

POLITECNICO DI TORINO

Tesi di laurea Magistrale in Ingegneria meccanica



**Politecnico
di Torino**

Tesi di laurea Magistrale

Prototipazione e sviluppo di attrezzature applicative di un nuovo robot per l'agricoltura di precisione in serre

Relatore

Prof. Giuseppe QUAGLIA

Candidato

Filippo CHIONETTI

Ottobre 2024

Sommario

Il lavoro di tesi riguarda la fase di prototipazione di un nuovo robot per l'agricoltura di precisione all'interno delle serre, chiamato AgriMaRo (Agricultural Mate Robot). La prima parte si concentra su una breve introduzione del progetto e uno stato dell'arte relativo alle possibili applicazioni in ambito agricolo. Nello specifico, quest'ultimo è improntato sui modelli attualmente esistenti di robot utilizzati nel campo dell'agricoltura di precisione. Si prosegue con un capitolo dedicato alla progettazione del veicolo. Inizialmente, viene riportata la progettazione funzionale, costituita dall'esposizione dei due principali sottosistemi di movimentazione del robot, quali il meccanismo di variazione della carreggiata e il sistema moto-sterzante. Segue la progettazione esecutiva, in cui viene descritto il telaio portante della macchina e l'alloggiamento per la componentistica elettrica ed elettronica di alimentazione e controllo. Successivamente, viene presentata una sezione relativa all'alimentazione ed il controllo della macchina, contenente lo schema logico ed elettrico di AgriMaRo e la relativa spiegazione. Si prosegue, quindi, con una breve esposizione della cinematica del robot e dell'impostazione dei comandi impartiti per lo svolgimento dei principali movimenti. Il terzo capitolo riguarda lo sviluppo di possibili applicazioni del robot. L'inizio di questo capitolo è dedicato alla valutazione di fattibilità delle varie lavorazioni previste in campo agricolo. Una volta definita la tipologia di lavorazione realmente possibile, viene esposto un meccanismo di centraggio della piattaforma a cui verranno connessi i tool. Infine, il documento prosegue con lo sviluppo dell'applicazione di due dispositivi commerciali alla struttura del veicolo, al fine di eseguire due differenti lavorazioni sul terreno coltivato. La prima è relativa ai finger weeder e la seconda alla distribuzione di fertilizzante solido sul terreno. Il quarto capitolo è inerente

alla predisposizione della macchina ed il successivo svolgimento dei primi test di funzionamento per la verifica degli assemblaggi meccanici ed elettronici dei diversi sottosistemi presenti. Il quinto ed ultimo capitolo riporta le conclusioni tratte dallo sviluppo dell'argomento di tesi e possibili risvolti futuri del progetto. Inoltre, riassume aspetti positivi ed eventuali criticità riscontrate nel progetto e nella prova del prototipo in analisi.

Indice

Elenco delle tabelle	IV
Elenco delle figure	VI
1 Introduzione	1
1.1 Agricoltura di precisione	1
1.2 Robot in agricoltura: lavorazioni e tecnologie di navigazione	3
1.3 Stato dell'arte delle attrezzature per la robotica agricola	5
2 Progettazione AgriMaRo	12
2.1 Progettazione funzionale	12
2.1.1 Meccanismo di variazione della carreggiata	15
2.1.2 Sistema moto-sterzante	21
2.2 Progettazione esecutiva	28
2.2.1 Telaio tubolare	29
2.2.2 Alloggiamento parti elettriche ed elettroniche	30
2.3 Alimentazione e controllo della macchina	36
2.4 Cinematica e radio-comando del robot	43
3 Progettazione tool	50
3.1 Valutazione di fattibilità delle lavorazioni	51

3.1.1	Lavorazioni pesanti	58
3.1.2	Lavorazioni leggere	62
3.2	Meccanismo di centraggio dell'attrezzatura	65
3.2.1	Parte fissa	69
3.2.2	Parte mobile	74
3.2.3	Guida trasversale	79
3.3	Primo tool: applicazione finger weeder	83
3.4	Secondo tool: applicazione distribuzione di fertilizzante	94
3.4.1	Struttura di collegamento del serbatoio	101
3.4.2	Dispositivo di distribuzione fertilizzante	105
4	Primi test e preparazione alle prove sperimentali	118
4.1	Setup della macchina	118
4.2	Cablaggi e componentistica elettronica	119
4.3	Test iniziali	123
5	Conclusioni e lavori futuri	125
	Bibliografia	128

