti di pronazione, supinazione e flessione del polso, che vengono misurati con precisione dall'encoder corrispondente.



*Figura 5.9: modello CAD sistema polso del Master*

### 5.3.4 Considerazioni generali sulla progettazione

L'intero sistema è stato progettato per garantire:

- ergonomia, grazie alla riproduzione dei volumi e delle proporzioni del braccio umano;
- precisione, assicurata dall'impiego di encoder rotativi assoluti AMT102V per tutti e sei i giunti;
- leggerezza, ottenuta dall'uso estensivo della stampa 3D;
- affidabilità meccanica, garantita dall'integrazione sistematica di cuscinetti nei giunti;
- corrispondenza esatta master–slave, fondamentale per un controllo intuitivo.

Il master rappresenta quindi una piattaforma di tele-operazione completa, robusta e naturale, perfettamente coerente con la cinematica delle braccia robotiche fisiche e predisposta per la successiva integrazione con l'elettronica di controllo basata su schede SimpleFOC.

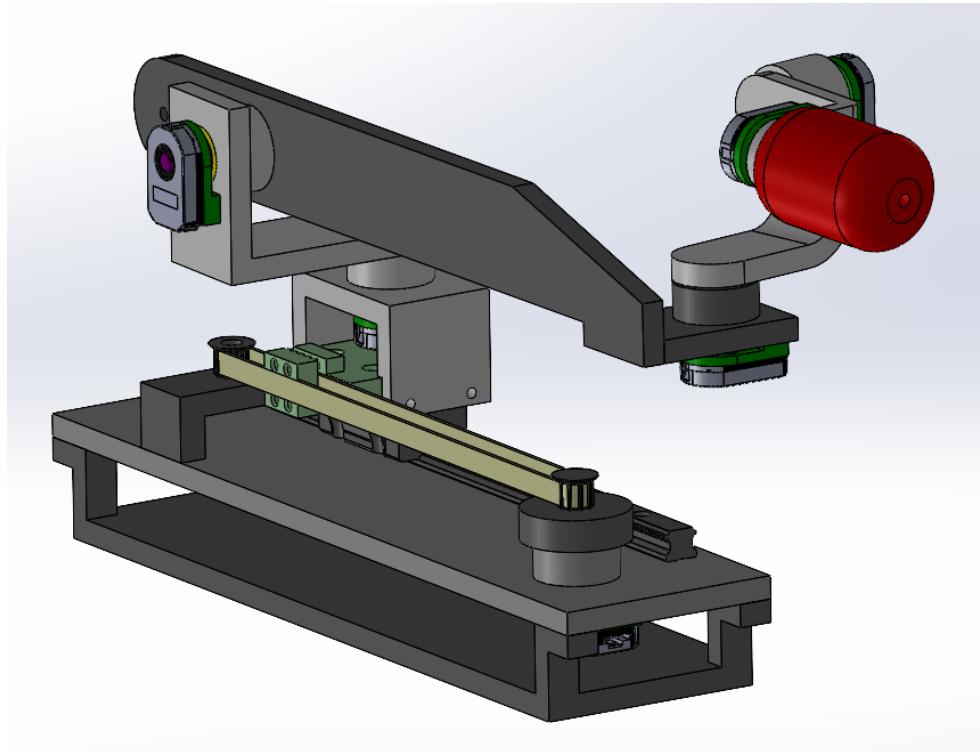
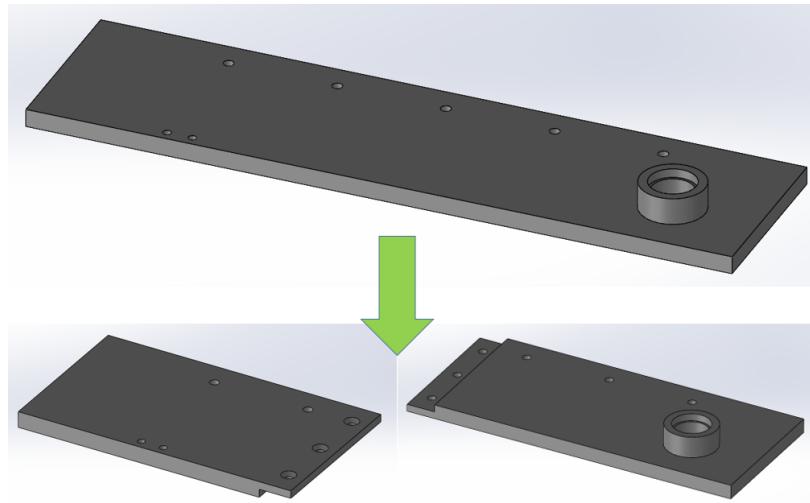


Figura 5.10: modello CAD del Master

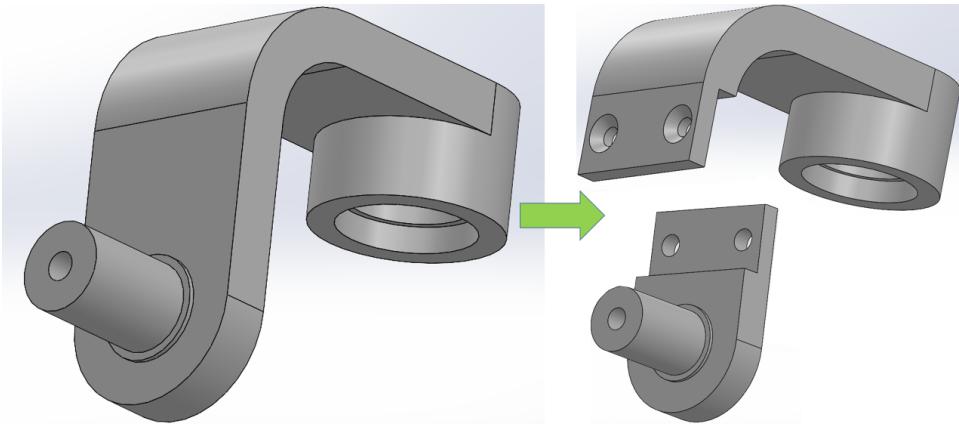
## 5.4 Realizzazione fisica e assemblaggio

La realizzazione fisica delle braccia robotiche tele-operate ha richiesto un processo di produzione complesso, che ha combinato componenti metallici, elementi stampati in 3D e dispositivi elettronici. L'impiego della stampa 3D è risultato particolarmente rilevante, poiché

molte parti presentavano geometrie articolate o dimensioni tali da superare i limiti del piatto della stampante. Per questo motivo numerosi componenti sono stati suddivisi in due o più sezioni, successivamente unite mediante l'inserimento di inserti filettati a caldo e il serraggio tramite viti. Questa strategia ha garantito robustezza, facilità di assemblaggio e possibilità di smontaggio per future modifiche.



*Figura 5.11: esempio di componente diviso per problemi dimensionali*



*Figura 5.12: esempio di componente diviso per problemi geometrici*

#### 5.4.1 Assemblaggio dello Slave

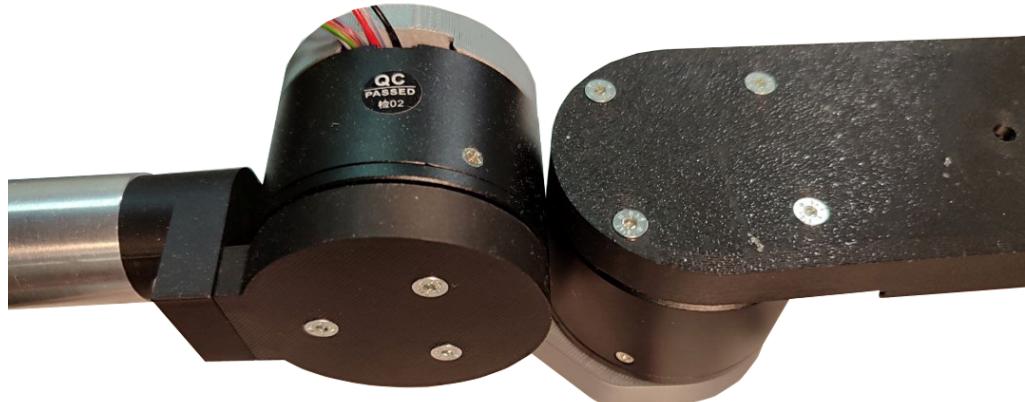
L'assemblaggio del braccio fisico (slave) è iniziato dal giunto della spalla, che è l'unico a prevedere una trasmissione a cinghia. Sulla piastra di base in alluminio sono stati montati il motore GIM3505-8 e la puleggia motrice stampata in 3D. Successivamente è stata installata la puleggia condotta sul relativo supporto e infine la cinghia dentata T5, regolata in tensione per garantire un movimento fluido e privo di slittamenti.

È stata poi assemblata la guida lineare HGR15 e il carrello HGW15CC, verificando la scorrevolezza e assicurando che l'accoppiamento con la cinghia garantisse la corretta trasmissione del movimento lungo l'asse della spalla.



*Figura 5.13: sistema fisico polso dello Slave*

Completato il primo grado di libertà, si è proceduto con i due giunti del gomito, entrambi basati su motori GIM4310. Ogni motore è stato integrato nel rispettivo supporto stampato in 3D, progettato per alloggiare in modo preciso il corpo motore e garantire la continuità cinematicamente corretta con il link successivo. I collegamenti tra i vari motori e l'avanbraccio sono stati realizzati tramite componenti stampati in 3D, rinforzati con viti e inserti filettati per migliorare la rigidità dell'insieme.



*Figura 5.14: sistema fisico gomito dello Slave*

La parte terminale del braccio, il sistema polso, è stata infine assemblata installando tre motori GIM3505-8 disposti in configurazione seriale per garantire i tre gradi di libertà rimanenti. Anche in questo caso l'accuratezza dell'accoppiamento tra le componenti stampate e i motori è stata fondamentale: l'angolo di rotazione di ciascun giunto doveva essere libero da attriti non controllati e perfettamente coassiale.



*Figura 5.15: sistema fisico polso dello Slave*

#### 5.4.2 Assemblaggio del Master

Il master è stato assemblato con una logica speculare, ma con una differenza fondamentale: tutti i giunti del master non sono motorizzati, bensì costituiti da un sistema cinematica passiva a cilindro cavo e albero, dotato di encoder AMT102V che misurano direttamente le rotazioni imposte dall'operatore.

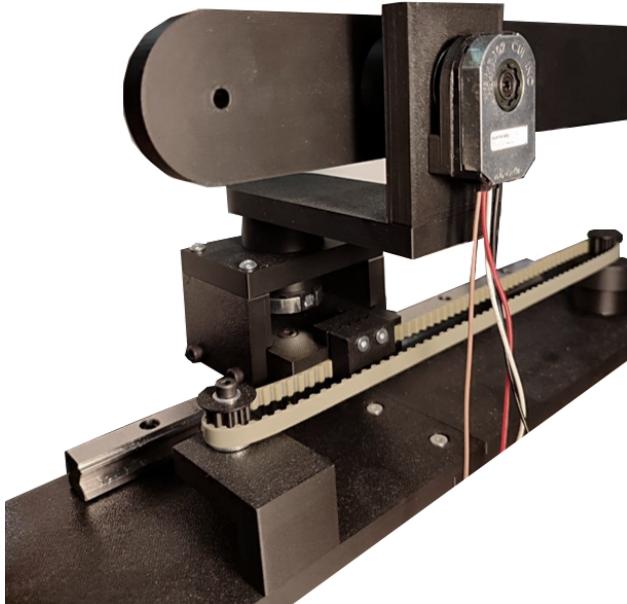
Per la spalla, il sistema a cinghia riproduce esattamente la configurazione dello slave, ma in questo caso la puleggia principale non è collegata a un motore bensì a un albero rotante, che a sua volta trasmette il movimento all'encoder montato all'estremità. È stata quindi installata la coppia di cuscinetti all'interno del cilindro cavo che ospita l'albero, garantendo bassa frizione e un movimento naturale del master.



*Figura 5.16: sistema fisico spalla del Master*

Per i giunti del gomito e del polso, ogni modulo è stato realizzato tramite due componenti stampati in 3D:

- un corpo cilindrico cavo con cuscinetti,
- un albero centrale collegato all'encoder tramite inserto filettato.



*Figura 5.17: sistema fisico gomito del Master*



*Figura 5.18: sistema fisico polso del Master*

Questi elementi sono stati progettati per riprodurre il comportamento antropomorfo del braccio umano, consentendo all'operatore di imprimere in modo naturale il movimento che viene poi acquisito dai sensori rotativi.

Anche in questo caso, diversi componenti presentavano dimensioni o geometrie complesse che hanno richiesto la divisione in più parti. Gli inserti filettati sono stati fondamentali per ottenere una struttura rigida e ben allineata, in grado di prevenire giochi indesiderati nella rotazione degli alberi.

#### 5.4.3 Montaggio dell'encoder AMT102V

Il montaggio dell'encoder AMT102V è stato una fase delicata e fondamentale per garantire un controllo accurato dei movimenti. La procedura utilizzata è stata la seguente:

##### 1. Inserimento dell'albero nel cilindro cavo

L'albero del giunto è stato fatto scorrere all'interno del corpo cilindrico cavo, precedentemente equipaggiato con i due cuscinetti. L'estremità libera dell'albero presentava un foro predisposto per alloggiare un inserto filettato, necessario per creare un accoppiamento stabile con il componente successivo.

## 2. Fissaggio del perno stampato in 3D

All'estremità dell'albero è stato installato un perno appositamente progettato e realizzato in stampa 3D.

Questo componente ha due funzioni essenziali:

- la base, con diametro pari alla ralla interna del cuscinetto, funge da *spallamento* e impedisce lo scorrimento assiale dell'albero;
- il perno cilindrico, con diametro adeguato all'accoppiamento con lo shaft adapter dell'encoder, trasmette la rotazione.

## 3. Installazione del supporto per l'encoder

Alla parte fissa del giunto (il corpo cilindrico cavo) è stato fissato un supporto stampato in 3D. Questo presenta un foro passante che consente al perno di attraversarlo e raggiungere la sede dello shaft adapter.

## 4. Fissaggio della cover dell'encoder

La cover dell'AMT102V è stata montata sul supporto, creando l'alloggiamento per l'encoder e mantenendone la posizione fissa rispetto al giunto.

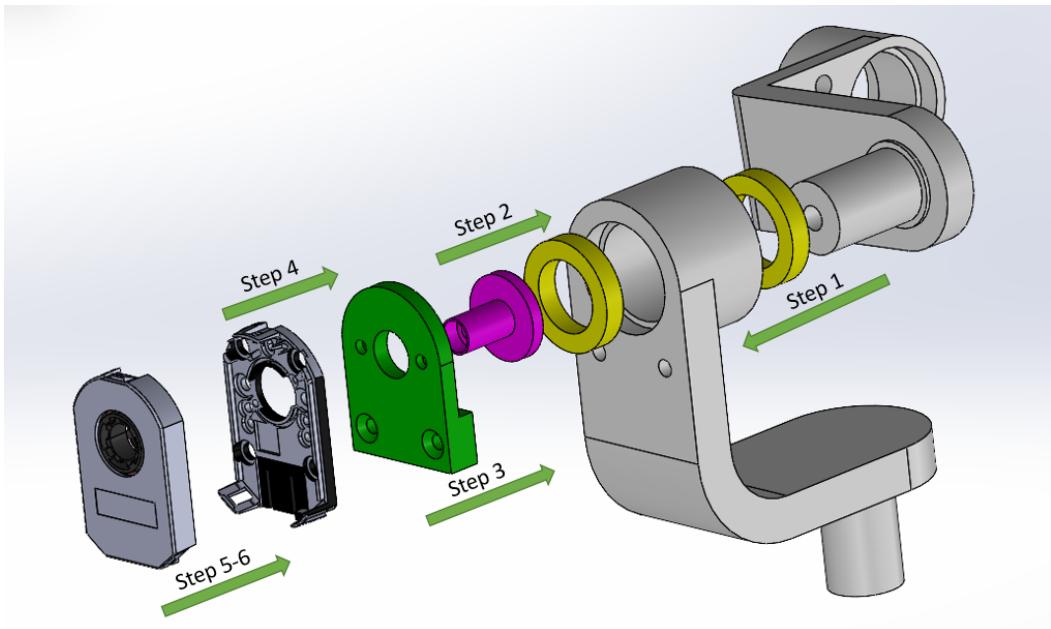
## 5. Montaggio dello shaft adapter

Lo shaft adapter fornito con l'encoder è stato installato sul perno stampato in 3D, assicurando un accoppiamento preciso e privo di giochi.

## 6. Inserimento dell'encoder nella cover

Infine, l'encoder vero e proprio è stato inserito nella cover e fissato in posizione, completando il sistema di misura.

Questa configurazione permette all'encoder di rimanere solidale alla parte fissa del giunto mentre rileva la rotazione dell'albero, garantendo un'acquisizione accurata delle posizioni articolari.



*Figura 5.19: vista esplosa montaggio dell'encoder AMT102-V*

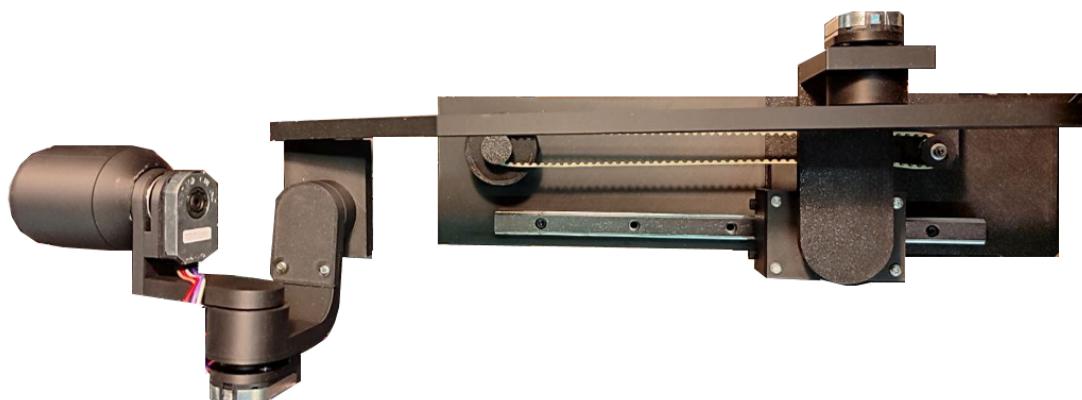
#### 5.4.4 Completamento del sistema

Una volta terminato l’assemblaggio meccanico, sono stati installati i cablaggi verso le sei schede SimpleFOC, una per ciascun giunto dello slave. Ogni scheda riceve il segnale dell’encoder corrispondente e pilotata il proprio motore, chiudendo così l’anello master–slave.

Al termine della fase di assemblaggio sono stati ottenuti due bracci completi, cinematicamente coerenti e pronti per le successive fasi di integrazione e test.



*Figura 5.20: sistema fisico Slave*



*Figura 5.21: sistema fisico Master*

## 5.5 Sistema di controllo master/slave

Il sistema di controllo master–slave costituisce l’elemento centrale dell’intero apparato manipolativo e permette la tele–operazione dei sei gradi di libertà del braccio fisico replicando i movimenti impartiti dall’operatore sul braccio master. La filosofia di progettazione adottata si basa su un’architettura completamente modulare, in cui ogni giunto è trattato come un’unità indipendente composta da: encoder del master, microcontrollore dedicato, driver FOC, motore brushless dello slave ed encoder magnetico integrato. Questa soluzione, oltre a semplificare la taratura dei singoli assi, garantisce scalabilità e facilità di manutenzione.

L’obiettivo primario è assicurare al robot la capacità di eseguire movimenti fluidi, controllati e sicuri, condizioni imprescindibili per operazioni critiche come la gestione del dispositivo di sicurezza e, in prospettiva, l’imbracatura della vittima all’interno del pozzo. L’intero sistema è stato quindi progettato per leggere, mappare e riprodurre fedelmente la cinematica del braccio umano, assicurando allo stesso tempo la robustezza tipica dei sistemi robotici.

I codici utilizzate per il controllo del sistema sono riportati in Appendice D – Codici sorgente delle braccia tele-operate.

### 5.5.1 Architettura di controllo e flusso dei segnali

Il movimento dell’operatore viene misurato attraverso encoder incrementali AMT102V/103, montati su ciascun giunto del master. La rotazione rilevata viene convertita in segnali A/B ad alta risoluzione, letti mediante interrupt dedicati dal microcontrollore (Arduino UNO R3). Ogni microcontrollore elabora la posizione del corrispondente giunto master, applica le conversioni dovute ai rapporti di trasmissione ed invia un comando di coppia al motore del braccio fisico, chiudendo così l’anello di controllo.

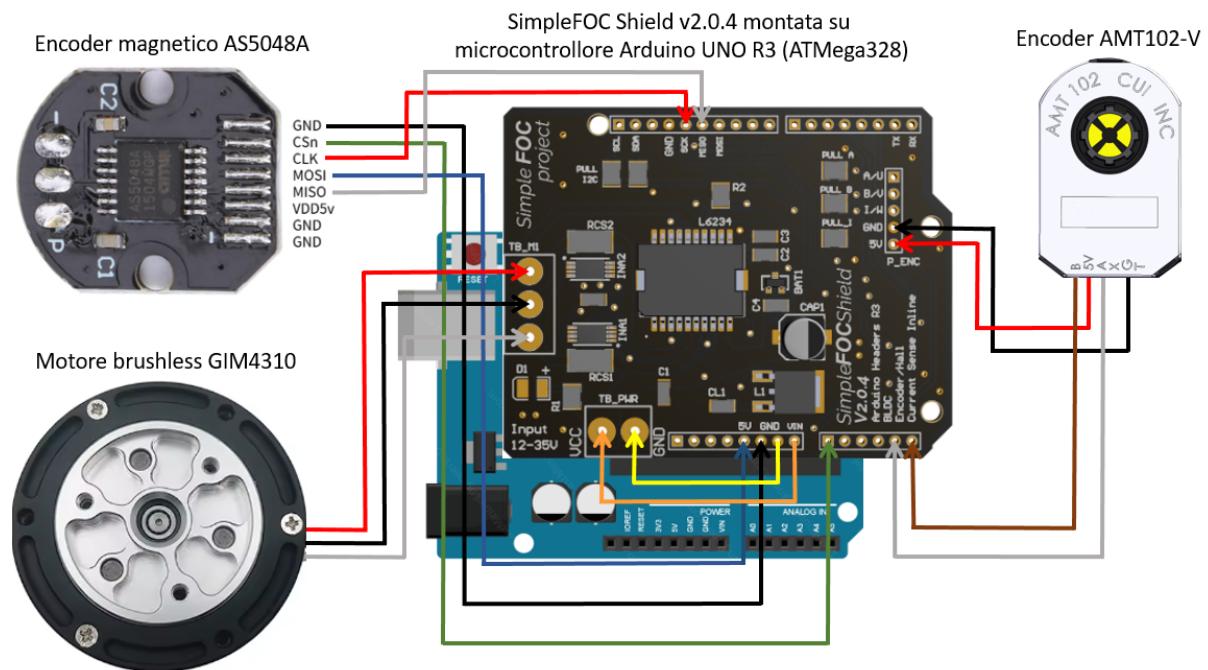
Il lato slave è composto da motori brushless GIM3505-8 e GIM4310, dotati di encoder magnetici AS5048A letti tramite SPI. Il controllo della posizione viene realizzato tramite la libreria SimpleFOC, che implementa l’algoritmo Field Oriented Control (FOC). Questa soluzione consente movimenti morbidi anche a basse velocità e garantisce sensibilità elevata in fase di manipolazione.

Il cablaggio di un giunto tipo comprende:

- motore BLDC (tre fili U/V/W) → morsetto 3 pin del driver sulla SimpleFOC Shield;

- AS5048A → connessione SPI:
    - GND → GND scheda
    - CSn → A0 (chip select)
    - CLK → SCK
    - MOSI → +5V scheda
    - MISO → MISO
  - AMT102V (encoder incrementale sul master) → impulsi A/B:
    - GND (pin G) → GND
    - +5V → +5V
    - A → A5
    - B → A4
  - alimentazione:
    - Vin della SimpleFOC Shield → fonte V (es. 12 V per d...)
    - GND comune tra tutti i dispositivi è fondamentale

Questo schema a doppio sensing (incrementale sul master, magnetico sullo slave) garantisce stabilità, precisione e la possibilità di rilevare eventuali errori o slittamenti.



*Figura 5.22: schema collegamenti del sistema di controllo*

### 5.5.2 Implementazione del controllo tramite SimpleFOC

Il controllo dei motori dei bracci robotici è interamente affidato alla libreria SimpleFOC, che implementa un controllo a orientamento di campo (FOC) in modalità torque control. Tale approccio non impone un setpoint di posizione rigido, ma applica una coppia proporzionale allo scostamento tra la posizione misurata sul master e quella attuale del motore slave, fornendo un comportamento naturale, simile a quello dei manipolatori professionali.

L'inizializzazione del sistema prevede:

- la configurazione del driver PWM e dell'alimentazione;
- la definizione dei limiti di tensione e coppia;
- l'inizializzazione del sensore magnetico AS5048A tramite SPI;
- la calibrazione del motore (`motor.initFOC()`);
- il salvataggio della posizione zero del giunto (`pos_zero`).

Un estratto della fase di setup è riportato di seguito:

```
// set motion control loop to be used
motor.controller = MotionControlType::torque;

// initialize motor
motor.init();
// align encoder and start FOC
motor.initFOC();

pos_zero=sensor.getAngle();
```

La parte centrale del controllo è invece rappresentata dalla relazione che determina la coppia da applicare:

```
motor.move(1.5*(sensor.getAngle()-pos_zero-R*encoder1.getAngle()));
```

Dove:

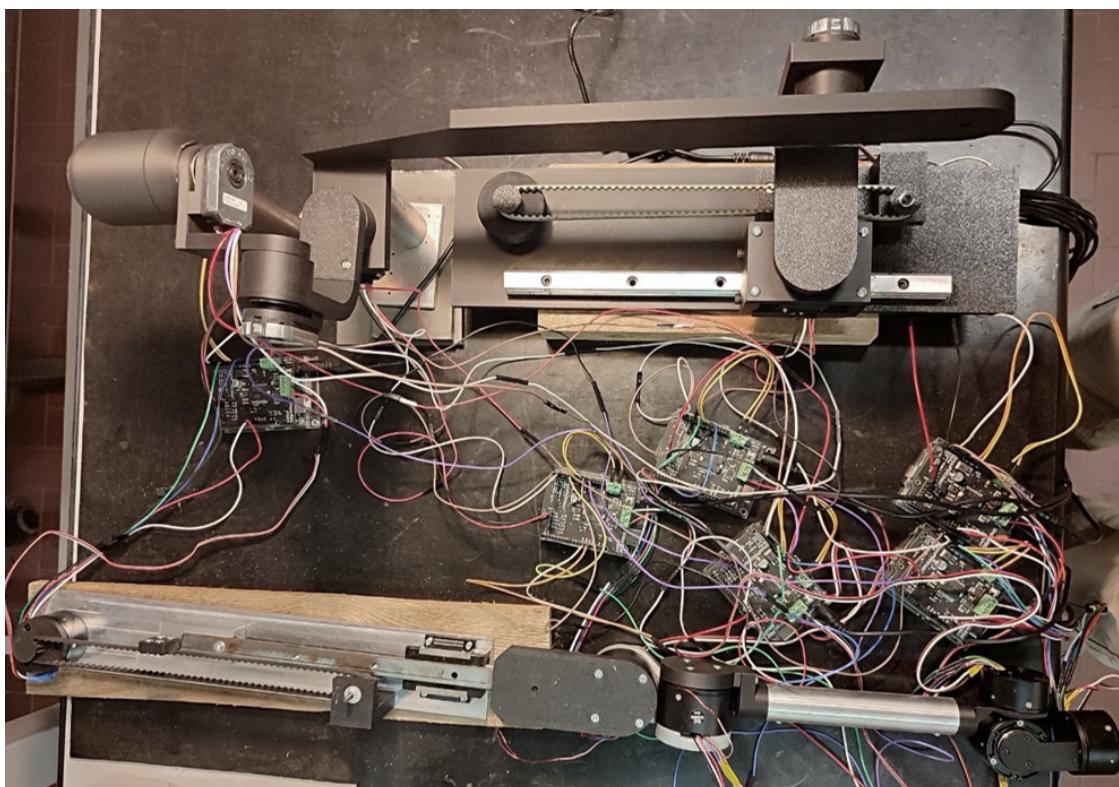
- `sensor.getAngle()` è l'angolo reale del motore slave;
- `encoder1.getAngle()` è il movimento misurato sul master;
- `R` è il rapporto di trasmissione meccanico (8 per i giunti equipaggiati con GIM3505-8, 10 per quelli con GIM4310);
- il fattore 1.5 è un guadagno determinato sperimentalmente.

Questo schema consente di ottenere un comportamento stabile e proporzionale, mantenendo una forte coerenza tra movimento master e slave.

I listati completi dei codici per i due tipi di motori sono riportati in Appendice D.

### 5.5.3 *Integrazione operativa e prospettive d'uso*

Il sistema master–slave è progettato per fornire all’operatore un controllo intuitivo e diretto dei sei gradi di libertà del braccio robotico. Durante l’uso, l’operatore afferra il pomello terminale del master e muove naturalmente il braccio, mentre i sei encoder rilevano in tempo reale le rotazioni dei singoli giunti. Ogni asse viene elaborato dal rispettivo microcontrollore, che riproduce sul braccio fisico lo stesso movimento grazie al controllo di coppia assicurato da SimpleFOC.



*Figura 5.23: sistema fisico Master/Slave di un singolo braccio*

Questa soluzione non solo consente un preciso posizionamento del dispositivo di sicurezza, ma rappresenta anche la base per future operazioni più complesse, come l’imbracatura della vittima all’interno del pozzo. Sebbene tale fase non sia stata ancora sperimentata sul prototipo, l’architettura implementata è già predisposta per manipolazioni delicate e richiede soltanto l’integrazione dell’end–effector e un’adeguata taratura.

## 5.6 Risultati ottenuti

Il lavoro svolto sulla progettazione e realizzazione delle braccia robotiche tele-operate ha permesso di sviluppare un prototipo completo sia nella sua parte meccanica sia nel sistema di

controllo master–slave. Le verifiche sperimentali condotte sui singoli sottosistemi hanno dimostrato la validità dell’approccio scelto, pur evidenziando alcuni aspetti migliorabili che sono stati chiaramente individuati e rappresenteranno il naturale sviluppo futuro del progetto.

### *5.6.1 Affidabilità del sistema Master-Slave*

Le prove funzionali effettuate sul collegamento tra i giunti del master e i corrispettivi motori dello slave hanno mostrato un comportamento stabile e reattivo. La combinazione encoder AMT102V (master) – encoder magnetico AS5048A (slave), elaborata tramite SimpleFOC, consente una riproduzione fedele del moto umano impartito dall’operatore.

In particolare è stato osservato che:

- la latenza tra movimento del master e risposta del motore è molto ridotta e difficilmente percepibile a basse velocità,
- il movimento dei giunti risulta fluido, senza fenomeni di vibrazione o instabilità,
- l’anello di controllo FOC mantiene una buona capacità di compensazione anche in presenza di piccoli disturbi meccanici.

Tali risultati confermano l’affidabilità dell’architettura master–slave e la sua idoneità a operazioni delicate come il posizionamento del dispositivo di sicurezza e, in prospettiva, l’interazione con un’imbracatura per la vittima.

### *5.6.2 Prestazioni meccaniche del prototipo*

Dal punto di vista strutturale, le braccia fisiche si sono dimostrate sufficientemente robuste per un prototipo avanzato:

- i collegamenti stampati in 3D con inserti filettati sono risultati funzionali e affidabili,
- la rigidezza complessiva dei link principali è adeguata alle coppie generate dai motori,
- i giunti motorizzati, in particolare quelli del gomito basati sui GIM4310, garantiscono una coppia sufficiente e non evidenziano fenomeni di surriscaldamento significativo,
- il sistema a trasmissione lineare della spalla riproduce fedelmente il comportamento progettato.