Elenco delle tabelle

2.1	Dimensioni meccanismo	20
2.2	Caratteristiche guida lineare [21]	20
2.3	Caratteristiche motore della guida [21]	20
2.4	Caratteristiche componenti commerciali	27
2.5	Dati tecnici del sistema moto-sterzante	27
2.6	Morsetti telaio	30
2.7	Tubi telaio	30
2.8	Dati di partenza	38
2.9	Valori finali	39
3.1	c_a e c_r per vari tipi di terreno [31]	56
3.2	Valori di ρ_0 per diverse lavorazioni [31]	57
3.3	Calcoli aderenza caso aratura	60
3.4	Calcoli aderenza caso lavorazioni leggere	64
3.5	Confronto profili travi	70
3.6	Dati principali morsetto di collegamento	72
3.7	Dati cuscinetto lineare	74
3.8	Caratteristiche componenti commerciali parte mobile	78
3.9	Caratteristiche componenti commerciali Guida trasversale	83
3.10	Caratteristiche componenti customizzati	94

3.11	Caratteristiche componenti customizzati MDG 40 M1	105
3.12	Caratteristiche componenti commerciali Elesa [26]	105
3.13	Caratteristiche componenti commerciali per meccanismo	116
3.14	Caratteristiche componenti customizzati per meccanismo	117
4.1	Codici commerciali componenti elettronici	122

Elenco delle figure

1.1	Sistema robotico intelligente di diserbo meccanico su fila [7], [9] . . .	6
1.2	Robot per il controllo delle infestanti con tecnologia laser [10],[11] . . .	7
1.3	Robot per la raccolta delle fragole in coltivazioni ad alta densità [7], [12]	7
1.4	End-effector per la raccolta dei pomodori [13]	8
1.5	Robot per la fenotipizzazione delle piante [14],[15]	8
1.6	Monitoraggio delle malattie in colture ortofrutticole [16]	9
1.7	Robot per il trattamento delle piante tramite irrorazione: Agri-Eco robot [17]	10
1.8	Applicazione di un robot versatile per l'irrorazione [18]	10
2.1	Rappresentazione CAD di AgriMaRo	12
2.2	Larghezza AgriMaRo	14
2.3	Lunghezza AgriMaRo	14
2.4	Rappresentazione CAD del meccanismo	15
2.5	Schema funzionale del meccanismo a croce [19], [20]	17
2.6	Relazione tra x_D e y_B normalizzato [20]	18
2.7	Rapporto di trasmissione rispetto a y_B normalizzato [20]	19
2.8	Render CAD sistema moto-sterzante	21
2.9	Schema semplificato dello sterzo	22

2.10	Esploso del sistema moto-sterzante	23
2.11	Dettaglio gruppo ingranaggi encoder	26
2.12	Render AgriMaRo esecutivo	28
2.13	Render 3D telaio	29
2.14	Render 3D alloggiamento parti elettriche ed elettroniche	31
2.15	Dimensioni della superficie disponibile per l'alloggiamento	32
2.16	Render morsetto	33
2.17	Esploso scatola	35
2.18	Scatola in configurazione aperta	35
2.19	Flow-chart schema elettrico	37
2.20	Schema elettrico	42
2.21	Sistema di riferimento del robot	43
2.22	Coordinate joystick	43
2.23	Mappa degli input	44
2.24	Sistema di riferimento della velocità	45
2.25	Descrizione comandi joystick [30]	48
2.26	Ricevente radio-comando	49
3.1	Schema ruota-terreno [31]	52
3.2	Collegamento attrezzi [31]	55
3.3	Render 3D meccanismo di centraggio	65
3.4	Schema meccanismo a croce	66
3.5	Schema semplificato meccanismo	68
3.6	Viste in 3D delle due soluzioni	69
3.7	Morsetto di collegamento Eleso GN 146.3 [26]	72
3.8	Cuscinetto lineare Misumi [23]	74
3.9	Disegno piastra di attacco tool	77
3.10	Componenti commerciali parte mobile	78