Tuttavia, le prove hanno anche evidenziato alcune possibilità di miglioramento. In particolare, i link del polso, essendo più sottili e realizzati in PLA, risultano più flessibili e

delicati rispetto agli altri segmenti. Una futura realizzazione in alluminio aumenterebbe significativamente la rigidezza strutturale del polso, migliorando sia la precisione del movimento sia la durata del braccio in condizioni operative reali.

#### *5.6.3 Potenziale miglioramento del sistema di controllo*

Un limite intrinseco del sistema nella versione attuale è l'assenza di attuazione attiva sul master: i movimenti sono completamente passivi e generati dall'operatore. Sebbene questo approccio funzioni bene per la fase di sviluppo e test, l'integrazione di motori e resistenze attive nei giunti del master aprirebbe la strada a diversi vantaggi:

- generazione di forze di ritorno (haptic feedback), utile per fornire all'operatore percezione tattile;
- implementazione di schemi di controllo più avanzati, come il controllo in impedenza o in ammittanza;
- maggiore coerenza dinamica tra master e slave;
- possibilità di compensare parte del peso del master per migliorare l'ergonomia dell'operatore.

Questo upgrade rappresenta uno degli sviluppi più promettenti per migliorare drasticamente l'esperienza d'uso e la precisione operativa.

#### *5.6.4 Valutazione complessiva e prospettive future*

Nel complesso, la realizzazione delle braccia tele-operate può considerarsi un risultato di notevole successo:

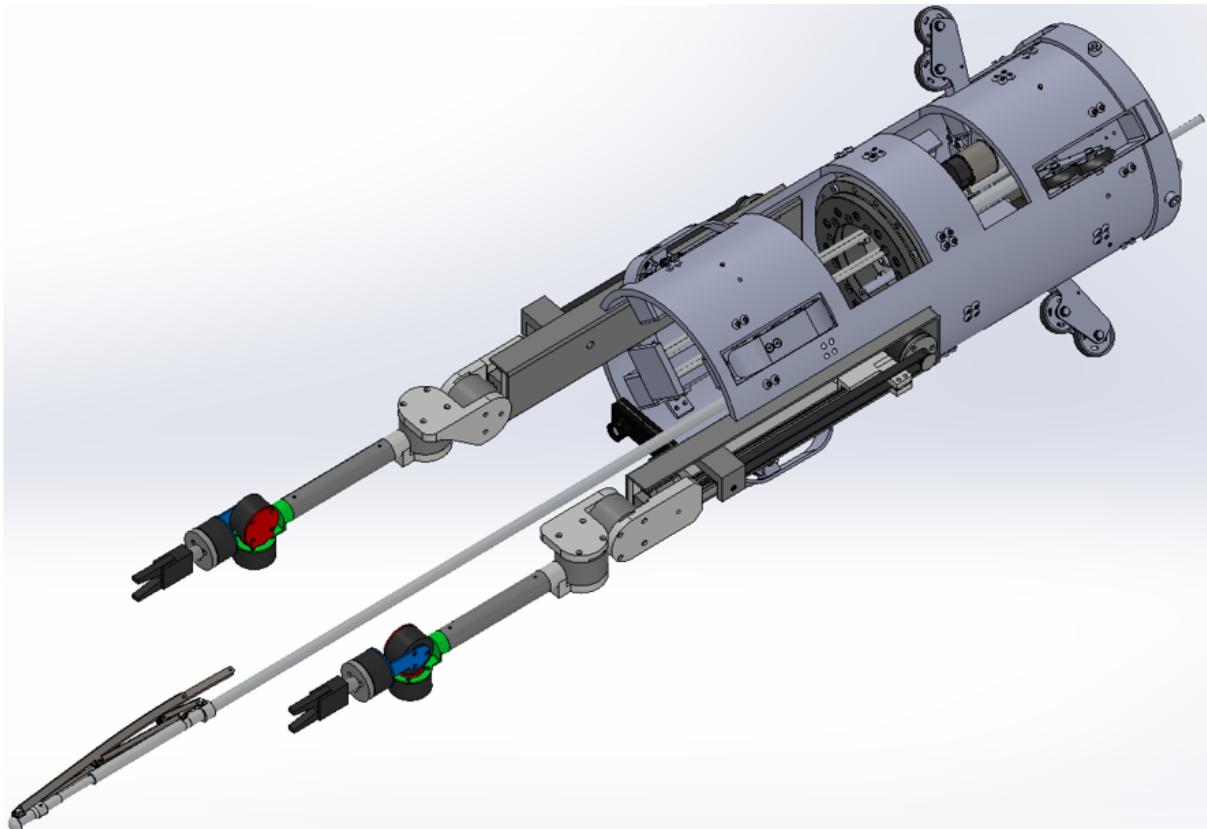
- la meccanica è stata completamente progettata, assemblata e verificata;
- il sistema di controllo risponde in modo coerente e ripetibile;
- il comportamento cinematico è naturale e permette movimenti complessi;
- l'integrazione elettronica con sei schede SimpleFOC si è dimostrata affidabile e stabile nel tempo.

Gli aspetti di miglioramento identificati, in particolare la realizzazione in alluminio dei link del polso e l'introduzione di attuazione attiva nel master, offrono una direzione chiara per le prossime iterazioni progettuali.

In prospettiva, una volta completata l'integrazione delle braccia sul robot, sarà possibile valutarne il comportamento in ambiente operativo simulato, valutare il loro contributo nel

posizionamento del dispositivo di sicurezza e, soprattutto, verificare la loro potenziale capacità di supportare l'applicazione di un'imbracatura alla vittima nel pozzo.

Questi risultati, insieme alle possibilità di sviluppo individuate, confermano che le braccia tele-operate rappresentano un elemento fondamentale e promettente del sistema robotico complessivo.



*Figura 5.24: modello CAD design definitivo del robot*

---

## CAPITOLO 6. Conclusioni e sviluppi futuri

La presente tesi ha affrontato la progettazione, la realizzazione e l'integrazione di diversi sottosistemi avanzati all'interno del prototipo di robot destinato alle operazioni di soccorso in pozzi artesiani. Il lavoro ha richiesto un approccio multidisciplinare, comprendente aspetti di progettazione meccanica, elettronica, controllo, prototipazione e teleoperazione. In questo capitolo vengono riassunti i principali risultati ottenuti e vengono discusse le prospettive di sviluppo futuro, evidenziando come il lavoro svolto rappresenti una tappa significativa verso la realizzazione di un sistema robotico completo, affidabile e utilizzabile in scenari reali di emergenza.

### 6.1 Risultati raggiunti

Il percorso di sviluppo del robot si è articolato attraverso una serie di attività consecutive e strettamente connesse, che hanno portato il prototipo a un livello di maturità superiore rispetto allo stato iniziale.

Una prima fase ha riguardato la migliorazione della struttura meccanica esistente, con particolare attenzione ai sistemi elastici delle ruote e dei pattini, che sono stati irrigiditi per aumentare la robustezza dell'assetto. Questo intervento si è rivelato fondamentale per evitare fenomeni di impuntamento.

Successivamente è stato progettato un ambiente di test completo, costituito da una struttura in profilati di alluminio 45×45 mm alta 4 m, con base da 80×80 cm e dotata di paranco superiore. Nel tubo in plexiglass da 30 cm di diametro viene posizionato un manichino antropomorfo da crash test, selezionato per rappresentare un bambino di tre anni al novantesimo percentile. Pur non essendo ancora realizzato fisicamente, questo ambiente fornisce le linee guida ingegneristiche per future prove sperimentali in condizioni realistiche e controllate.

Il passo successivo ha riguardato il sistema di scorrimento, concepito inizialmente come evoluzione del concept proposto da Astuti. Tale sistema è stato ottimizzato, realizzato e integrato nel prototipo mediante una piastra dedicata. È stato inoltre sviluppato un circuito completo di comunicazione a infrarossi che permette la trasmissione del comando di attivazione del motore dal corpo fisso a quello rotante del robot. I test hanno evidenziato un funzionamento stabile e affidabile, mostrando sia la capacità di generare un'adeguata forza

d'attrito sia la possibilità per la camicia del dispositivo di sicurezza di ruotare leggermente attorno a un asse secondario, caratteristica utile per la futura cooperazione con le braccia robotiche.

Infine, è stato affrontato uno dei contributi più significativi di questa tesi: la progettazione e realizzazione delle braccia robotiche tele-operate. Le braccia slave, a sei gradi di libertà ciascuna, sono state interamente modellate in SolidWorks e costruite mediante una combinazione di componenti in alluminio e parti stampate in 3D. Parallelamente sono stati progettati i sistemi master, dotati di encoder incrementali AMT102V e di una cinematica ispirata al braccio umano. L'intero sistema master–slave è stato integrato con motori brushless controllati tramite schede SimpleFOC, con un'architettura che permette la replica in tempo reale del movimento impartito dall'operatore. Le prove preliminari hanno confermato la validità dell'approccio sia sul piano meccanico sia su quello del controllo.

Nel complesso, i risultati ottenuti consolidano la piattaforma robotica e costituiscono un importante passo avanti verso un sistema funzionale in grado di operare in pozzi artesiani in condizioni di sicurezza.

## 6.2 Prospettive di miglioramento e applicazioni future

Nonostante i progressi significativi raggiunti, il robot presenta ancora margini di sviluppo che rappresentano opportunità concrete per la prosecuzione del progetto.

Un primo ambito di intervento riguarda il sistema di scorrimento, per il quale potrebbe essere valutata l'introduzione di un doppio sistema rulli in silicone + ruota in gomma, con l'obiettivo di aumentare la capacità di presa, la stabilità del contatto e la ridondanza meccanica. Questa soluzione migliorerebbe la precisione di discesa controllata e la resistenza a eventuali perturbazioni.

Un ulteriore asse di sviluppo riguarda il sistema master–slave. L'introduzione di motori anche sui giunti del master renderebbe possibile l'implementazione di feedback aptico, consentendo all'operatore di percepire le resistenze incontrate dal braccio fisico e migliorando notevolmente la sensibilità e la sicurezza delle manovre.

Rimane inoltre fondamentale completare la realizzazione dell'ambiente di test, così da poter eseguire un'ampia campagna sperimentale integrata comprendente discesa controllata,

posizionamento radiale, interazione con il manichino antropomorfo, prove in spazi ristretti e test di coordinazione con il sistema master–slave.

Un altro elemento essenziale per il miglioramento delle capacità sensoriali del robot è l'implementazione del piatto sensori, progettato ma non ancora installato, che permetterà di acquisire informazioni critiche durante le fasi di discesa, posizionamento e monitoraggio della vittima.

La particolare geometria della colonna centrale del robot, cava al suo interno, apre inoltre la possibilità di sviluppare un sistema di erogazione di ossigeno o aria calda utile per supportare la vittima prima dell'estrazione, contribuendo a stabilizzare le condizioni ambientali all'interno del pozzo.

Infine, un'evoluzione rilevante riguarda la possibile sostituzione dell'attuale dispositivo di sicurezza ad arpionismo con un nuovo sistema a funzionamento pneumatico, basato su un dispositivo espandibile gonfiabile che verrebbe attivato al di sotto del bambino mediante aria compressa. Sebbene tale soluzione sia attualmente in fase di studio da parte di altri gruppi di lavoro, essa rappresenta una potenziale svolta in termini di sicurezza e rapidità di intervento e potrà integrarsi efficacemente con il sistema robotico sviluppato in questa tesi.

Nel complesso, le prospettive future delineano un percorso di sviluppo ampio e articolato, che potrà trasformare l'attuale prototipo in uno strumento operativo completo, versatile e altamente efficace nelle operazioni di soccorso in pozzi artesiani.

---

## Bibliografia

- [1] Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA). "Severità Idrica". In: *ISPRA - Previsioni Meteo e Idrogeologiche*. [Online]. Disponibile su: [https://www.isprambiente.gov.it/pre\\_meteo/idro/SeverIdrica.html](https://www.isprambiente.gov.it/pre_meteo/idro/SeverIdrica.html)
- [2] Cantisani, G. (2024, 25 aprile). *Come funzionano i pozzi, come si costruiscono e quali sono le principali tipologie*. Geopop. [Online]. Disponibile su: <https://www.geopop.it/come-funzionano-i-pozzi-come-si-costruiscono-e-quale-sono-le-principali-tipologie/>
- [3] Shanmuganathan, H., Deepak, D. M., Choudhury, A., Priyadarshini, M., Mayura, B. S., & Reddy, K. Y. (2024). *An investigation of the intelligent and secure child rescue system from borewell*. In *Proceedings of the 11th International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACOM 2024)*.
- [4] Drilcorp Ltd. (2023, 1 ottobre). *Artesian well | Drilcorp A-Z*. [Online]. Disponibile su: <https://www.drilcorp.com/artesian-well-drilcorp-z/>
- [5] Redazione Geografia. (2023, 22 marzo). *Città e acqua*. DLive Geografia. [Online]. Disponibile su: <https://blog.geografia.deascuola.it/articoli/citta-e-acqua>
- [6] Rai Teche. (2021, 13 giugno). *13 giugno 1981. La tragedia di Vermicino*. [Online]. Disponibile su: <https://www.teche.rai.it/2021/06/13-giugno-1981-la-tragedia-vermicino/>
- [7] Astuti, S. (2024). *Robot mobile per operazioni di soccorso in pozzi artesiani* [Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino].
- [8] Sridhar, K. P., Hema, C. R., & Deepa, S. (2017). *Design of a Wireless Sensor Fusion System to Analyze Conditions Inside Bore Wells*. In *Wireless Personal Communications*, 94, 1951–1962.
- [9] Tumram, N. K. (2020). *Fatal Accidents of Children Falling into Abandoned Borewells: An 11-Year Review of Data and Literature*. In *Arab Journal of Forensic Sciences & Forensic Medicine*.
- [10] Gill, M. (2019). *Explained: How Borewell Rescues Are Attempted, Why They Often Fail*. In *India Times*.
- [11] Wang, C., Sun, X., Zhang, Z., & Zou, J. (2011). *Virtual Prototype Realization and Simulation for Small-Caliber Deep Well Rescue Robot*. In *Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*.

- [12] Sakhale, C., Mate, D., Saha, S., Dharmpal, T., Kar, P., Sarkar, A., Choudhury, R., & Kumar, S. (2020). *An Approach to Design of Child Saver Machine for Child Trapped in Borehole*.
- [13] Raj, M., Chakraborty, P., & Nandi, G. C. (2013). *Rescue Robotics in Bore Well Environment*.
- [14] Nithin, G., Gowtham, G., Venkatachalam, G., & Narayanan, S. (2014). *Design and Simulation of Bore Well Rescue Robot - Advanced*. In *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*.
- [15] Pattery, J. J., Kalavakonda, N., Kurian, J. V., Mohan, L., & Jacob, J. (2015). *Design and Development of a Borewell Rescue Robot*. In *14th IFToMM World Congress*.
- [16] Simon, S., Jose, M., Gogy, M. J., Vismaya, K. D., & Mukundan, S. (2016). *Borewell Rescue Robot*. In *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*.
- [17] Teja, M. S., Sreenivas, P. V. K., Kumar, N. S. V. S. A., & Kumar, M. V. S. R. (2018). *Design and Fabrication of Mechanical Device for Lifting Child from Bore Well*. In *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*.
- [18] Shenai, A., Soman, D., Antin, A., & Pallvai, R. (2018). *Development of In-Pipe Robot for Assisting Borewell Rescue Operations*. In *IEEE Third International Conference on Circuits, Control, Communication and Computing*.
- [19] Akash, B., Kanisha, K., Jayakumar, M., & Ranjan, S. (2019). *Design and Development of Robot for Rescue Operations for Bore-Well Victims*.
- [20] Murugan, K. H. S., Vijithra, A. J., Padmavathi, B., Jacintha, V., & Sumathi, K. (2020). *A Novel Rescuebot for Borehole Accidents*.
- [21] Varghese, S. K., Joseph, T., Varughese, S. A., Anil, L., & Zacharia, R. C. (2020). *Pangolin - Animatronic Based Robotic Hand System for Human Rescue in Deep Mine Hole and Bore Well Accidents*.
- [22] Jebakumari, S. C., Babu, B., & Atlas, L. G. (2020). *A Rescue Mechanism for Borehole Accidents Using Snake Bots*. In *Journal of Critical Reviews*.
- [23] Raj, L. D. W., Abinaya, R., Brundha, A., Lakshmi, N. D., & Geethapriya, S. (2020). *Robotic Arm for Extricate Operation in Bore well*.
- [24] Kaimal, A. N., B. P. B., Baiju, M. C., & M. S. K. S. (2020). *Borewell Child Rescue System*. In *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*.
- [25] Chaher, M., Jathar, M., & Bhor, P. (2020). *SMART BOREWELL RESCUE ROBOT*. In *International Engineering Research Journal (IERJ)*.

## Bibliografia

---

- [26] Rao, A. K., Harikrishna, K., Jayendran, R., Meenatchi, L. S., Jayandan, J. S., Kumar, P. N., & Saimothish, R. (2021). *Conceptual model for improving maneuverability in borewell rescue devices*. In *9th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM 2021)*.
- [27] Dhiyaneswaran, J., Senthil Kumar, S., Mohan, A., Carmichael, M. J., Mohan, A., Manjunath, T. C., Upadhyaya, M., & Jothiprakash, V. M. (2021). *Design and development of rescue robot in borewell environment*. In *Elsevier Journal*.
- [28] Sriramireddy, K., Satyanarayana, D., & Sreerama Krishna, G. S. (2021). *Theoretical and Practical Analysis on Borewell Rescue Device Using Inspection, Holding and Supporting Mechanism*. In *Journal of Contemporary Issues in Business and Government*.
- [29] Malathy, S., Jaipriya, M., Thenmozhi, M., & Priyanka, M. (2022). *Wireless Controlled Hand Gesture Based Bore Well Victims Rescue Robot with Video Streamin*. In *NeuroQuantology*.
- [30] Reina, D. (2023). *Progettazione e simulazione di sistemi per la messa in sicurezza di bambini caduti in pozzi*.

---

## Appendice A – Distinta componenti del sistema di scorrimento

### A.1 – Componenti commerciali sistema di scorrimento

Denominazione componente	Produttore/marca	Codice Prodotto (Part Number)	Quantità
1000:1 Micro Metal Gearmotor HP 6V	Pololu	1595	1
Solarbotics RW2i Wheel (internal set screw)	Pololu / Solarbotics	1127	1
Scheda Microcontrollore	Raspberry Pi Foundation	Raspberry Pi Pico	2
Modulo TX/RX 433 MHz RF Wireless	WayinTop	WYTP63	1
Batteria a litio ricaricabile 2800mAh 6.0V AA Ni-MH JST-2P	BLLRC	B0C58ZYYK1	1
Mini Modulo step down DC-DC buck converter	ARCELI	B07MY2XP21	2
Transistor BJT NPN	Generico	2N2222A	1
Condensatore Elettrolitico 100µF 35V	Generico		1
Resistenza 330Ω (Ohm)	Generico		1
Resistenza 1000Ω (Ohm)	Generico		2
Resistenza 2000Ω (Ohm)	Generico		1
Guida Lineare e Pattino (Miniaturizzata)	NISE	M5CUU1-55L-2LF- 5/5	2
Rullo siliconico a basso shore	Generico		2
Grano di scorrimento M5	Generico		1
Vite a colletto M3 con diametro spalla 4mm	Generico		2

### A.2 – Componenti realizzati in alluminio (a disegno) sistema di scorrimento

Demoninazione componente	Codice disegno/tavola	Quantità
Base	AS0027	1

## Appendice A – Distinta componenti del sistema di scorrimento

---

Supporto mobile	AS0028	1
Staffa di fissaggio motore	AS0029	1
Piastra di supporto	RS0001	1

---

## Appendice B – Codici sorgente del sistema di scorrimento

### B.1 – Interfaccia PC (`pc_sender.py`)

Codice Python che gestisce la pressione dei tasti e l'invio dei comandi seriali alla Raspberry Pi Pico trasmittente.

```
# pc_sender.py  (MicroPython)
import serial
import time
import keyboard # pip install keyboard
import sys

# === CONFIG ===
COM_PORT = "COM3"          # <-- cambia qui la porta del Pico
BAUDRATE = 115200

def main():
    try:
        ser = serial.Serial(COM_PORT, BAUDRATE, timeout=0.1)
    except serial.SerialException as e:
        print(f"Errore apertura seriale {COM_PORT}: {e}")
        sys.exit(1)

    print("Pronto. Tieni premuto 'S' per ACCENDERE, rilascia per SPEGNERE. ESC per uscire.")

    is_on = False # stato corrente del comando inviato

    def send(byte_val: bytes):
        try:
            ser.write(byte_val)
            ser.flush()
        except serial.SerialException as e:
            print(f"Errore scrittura seriale: {e}")

    # callback su pressione/rilascio
    def on_press_s(e):
        nonlocal is_on
        if not is_on:
            send(b'1') # comando ON
            is_on = True
            # print("TX: ON")

    def on_release_s(e):
        nonlocal is_on
        if is_on:
```

```

        send(b'0')      # comando OFF
        is_on = False
        # print("TX: OFF")

keyboard.on_press_key('s', on_press_s, suppress=False)
keyboard.on_release_key('s', on_release_s, suppress=False)

try:
    while True:
        time.sleep(0.05)
        if keyboard.is_pressed('esc'):
            break
except KeyboardInterrupt:
    pass
finally:
    # assicura spegnimento all'uscita
    try:
        send(b'0')
    except Exception:
        pass
    ser.close()
    print("Uscita.")

if __name__ == "__main__":
    main()

```

## B.2 – Raspberry Pi Pico trasmittente (**pico\_tx.py**)

Codice che genera un segnale PWM a 1 kHz sul pin GP15 in risposta ai comandi ricevuti via USB. Prevede un timer di sicurezza che disattiva il segnale in assenza di comandi per 10 secondi.

```

# pico_tx.py  (MicroPython)
import time
from machine import Pin, PWM
import sys

# === CONFIG ===
TX_DATA_PIN = 15 # GPIO collegato al DATA del trasmettitore IR
PWM_FREQ_HZ = 1000

# Setup uscita verso TX
tx_pin = Pin(TX_DATA_PIN, Pin.OUT, value=0)
pwm = PWM(tx_pin)
pwm.deinit() # parte spento

# Usa la USB-serial del Pico (CDC) come "seriale"

```

```
# In MicroPython, sys.stdin.buffer / sys.stdin.read funzionano sulla
USB VCP

def read_byte_nonblock():
    import select
    poller = select.poll()
    poller.register(sys.stdin, select.POLLIN)
    res = poller.poll(0)
    if res:
        b = sys.stdin.buffer.read(1)
        return b
    return None

def set_tx_on(on: bool):
    if on:
        # abilita PWM a 1 kHz, duty ~50%
        pwm.init(freq=PWM_FREQ_HZ, duty_u16=32768)
    else:
        pwm.deinit()
        tx_pin.value(0)

def main():
    on_state = False
    set_tx_on(False)
    last_cmd_time = time.ticks_ms()

    print("Pico TX pronto. Comandi: '1'=ON, '0'=OFF (via USB
serial).")

    while True:
        b = read_byte_nonblock()
        if b is not None:
            if b == b'1' and not on_state:
                set_tx_on(True)
                on_state = True
                last_cmd_time = time.ticks_ms()
            elif b == b'0' and on_state:
                set_tx_on(False)
                on_state = False
                last_cmd_time = time.ticks_ms()
            # ignora altri byte

            # (opzionale) sicurezza: spegni se non ricevi nulla per 10s
            if on_state and time.ticks_diff(time.ticks_ms(),
last_cmd_time) > 10000:
                set_tx_on(False)
                on_state = False

        time.sleep_ms(5)
```

```
main()
```

### B.3 – Raspberry Pi Pico ricevente (**pico\_rx.py**)

Codice che riceve il segnale PWM tramite il modulo IR, pilota il motore tramite un transistor 2N2222A e implementa un watchdog di sicurezza.

```
# pico_rx.py  (MicroPython)
from machine import Pin, Timer
import time

# ----- Parametri -----
# Scegli un timeout > ~3x del periodo del tuo PWM.
# Esempi:
#   - PWM 1 kHz  -> periodo 1 ms  -> TIMEOUT_MS = 20..50 ms
#   - PWM 100 Hz -> periodo 10 ms -> TIMEOUT_MS = 100..200 ms
#   - PWM 5 Hz   -> periodo 200 ms-> TIMEOUT_MS = 800..1200 ms
TIMEOUT_MS = 150 # adatta al tuo caso

# ----- GPIO -----
in16 = Pin(16, Pin.IN, Pin.PULL_DOWN) # ingresso PWM (0..3.3V) dal
modulo IR
out17 = Pin(17, Pin.OUT, value=0)      # uscita "PWM presente"
(collegata al controllo motore)

# ----- Rilevazione attività PWM -----
_last_edge_ms = time.ticks_ms() - (TIMEOUT_MS * 10) # così parte
come "assente"

def _on_edge(pin):
    # IRQ: chiamata a ogni fronte (salita/discesa). Deve essere
    rapidissima!
    global _last_edge_ms
    _last_edge_ms = time.ticks_ms()
    # Appena vediamo attività, alziamo subito l'uscita
    out17.value(1)

# Interrompi su entrambi i fronti per contare qualsiasi attività
in16.irq(trigger=Pin.IRQ_RISING | Pin.IRQ_FALLING, handler=_on_edge)

# ----- Watchdog che spegne out17 se non c'è più attività -----
def _watchdog(_t):
    now = time.ticks_ms()
    if time.ticks_diff(now, _last_edge_ms) > TIMEOUT_MS:
        # Niente fronti da troppo tempo: consideriamo PWM assente
        out17.value(0)

wd = Timer()
```

```
wd.init(period=20, mode=Timer.PERIODIC, callback=_watchdog)  #  
controllo ogni 20 ms  
  
# ----- Loop "vuoto" -----  
try:  
    while True:  
        time.sleep(1)  # tutto il lavoro lo fanno IRQ e Timer  
except KeyboardInterrupt:  
    # Cleanup se interrompi con Ctrl+C  
    wd.deinit()  
    in16.irq(handler=None)  
    out17.off()
```

## Appendice C – Distinta componenti delle braccia tele-operate

### C.1 – Componenti commerciali braccia tele-operate

Denominazione componente	Produttore/marca	Codice Prodotto (Part Number)	Quantità
GIM4310 Robot dog motor with 10:1 gear box Stator 4310 2Nm 70KV	SMC Powers	25643100	4
GIM3505-8 Robot dog motor with 8:1 gear box Stator 3505 0.43Nm 234RPM	SMC Powers	25635050	8
Encoder Magnetico AS5048A con connettori per PWM/SPI	Nimomo	AS5048a	12
SimpleFOC Shield v2.0.4 FOC BLDC	SimpleFOC	SimpleFOCShield v2.0.4	12
Controller basato su microcontrollore ATMega328 (Arduino UNO R3)	Arduino S.r.l.	Arduino UNO Rev3	12
Encoder AMT102V uscita SPI	Same Sky	AMT102-V	12
Guida lineare HGR15R lunghezza 300 mm	HIWIN	ZFS.HGR15R.03	4
Carrello a ricircolo di sfere HGW15CC	HIWIN	ZFW.NTS.HGW15CC	4
Cinghia dentata T5 larghezza 6mm sviluppo 600mm aperta	Geeyu	B0CJ7X3B3Q	4
Cuscinetto a sfera 17mm x 26mm x 5mm	PATIKIL	6803-2RS	24
Alimentatore 12V	Generico		2

### C.2 – Componenti realizzati in alluminio (a disegno) braccia tele-operate

Demoninazione componente	Codice disegno/tavola	Quantità
Piastra attacco slave DX	BR0011	1
Piastra attacco slave SX	BR0012	1
Tubo alluminio anodizzato	BR0013	2

---

## Appendice D – Codici sorgente delle braccia tele-operate

### D.1 – Motore elettrico GIM4310

Il listato presenta il codice Arduino/C++ per il controllo in *torque* (coppia) del motore BLDC GIM4310 (14 coppie polari), sfruttando la libreria SimpleFOC. Implementa un'architettura master-slave: l'encoder AS5048A fornisce il feedback per il controllo FOC, mentre l'encoder CUI AMT 102 funge da master per il setpoint di posizione. Il comando `motor.move()` calcola l'errore tra la posizione attuale e quella desiderata (scalata per il rapporto 10:1), generando la coppia motrice necessaria per un inseguimento preciso del riferimento master.

```
// Codice per il controllo FOC (Field-Oriented Control) del motore
BLDC GIM4310
// (14 coppie polari).
//
// L'encoder CUI AMT 102 funge da master per il setpoint di
posizione.
// Il motore è accoppiato con l'encoder magnetico AS5048A per il
feedback di posizione FOC.
// Il Chip Select (CS) dell'encoder AS5048A è collegato al pin A0.

#include <SimpleFOC.h>
// Libreria per la gestione degli interrupt software sui pin
(necessaria per l'Encoder Master)
#include <PciManager.h>
#include <PciListenerImp.h>

// Definizione del motore BLDC e del driver
BLDCMotor motor = BLDCMotor(14); // 14 coppie polari per il motore
GIM4310
BLDCDriver3PWM driver = BLDCDriver3PWM(9, 5, 6, 8); // Pin U(PWM),
V(PWM), W(PWM), EN(Enable)

// Istanza del sensore di feedback (encoder AS5048A)
MagneticSensorSPI sensor = MagneticSensorSPI(AS5048_SPI, A0);

// Istanza dell'encoder Master (CUI AMT 102)
Encoder encoder1 = Encoder(A5, A4, 2048); // Pin A, Pin B, Conteggi
per giro (CPR)
// Funzioni di gestione degli interrupt per l'encoder master
void doA1(){encoder1.handleA();}
void doB1(){encoder1.handleB();}

// Inizializzazione delle routine di interrupt (IRQ)
PciListenerImp listenerA(encoder1.pinA, doA1);
```

```

PciListenerImp listenerB(encoder1.pinB, doB1);

// Variabile per l'angolo di riferimento (non usata direttamente, ma
utile per debug)
float target_angle = 0;

// Variabile per memorizzare la posizione zero iniziale del sensore
FOC
float pos_zero;

void setup() {

    // Inizializzazione dell'encoder di feedback (AS5048A)
    sensor.init();

    // Collega il motore al sensore
    motor.linkSensor(&sensor);

    // Inizializzazione dell'encoder Master (CUI AMT 102)
    encoder1.init();

    // Attivazione degli interrupt per l'encoder master
    PciManager.registerListener(&listenerA);
    PciManager.registerListener(&listenerB);

    // Configurazione del driver
    driver.voltage_power_supply = 12.0; // Tensione di alimentazione
    del driver [V]
    motor.voltage_limit = 8.0;           // Limite di tensione imposto
    al motore [V]
    driver.init();

    // Collega il motore al driver
    motor.linkDriver(&driver);

    // Imposta la modalità di controllo: torque (coppia)
    motor.controller = MotionControlType::torque;

    // Inizializzazione del motore
    motor.init();
    // Allineamento dell'encoder e avvio del FOC
    motor.initFOC();

    // Memorizza l'angolo letto al momento dell'avvio come posizione
    zero
    pos_zero = sensor.getAngle();
}

void loop() {

```

```

// Aggiorna la posizione dell'encoder master
encoder1.update();

// Esegue l'algoritmo FOC (necessario per il controllo della
coppia)
motor.loopFOC();

// Calcola il comando di coppia (torque) per seguire la posizione
master
// Formula: Kp * (Posizione_Attuale_Motore -
Posizione_Desiderata_Master * Rapporto_Trasmissione)
//
// sensor.getAngle() - pos_zero: Posizione assoluta del motore
(rimossa la calibrazione iniziale)
// 10 * encoder1.getAngle(): Posizione desiderata, scalata per il
rapporto di trasmissione (10:1)
// 1.5: Guadagno proporzionale (Kp) per il controllo di posizione
implicito
motor.move(1.5 * (sensor.getAngle() - pos_zero - 10 *
encoder1.getAngle()));
}