3.11	Disegno flangia di collegamento	82
3.12	Disegno piastra piegata trasversale	82
3.13	Componenti commerciali guida trasversale Misumi [23]	83
3.14	Render completo applicazione finger weeder	83
3.15	Gruppo rotante finger weeder [35]	87
3.16	Gruppo rotante [35]	88
3.17	Dischi con mescole diverse [35]	88
3.18	Applicazioni finger weeder [35]	89
3.19	CAD struttura applicazione finger weeder	90
3.20	Esploso complessivo applicazione finger weeder	92
3.21	Scatolato verticale	92
3.22	Scatolato longitudinale	93
3.23	Staffa scatolati	93
3.24	Render completo distribuzione fertilizzante	94
3.25	MDG 40 M1 [38]	98
3.26	Superficie disponibile per l'attrezzatura, in mm	100
3.27	Esempi applicativi MDG 40 M1 [38]	100
3.28	Struttura di collegamento dell'attrezzatura	102
3.29	Esploso struttura di collegamento MDG 40 M1	103
3.30	Lamiera di collegamento	104
3.31	Scatolato flangiato	104
3.32	Meccanismo di distribuzione	105
3.33	Schema meccanismo di distribuzione [19]	107
3.34	Schema a blocchi trasmissione del moto	108
3.35	Parti di collegamento	111
3.36	Componenti di trasmissione	112
3.37	Parti di collegamento dei link	113

3.38 Carter meccanismo	113
3.39 Manovella	114
3.40 Biella	115
3.41 Morsetto tubi flessibili	115
3.42 Esploso complessivo meccanismo	116
4.1 Supporti per i componenti elettrici ed elettronici	119
4.2 Piattaforma di alimentazione e controllo	120

Capitolo 1

Introduzione

Il presente lavoro di tesi riguarda la fase di prototipazione del robot AgriMaRo (Agricultural Mate Robot) e la progettazione di alcune applicazioni riguardanti l'agricoltura di precisione. Questo progetto è nato dal prof. Giuseppe Quaglia ed è stato sviluppato e messo a punto con la stesura di due precedenti documenti di tesi, "Progettazione di un nuovo robot per l'agricoltura di precisione in serre" di Carlo Massimo Paolo Molinengo [1] e "Design of the locomotion system for a new robot for precision agriculture in greenhouses" di Francesco Amodio [2].

L'idea è nata dall'esigenza di combinare la versatilità del telaio per l'adattamento a diverse attrezzature, l'adattabilità a colture diverse in serra con la variazione della carreggiata e la stabilità della struttura, anche su terreni sconnessi, grazie alla scelta di avere 3 punti di appoggio sul terreno.

1.1 Agricoltura di precisione

Con l'aumento della popolazione mondiale sta crescendo l'esigenza di rendere sempre più produttivo il settore primario andando, ove possibile, ad automatizzare le operazioni ripetitive o pericolose per la salute degli operatori. [3]

L'agricoltura di precisione è un approccio gestionale basato sull'utilizzo di dati e tecnologie avanzate per ottimizzare la resa delle coltivazioni, adattandosi alle differenze morfologiche che possono esistere in varie zone dell'appezzamento e nei diversi momenti della stagione. Questo aspetto sta diventando molto importante nell'ambito della ricerca al fine di massimizzare i prodotti, utilizzando la minor quantità possibile di risorse disponibili. La nascita di questo concetto trova luogo negli anni '90 con l'introduzione del GPS. Inizialmente i dispositivi utilizzati servivano solamente per svolgere alcune operazioni specifiche, ma comunque i comandi per il loro funzionamento dovevano essere forniti dall'uomo. Con lo sviluppo tecnologico e l'introduzione della digitalizzazione, i macchinari usati in ambito agricolo hanno assunto la capacità di poter prendere alcune decisioni sulla base dei dati e degli input acquisiti [4].