```

## D.2 – Motore elettrico GIM3505-8

Il listato presenta il codice Arduino/C++ per il controllo in *torque* (coppia) del motore BLDC GIM3505-8 (11 coppie polari), sfruttando la libreria SimpleFOC. Implementa un'architettura master-slave: l'encoder AS5048A fornisce il feedback FOC, mentre l'encoder CUI AMT 102 funge da master per il setpoint di posizione. Il comando `motor.move()` calcola l'errore tra la posizione attuale e quella desiderata (scalata per il rapporto 8:1), generando la coppia motrice necessaria per un inseguimento preciso del riferimento master.

```

// Codice per il controllo FOC (Field-Oriented Control) del motore
BLDC GIM3505-8
// (11 coppie polari).
//
// L'encoder CUI AMT 102 funge da master per il setpoint di
posizione.
// Il motore è accoppiato con l'encoder magnetico AS5048A per il
feedback di posizione FOC.
// Il Chip Select (CS) dell'encoder AS5048A è collegato al pin A0.

#include <SimpleFOC.h>
// Libreria per la gestione degli interrupt software sui pin
(necessaria per l'Encoder Master)

```

```

#include <PciManager.h>
#include <PciListenerImp.h>

// Definizione del motore BLDC e del driver
BLDCMotor motor = BLDCMotor(11); // 11 coppie polari per il motore
GIM3505-8
BLDCDriver3PWM driver = BLDCDriver3PWM(9, 5, 6, 8); // Pin U(PWM),
V(PWM), W(PWM), EN(Enable)

// Istanza del sensore di feedback (encoder AS5048A)
MagneticSensorSPI sensor = MagneticSensorSPI(AS5048_SPI, A0);

// Istanza dell'encoder Master (CUI AMT 102)
Encoder encoder1 = Encoder(A5, A4, 2048); // Pin A, Pin B, Conteggi
per giro (CPR)
// Funzioni di gestione degli interrupt per l'encoder master
void doA1(){encoder1.handleA();}
void doB1(){encoder1.handleB();}

// Inizializzazione delle routine di interrupt (IRQ)
PciListenerImp listenerA(encoder1.pinA, doA1);
PciListenerImp listenerB(encoder1.pinB, doB1);

// Variabile per l'angolo di riferimento (non usata direttamente, ma
utile per debug)
float target_angle = 0;

// Variabile per memorizzare la posizione zero iniziale del sensore
FOC
float pos_zero;

void setup() {

    // Inizializzazione dell'encoder di feedback (AS5048A)
    sensor.init();

    // Collega il motore al sensore
    motor.linkSensor(&sensor);

    // Inizializzazione dell'encoder Master (CUI AMT 102)
    encoder1.init();

    // Attivazione degli interrupt per l'encoder master
    PciManager.registerListener(&listenerA);
    PciManager.registerListener(&listenerB);

    // Configurazione del driver
    driver.voltage_power_supply = 12.0; // Tensione di alimentazione
    del driver [V]
}

```

```

motor.voltage_limit = 6.0;           // Limite di tensione imposto
al motore [V]
driver.init();

// Collega il motore al driver
motor.linkDriver(&driver);

// Imposta la modalità di controllo: torque (coppia)
motor.controller = MotionControlType::torque;

// Inizializzazione del motore
motor.init();
// Allineamento dell'encoder e avvio del FOC
motor.initFOC();

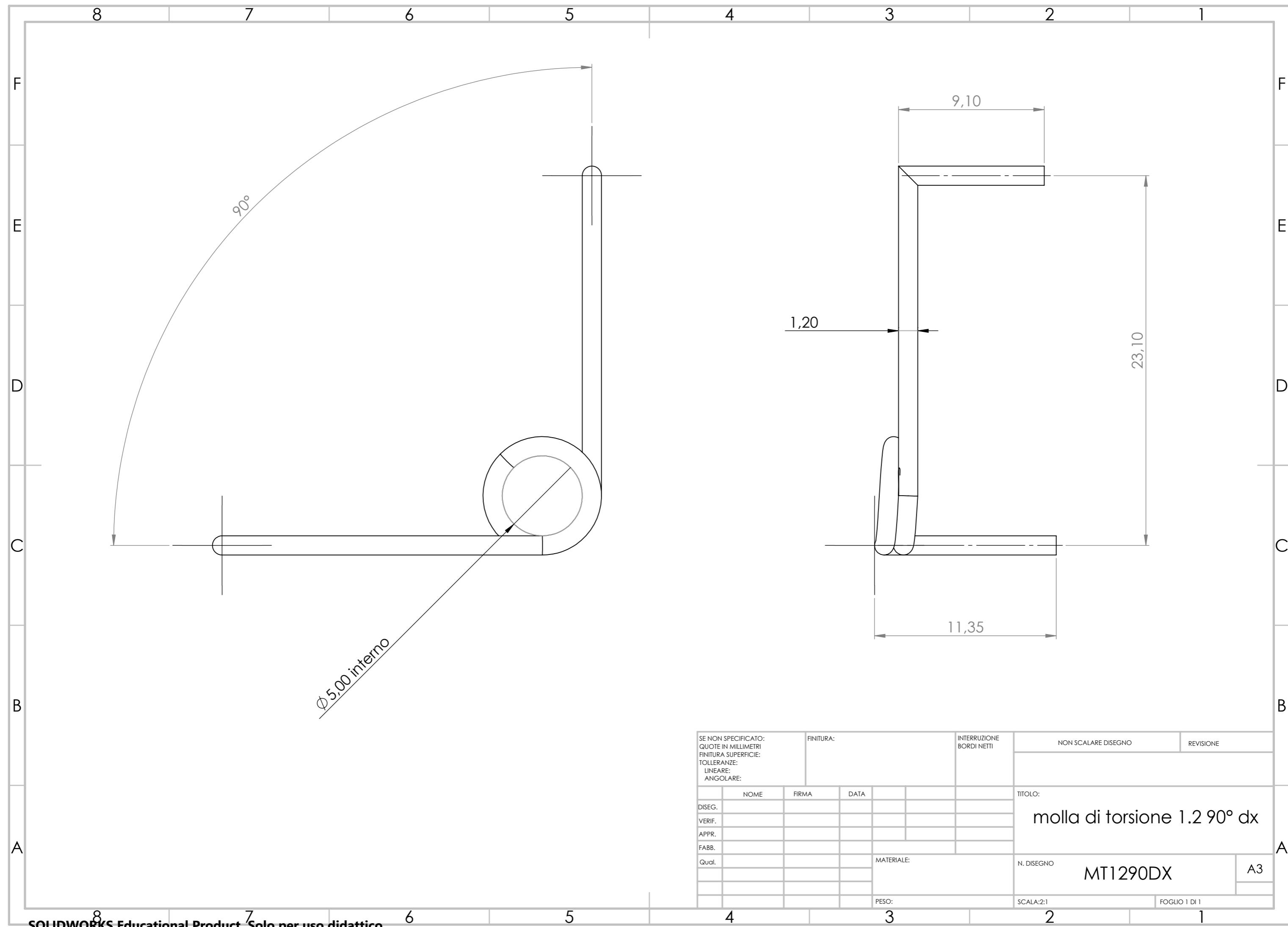
// Memorizza l'angolo letto al momento dell'avvio come posizione
zero
pos_zero = sensor.getAngle();
}

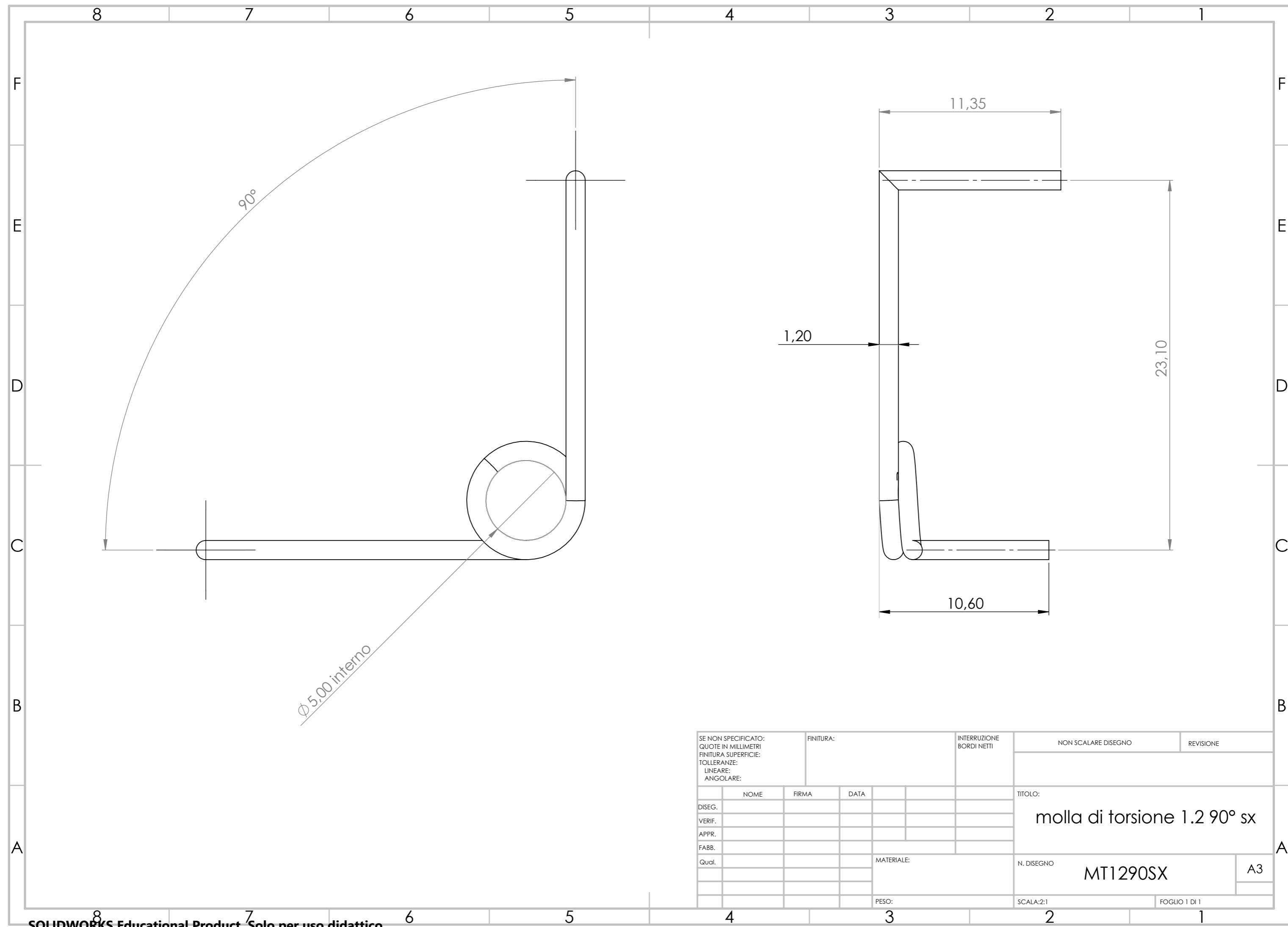
void loop() {
    // Aggiorna la posizione dell'encoder master
    encoder1.update();

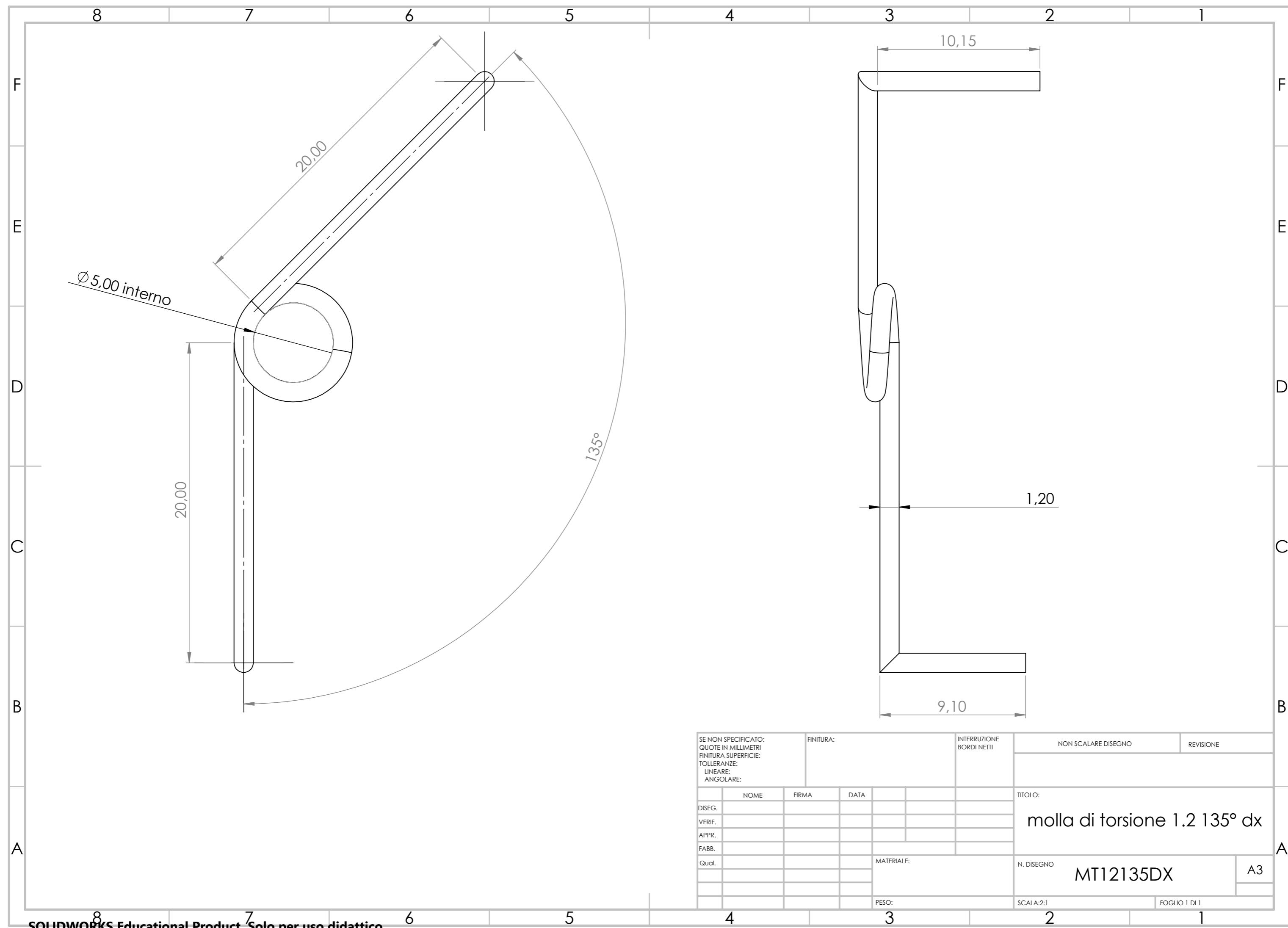
    // Esegue l'algoritmo FOC (necessario per il controllo della
    coppia)
    motor.loopFOC();

    // Calcola il comando di coppia (torque) per seguire la posizione
    master
    // Formula: Kp * (Posizione_Attuale_Motore -
    Posizione_Desiderata_Master * Rapporto_Trasmissione)
    //
    // sensor.getAngle() - pos_zero: Posizione assoluta del motore
    (rimossa la calibrazione iniziale)
    // 8 * encoder1.getAngle(): Posizione desiderata, scalata per il
    rapporto di trasmissione (8:1)
    // 1.5: Guadagno proporzionale (Kp) per il controllo di posizione
    implicito
    motor.move(1.5 * (sensor.getAngle() - pos_zero - 8 *
    encoder1.getAngle()));
}

```







8 7 6 5 4 3 2 1

F

E

D

C

B

A

F

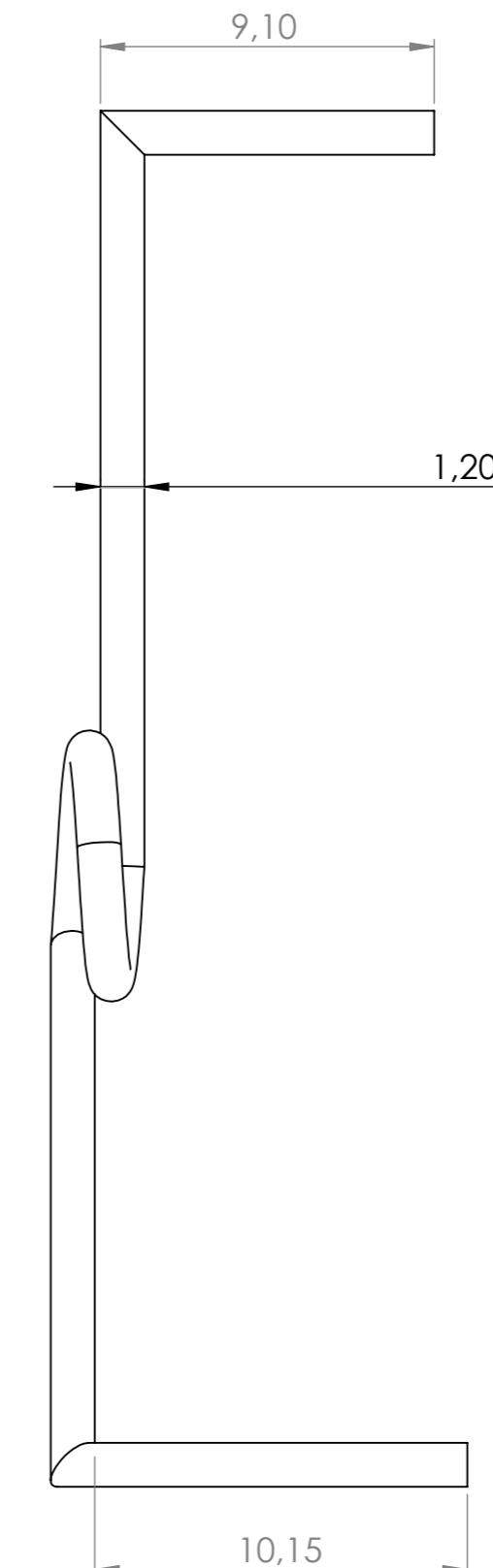
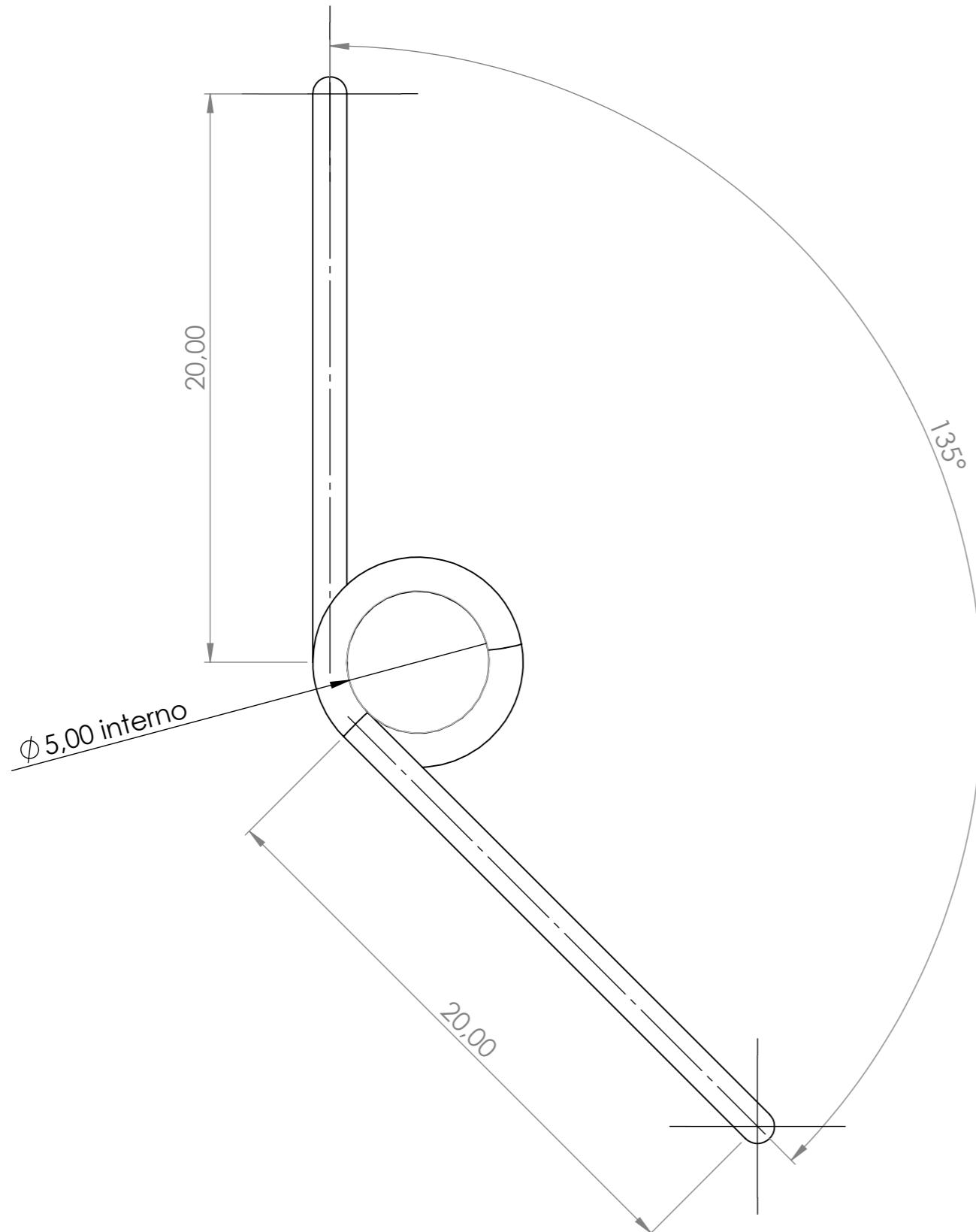
E

D

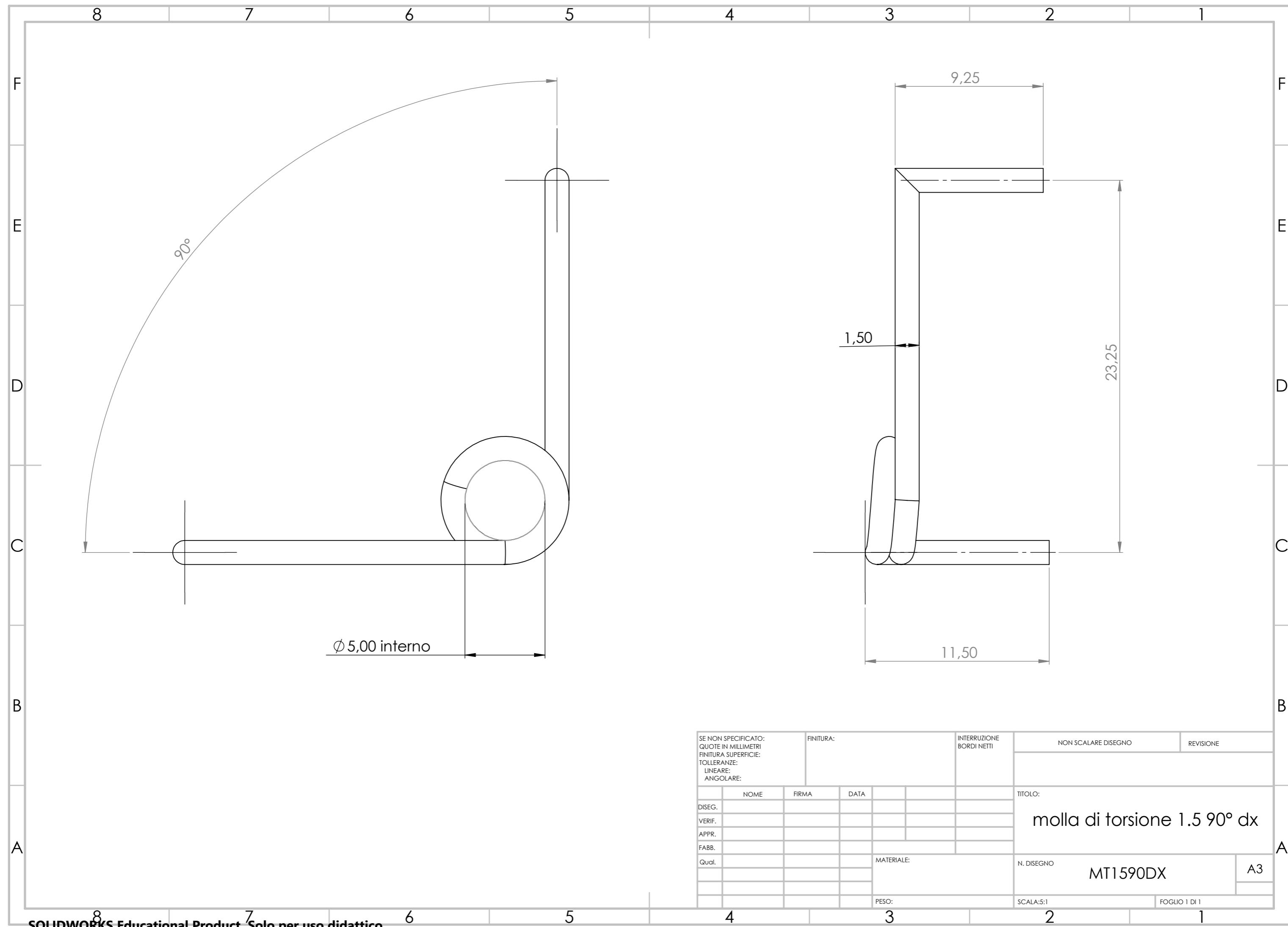
C

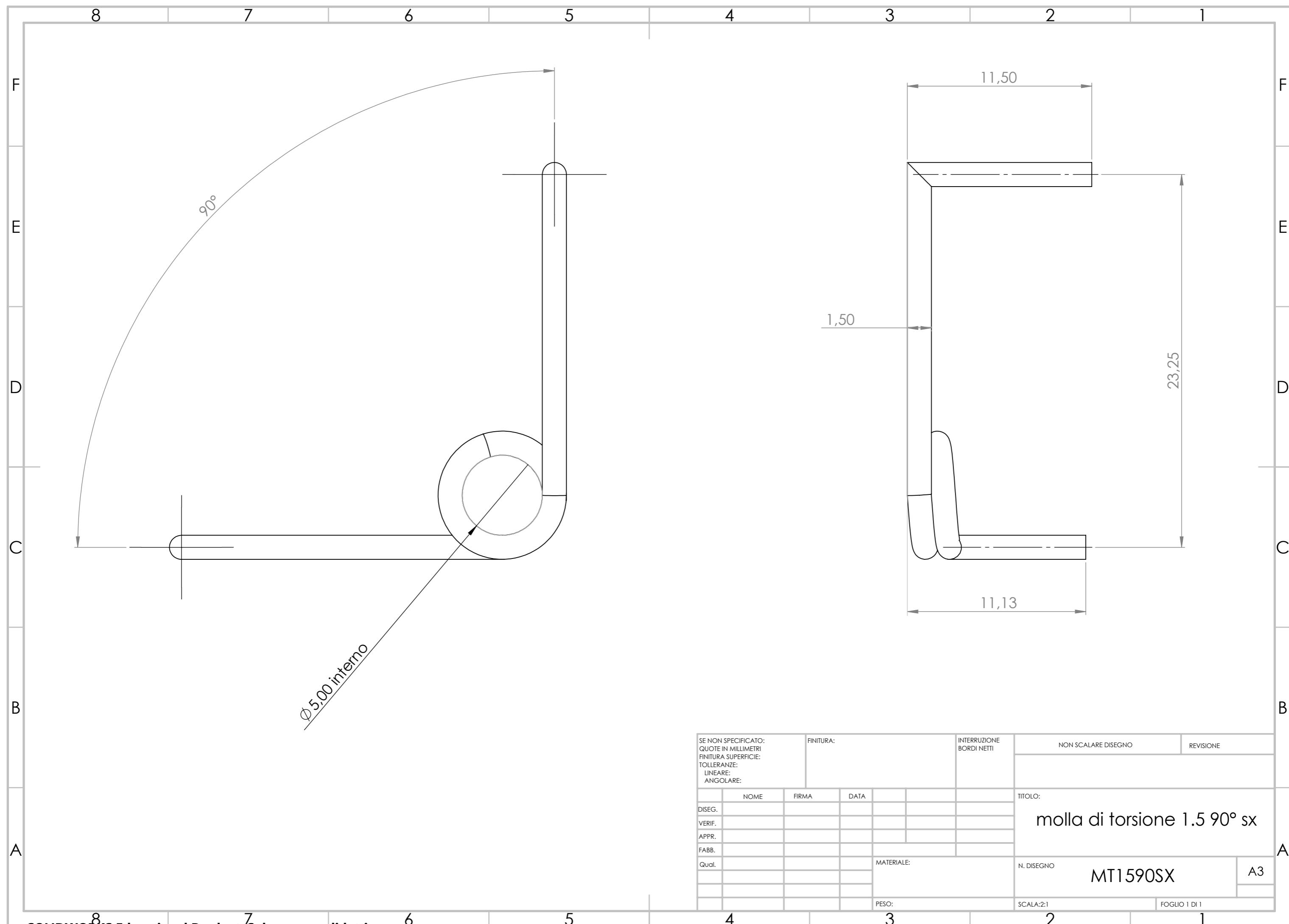
B

A



SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILLIMETRI FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE:	FINITURA:	INTERRUZIONE BORDI NETTI	NON SCALARE DISEGNO	REVISIONE
DISEG.	NOME	FIRMA	DATA	TITOLO:
VERIF.				molla di torsione 1.2 135° sx
APPR.				
FABB.				
Qual.			MATERIALE:	N. DISEGNO
				MT12135SX
			PESO:	SCALA:2:1
				FOGLIO 1 DI 1