Attualmente, l'agricoltura di precisione permette di poter monitorare costantemente le colture, le rese e la situazione climatica degli appezzamenti da remoto; i macchinari utilizzati per la semina e la fertilizzazione sono dotati di dispositivi con variazione continua di portata per non sprecare risorse e fornire al terreno il giusto apporto di elementi nutritivi. Le superfici coltivate vengono gestite attraverso mappe elettroniche visualizzabili direttamente a monitor dall'operatore e rese disponibili al software del macchinario per poter impostare le traiettorie corrette per la lavorazione da effettuare, in accordo con il segnale GPS. Tutto ciò si riassume nel concetto di "smart farming", o "Agricoltura 4.0", che dal 2017 costituisce l'obiettivo da raggiungere per ogni azienda agricola. Tutto ciò si concretizza nell'abbattimento dell'impatto ambientale e nella ricerca di nuove soluzioni sostenibili per il lavoro di tutti i giorni. L'inserimento dei robot in agricoltura ha permesso di ridurre il costo del lavoro, migliorandone allo stesso tempo la qualità. Grazie all'utilizzo di sensori nel workspace del robot e della guida autonoma, migliorano di molto le prestazioni raggiungibili durante una lavorazione all'interno di un appezzamento di terra [4].

1.2 Robot in agricoltura: lavorazioni e tecnologie di navigazione

La lavorazione che i robot effettuano in campo dipende, però, dalla tipologia di attrezzo/tool di cui sono equipaggiati. Attualmente ne esistono molte tipologie e si basano su differenti tecnologie per il sistema di attuazione. In questo capitolo la ricerca verrà condotta concentrandosi sull'applicazione dei robot all'interno delle serre in quanto, a questo contesto, appartiene la progettazione di AgriMaRo. Di seguito vengono elencate le lavorazioni più diffuse nella ricerca in questo ambito [5]:

- guida e navigazione
- raccolta
- protezione delle piante e controllo infestanti
- multitasking
- semina
- fertilizzazione
- irrigazione
- impollinazione
- analisi del suolo
- raccolta della frutta
- irrorazione
- estirpatura delle infestanti
- trattamento con raggi UV

- controllo dell'umidità

L'aspetto sicuramente principale per un robot è quello di potersi muovere all'interno dell'ambiente circostante. Volendo citare alcuni sistemi utilizzati per la navigazione autonoma dei robot in agricoltura, il GPS (Global Positioning System) o il GNSS (Global Navigation Satellite System) sono sicuramente tra i più importanti; in questo caso i ricevitori più utilizzati sono gli RTK (Real Time Kinematic), che permettono una precisione dell'ordine del centimetro. Nel caso delle serre, però, il segnale può non essere sufficientemente forte a causa della poca visibilità delle antenne, dovuta alla struttura stessa della serra. Pertanto, a meno di particolari architetture delle antenne, questa tecnologia non viene applicata nel caso delle serre, bensì in campo aperto. Infatti, una buona alternativa è rappresentata dai sistemi visivi; nella maggior parte dei casi vengono utilizzate una o più telecamere, al fine di percepire l'ambiente circostante e la profondità. Eventualmente, possono essere presenti dei *landmark*, cioè dei riferimenti artificiali ed unici, che permettono al robot di localizzarsi nello spazio. L'equipaggiamento del robot utilizzato in serra può prevedere dei sensori ottici, al fine di misurare la distanza dagli oggetti circostanti; un esempio è il LIDAR (Light Detection And Ranging). Esistono, inoltre, sistemi che sfruttano le onde elettromagnetiche per individuare la posizione del robot all'interno di un ambiente confinato. In questo caso, un emettitore posto a bordo del veicolo genera onde elettromagnetiche, le quali vengono inviate a ricevitori posti agli angoli dell'area delimitata. Attraverso la misurazione del "tempo di volo" dell'onda stessa nel percorso di andata e ritorno, è possibile stabilire la posizione del veicolo. Sulla struttura del robot vengono spesso montati dei sensori ad ultrasuoni, i quali permettono di stimare la distanza dagli ostacoli presenti attorno alla struttura del robot. Queste ultime due modalità di localizzazione del veicolo sono anche dette *range finder*. Un'ulteriore applicazione è costituita dall'utilizzo dei sensori elettro-meccanici e di inerzia, consigliati per poter tenere

sotto controllo la dinamica del robot, grazie all'ausilio di accelerometri, giroscopi ed altri dispositivi. Su tutte queste tecnologie finora elencate sono presenti molti studi tuttora in corso, per poter individuare nuove soluzioni pratiche nella progettazione dei robot per agricoltura in serra [6], [7].