8 7 6 5 4 3 2 1

F

E

D

C

B

A

F

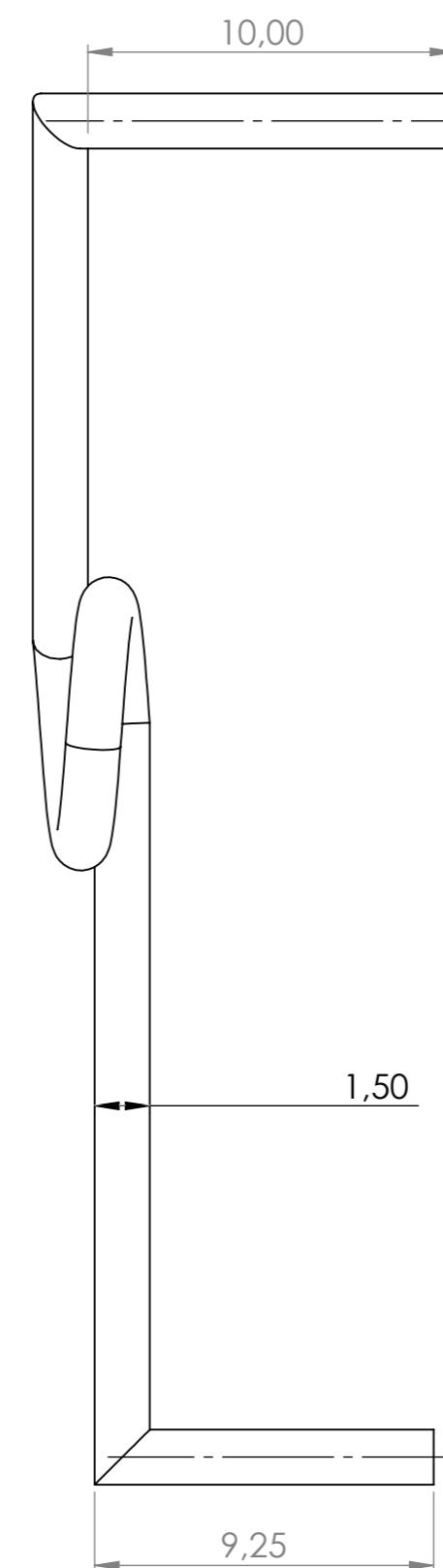
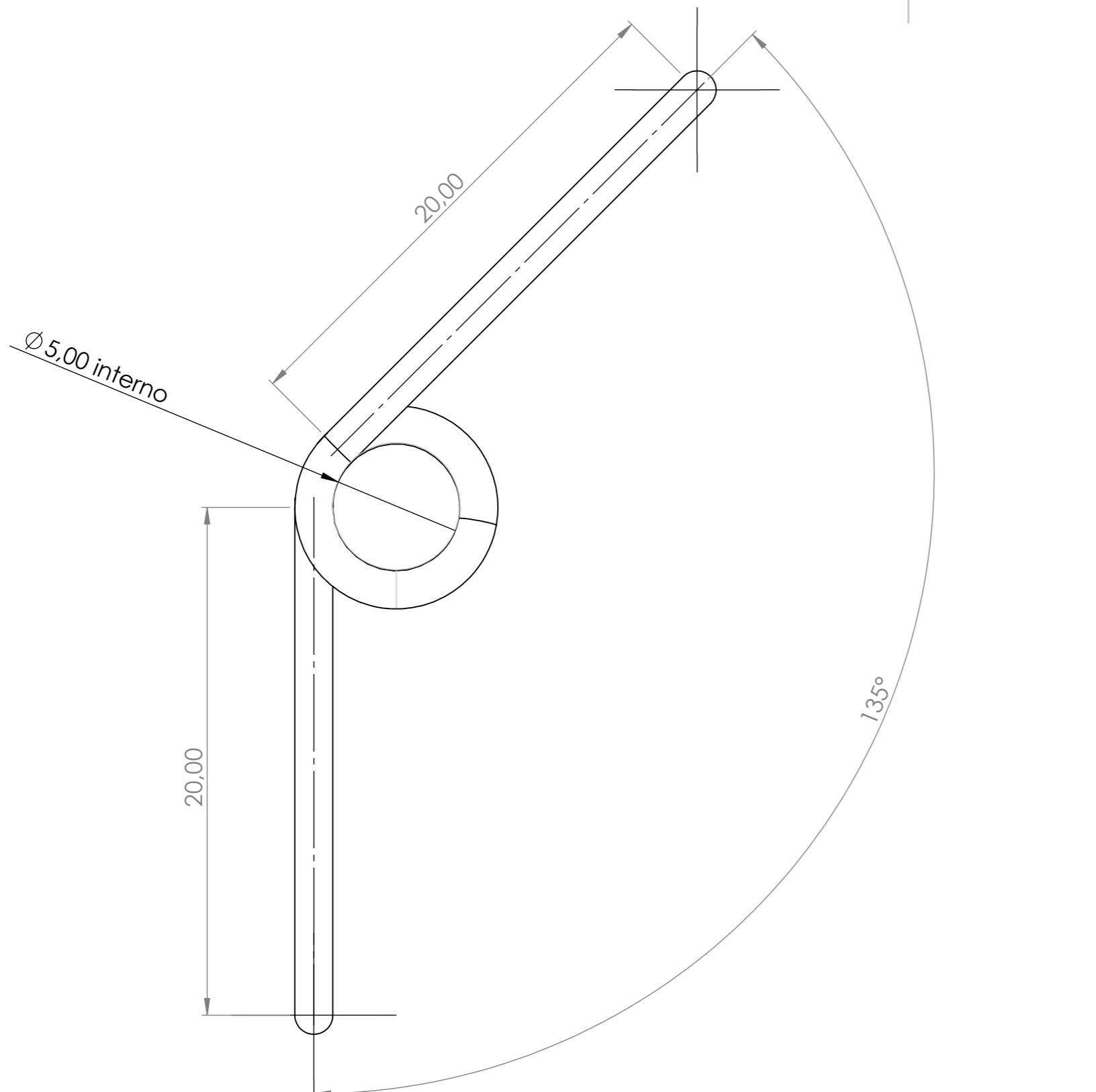
E

D

C

B

A



SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILLIMETRI FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE:	FINITURA:	INTERRUZIONE BORDI NETTI	NON SCALARE DISEGNO	REVISIONE
DISEG.	NOME	FIRMA	DATA	TITOLO:
VERIF.				molla di torsione 1.5 135° dx
APPR.				
FABB.				
Qual.				
		MATERIALE:	N. DISEGNO	
			MT15135DX	A3
		PESO:	SCALA:2:1	FOGLIO 1 DI 1

8 7 6 5 4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

C

B

B

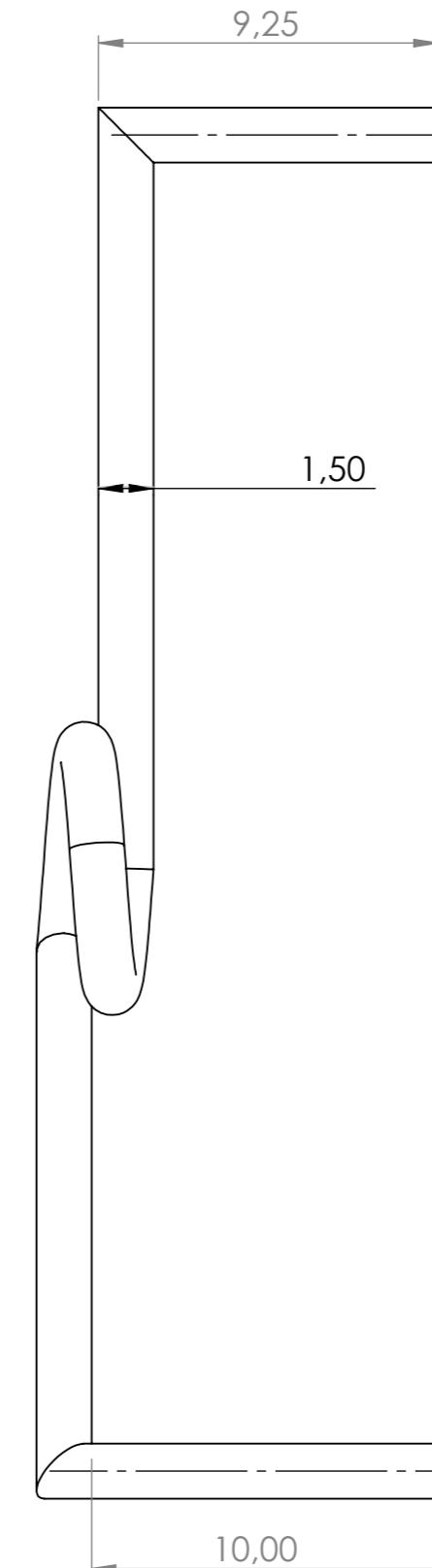
A

A

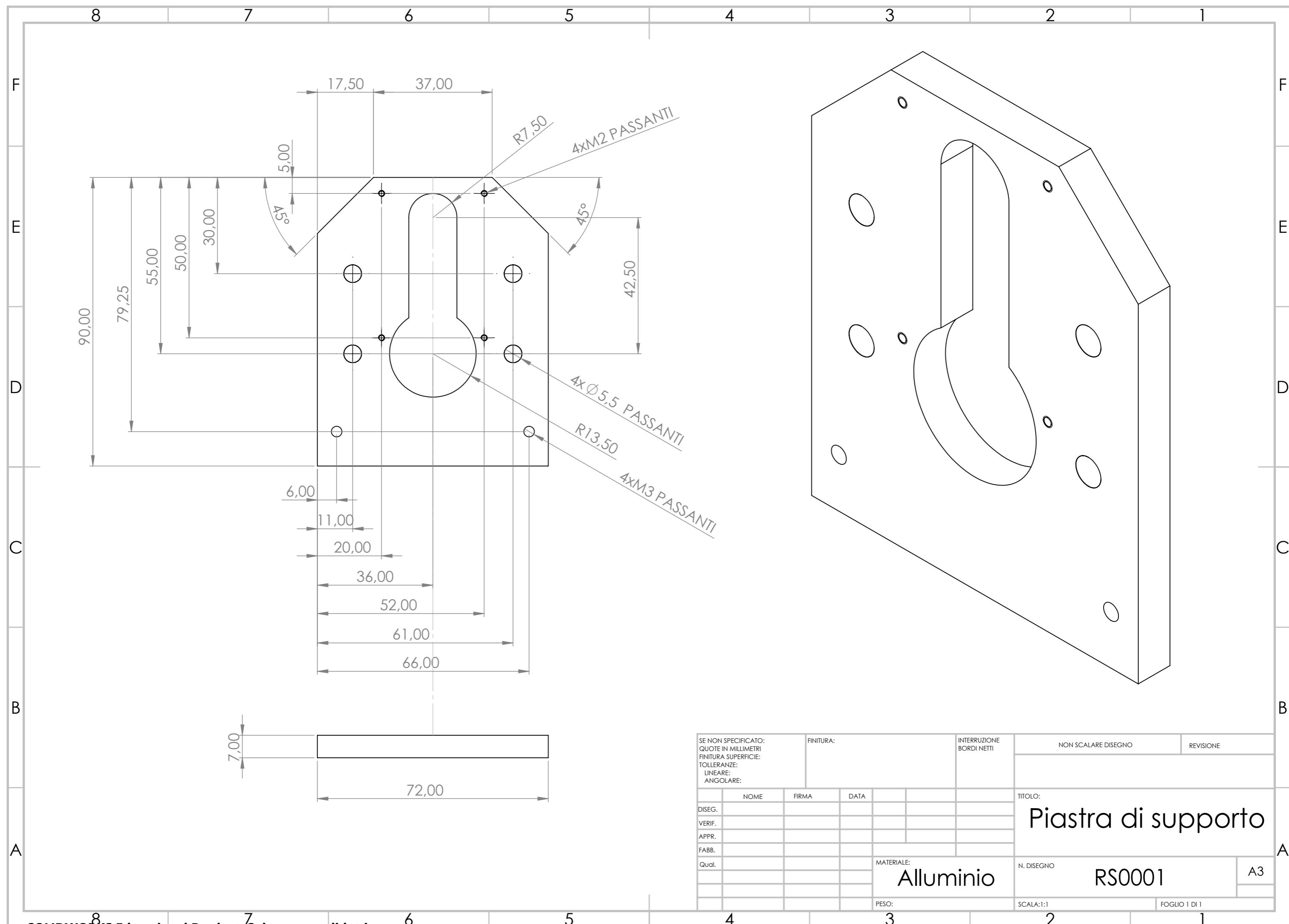
$\phi 5,00$  interno

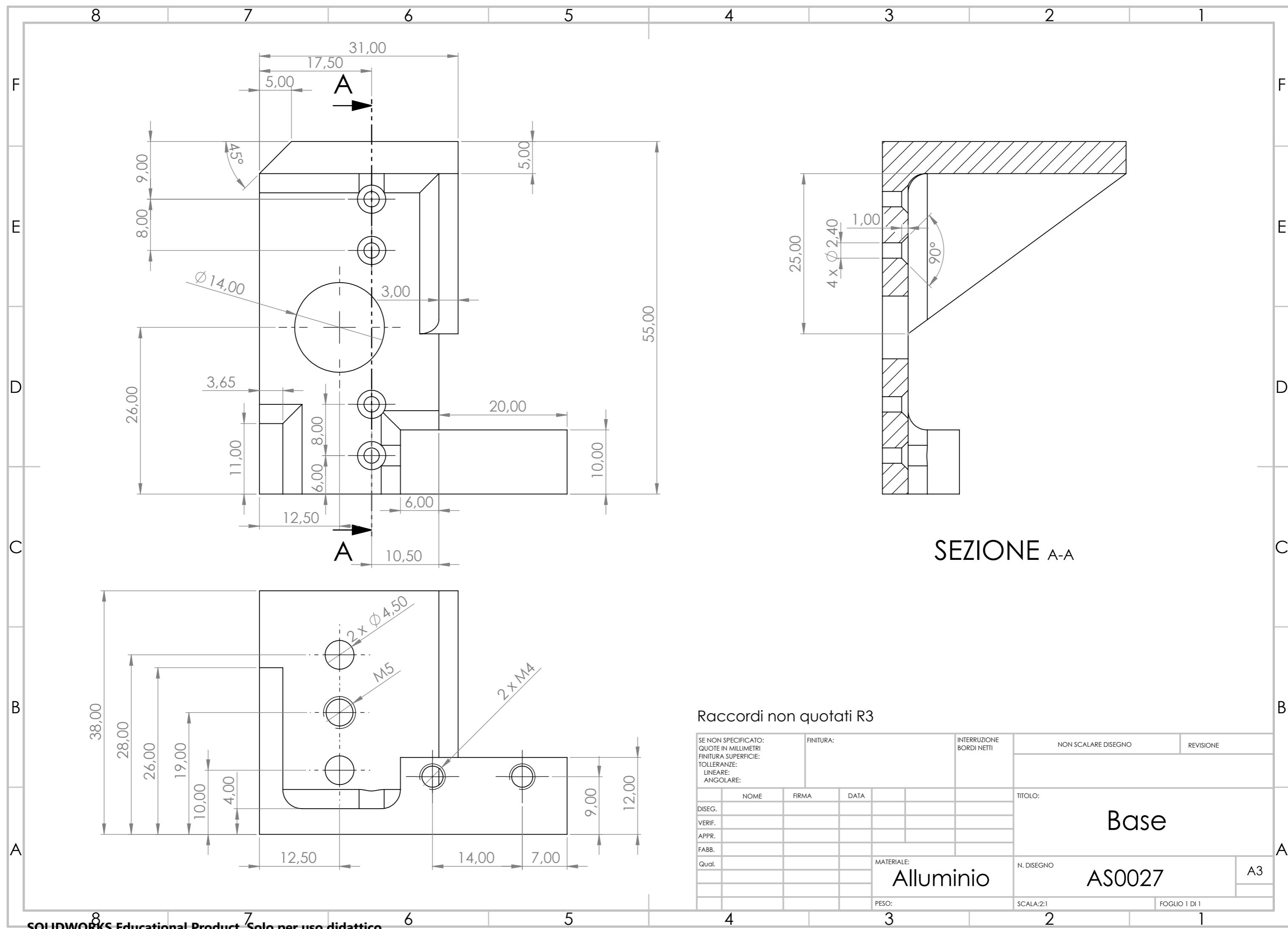
20,00

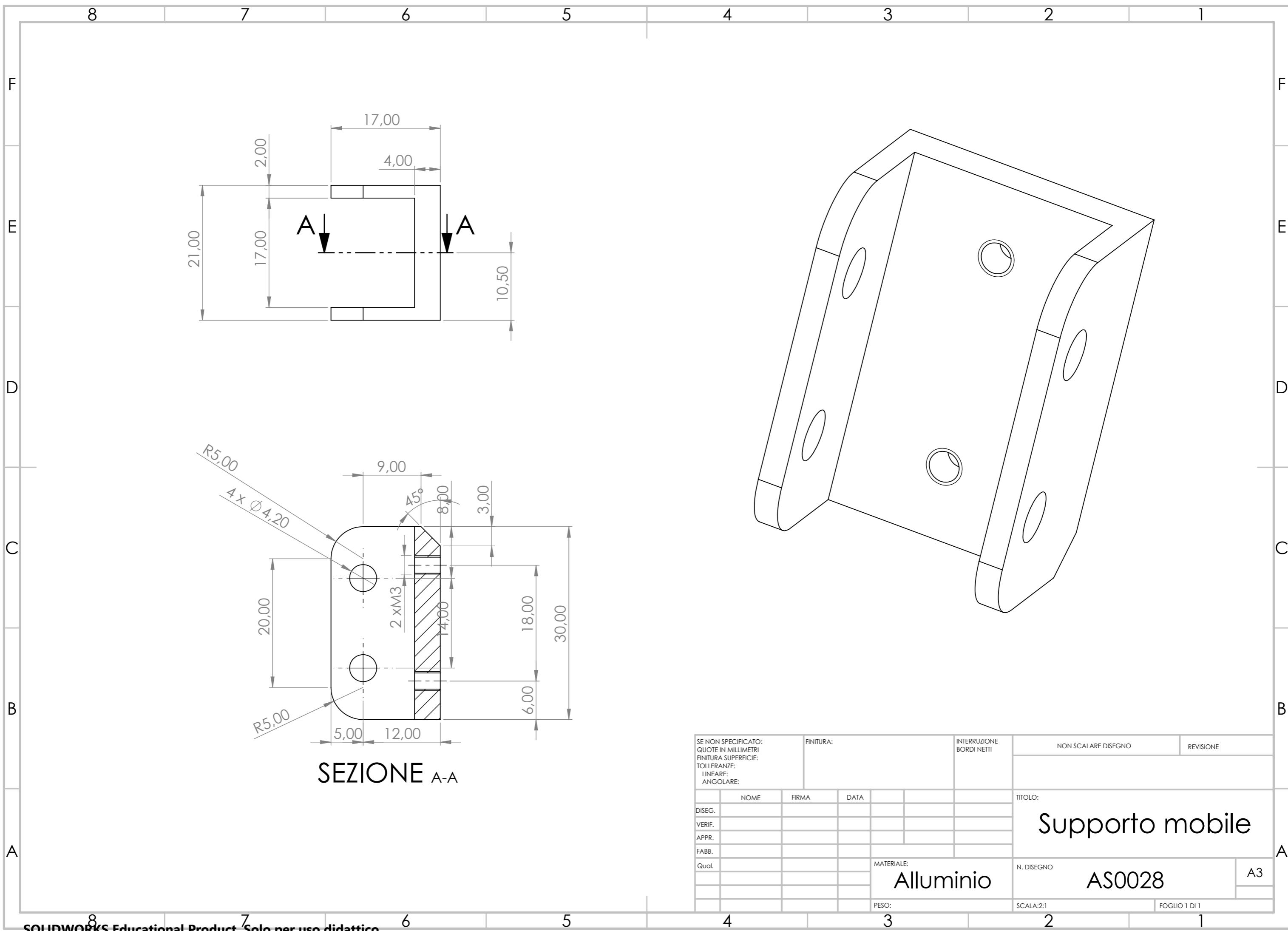
135°

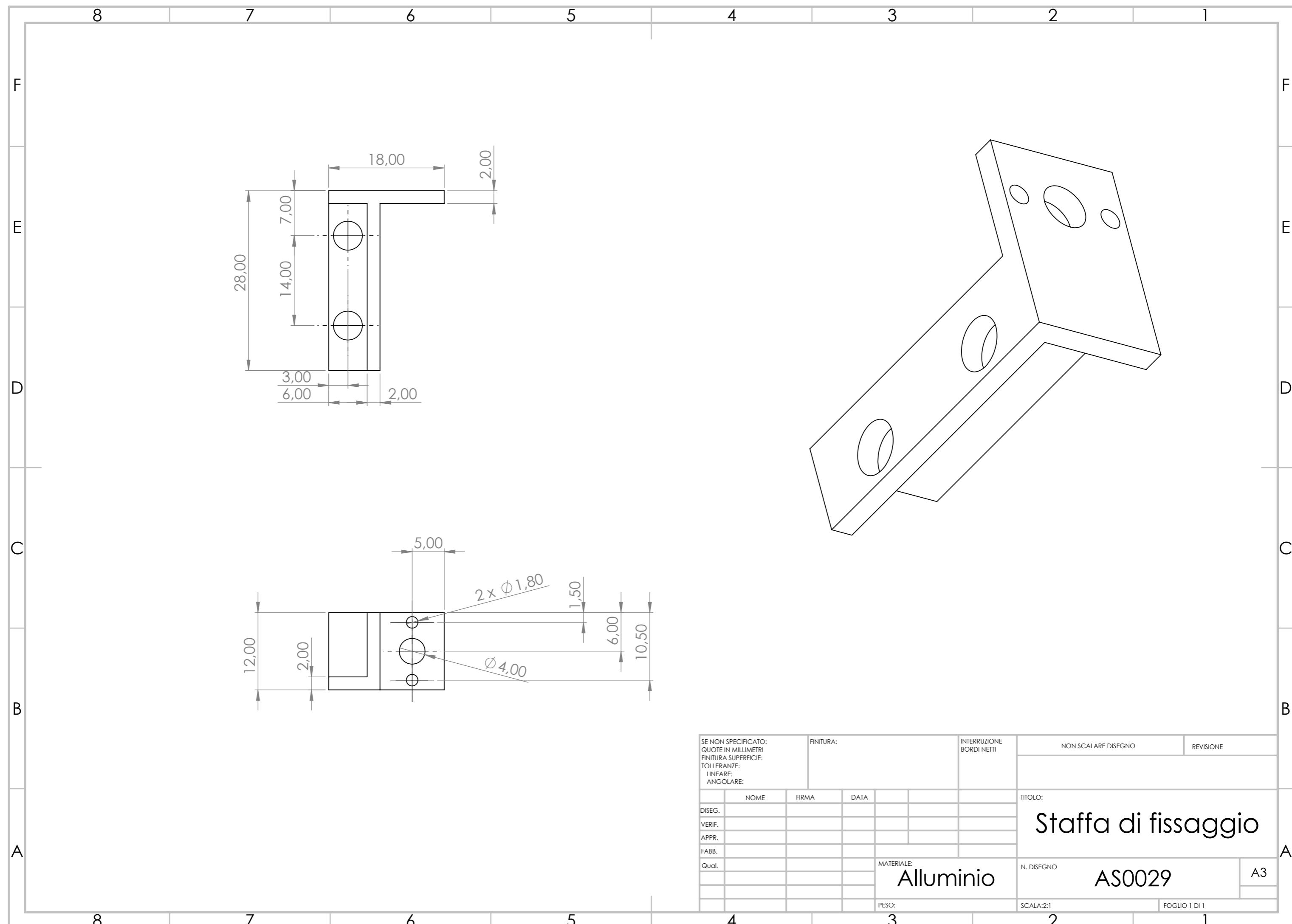


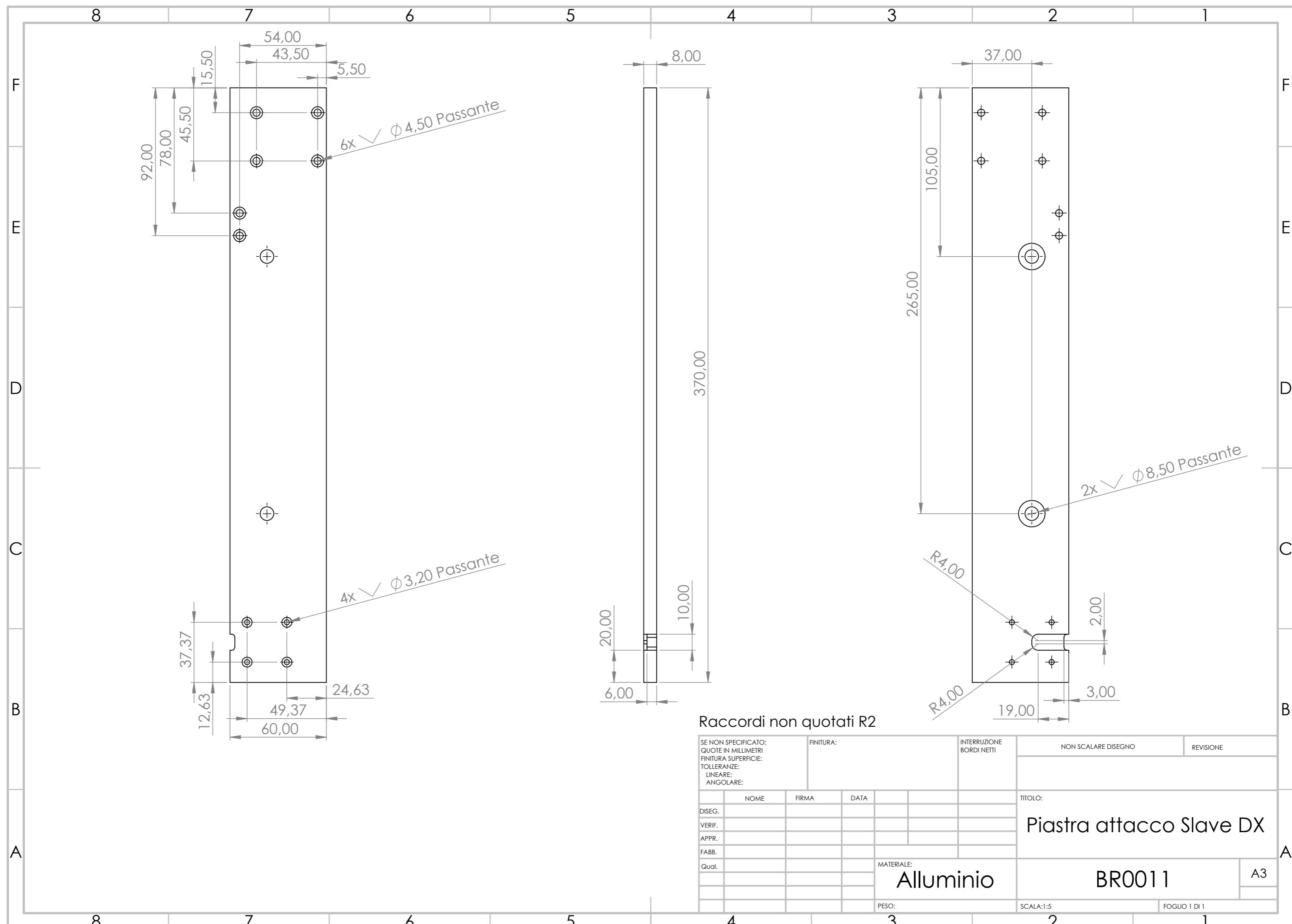
SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILLIMETRI FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE:	FINITURA:	INTERRUZIONE BORDI NETTI	NON SCALARE DISEGNO	REVISIONE
DISEG.	NOME	FIRMA	DATA	TITOLO:
VERIF.				molla di torsione 1.5 135° sx
APPR.				
FABB.				
Qual.				
		MATERIALE:	N. DISEGNO	
			MT15135SX	A3
		PESO:	SCALA:2:1	FOGLIO 1 DI 1

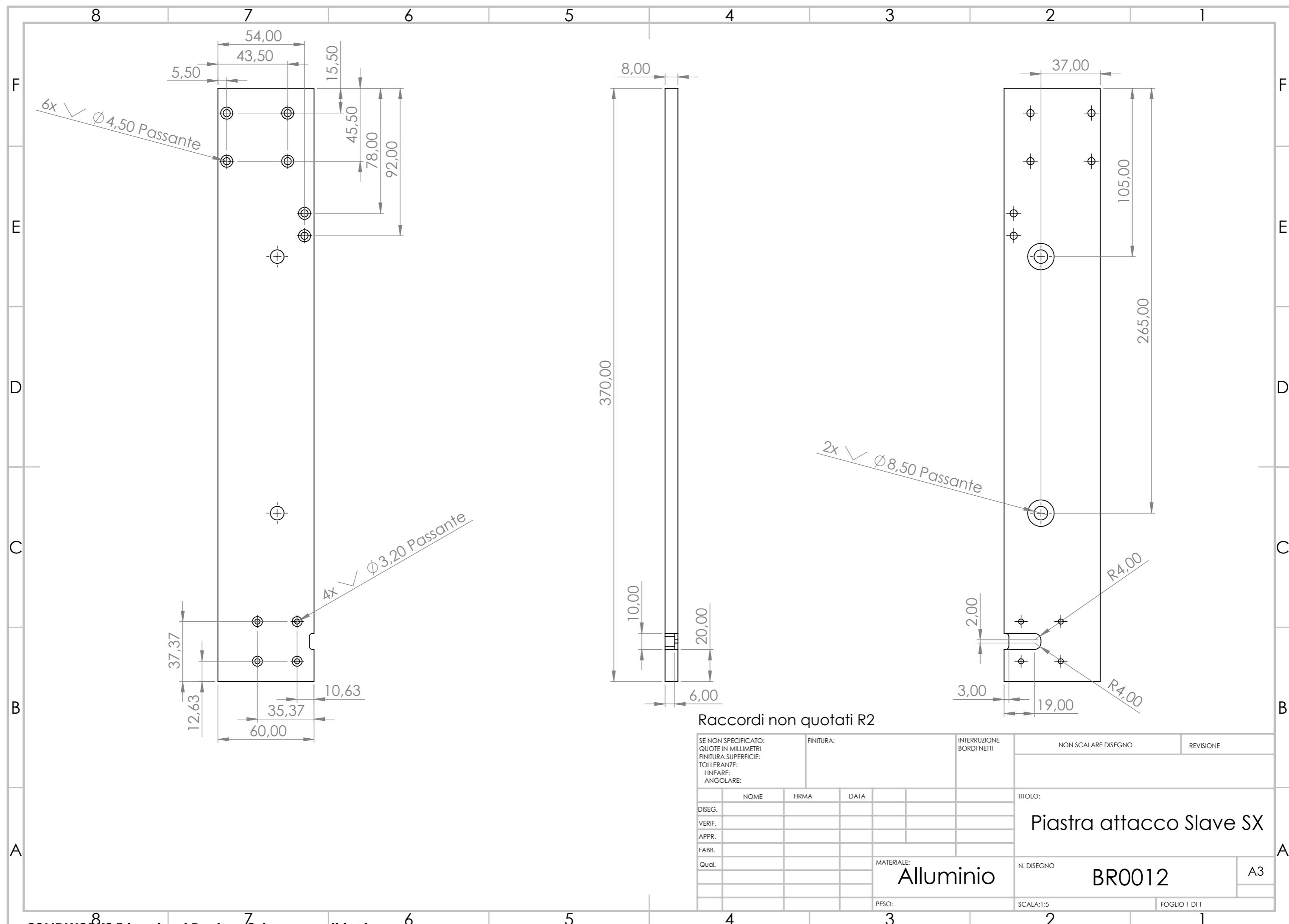












8

7

6

5

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

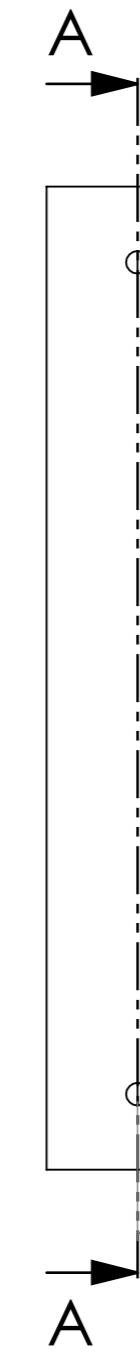
C

B

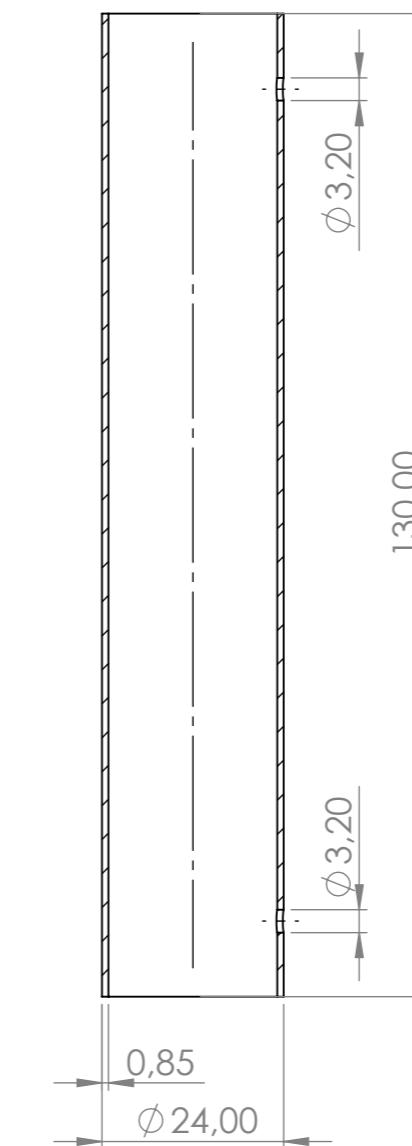
B

A

A



### SEZIONE A-A



SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILLIMETRI FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE:	FINITURA:	INTERRUZIONE BORDI NETTI	NON SCALARE DISEGNO	REVISIONE
DISEG. <td>NOME</td> <td>FIRMA</td> <td>DATA</td> <td></td>	NOME	FIRMA	DATA	
VERIF.				TITOLO:
APPR.				Tubo Alluminio
FABB.				
Qual.				
			MATERIALE:	Alluminio
			PESO:	
			N. DISEGNO	BR0013
			SCALA:1:1	A3
			FOGLIO 1 DI 1	