Oltre alla navigazione ed al monitoraggio, i robot possono essere impiegati per svolgere attività e lavorazioni in ambito agricolo. In tal senso, vengono spesso equipaggiati con attrezzature volte a svolgere uno specifico compito. La grande differenza rispetto all'ambito industriale è l'enorme variabilità dell'ambiente in cui si muove il veicolo, del terreno che percorre e lavora e degli oggetti da manipolare. Infatti, a causa dell'origine organica di questi elementi, le attrezzature che vengono create per applicazioni robotiche devono permettere un ampio range di regolazione ed un'elevata capacità di adattamento. Nel caso, per esempio, di utilizzo di gripper per la presa di prodotti ortofrutticoli, l'architettura utilizzata è di tipo "soft" e/o sottoattuata [5].

1.3 Stato dell'arte delle attrezzature per la robotica agricola

I progressi scientifici e tecnologici nel settore agricolo e nella robotica hanno consentito lo sviluppo di lavorazioni sempre più precise. Attività come raccolta, fertilizzazione, monitoraggio e diserbo, se svolte manualmente, comportano elevati costi di manodopera; inoltre, l'uso di sostanze chimiche nei pesticidi e nei trattamenti fitosanitari rappresenta un rischio per la salute umana e aumenta l'impatto ambientale. Le piattaforme robotiche offrono un controllo avanzato delle colture, permettendo di individuare problemi come malattie delle piante o carenze nutritive. Un altro aspetto rilevante è l'elevata precisione con cui queste piattaforme operano, anche su terreni irregolari. La maggior parte della letteratura scientifica si concentra

sulle lavorazioni precedentemente citate; di seguito vengono illustrati alcuni esempi [8].



Figura 1.1: Sistema robotico intelligente di diserbo meccanico su fila [7], [9]

Come visibile in figura 1.1, questo dispositivo riconosce ed elimina le malerbe grazie ad un sistema di riconoscimento basato sull'utilizzo di una telecamera e alcuni algoritmi. L'elemento che agisce sul terreno è costituito da un disco rotante con tre lame, disposte circolarmente, le quali permettono lo sradicamento delle infestanti. Il disco può essere inclinato per adattarsi meglio al terreno presente tra le piante della coltivazione di interesse. Inoltre, tra le lame presenti sul disco, vi è un settore circolare vuoto che permette il passaggio della pianta coltivata, in modo da evitarne il danneggiamento [7], [9].



Figura 1.2: Robot per il controllo delle infestanti con tecnologia laser [10],[11]

Il robot di figura 1.2 identifica ed elimina le malerbe sfruttando la tecnologia laser e algoritmi di *deep learning*, in grado di riconoscere la struttura delle piante [10],[11].



Figura 1.3: Robot per la raccolta delle fragole in coltivazioni ad alta densità [7], [12]

Il veicolo di figura 1.3 è dotato di 24 braccia robotiche, disposte su 6 unità a modulo lineare. Ognuna di esse è dotata di un sensore di profondità integrato a colori, con visione a corto raggio; inoltre, è presente un'unità di elaborazione delle immagini per determinare il grado di maturazione. La raccolta del frutto avviene per mezzo di un sistema di serraggio a rottura del picciolo, evitando così il di danneggiare il prodotto [7], [12].



Figura 1.4: End-effector per la raccolta dei pomodori [13]

L'applicazione in figura 1.4 rappresenta l'utilizzo di un *end-effector* per la raccolta del pomodoro. La particolarità risiede nel fatto che il meccanismo non agisce solamente sul singolo pomodoro, ma sull'intero grappolo, migliorando l'efficienza di raccolta. In questo caso, per il test è stata utilizzata una struttura portante con un'architettura di tipo Scara [13].



Figura 1.5: Robot per la fenotipizzazione delle piante [14],[15]

Il robot in figura 1.5 rappresenta una piattaforma utile alla fenotipizzazione della coltura, al fine di poter risalire alla genetica delle piante. Inoltre, permette un monitoraggio costante della coltura, anche per ciò che concerne la salute della

pianta e lo stato delle risorse nutritive disponibili durante il corso della stagione [14],[15].



Figura 1.6: Monitoraggio delle malattie in colture ortofrutticole [16]

In figura 1.6 la macchina esegue un'operazione di monitoraggio su colture ortofrutticole al fine di individuare problemi di malattie tramite l'utilizzo di sensori di prossimità e un sistema di telecamere disposte al di sotto del telaio del robot. Inoltre, è presente una copertura per proteggere dall'influenza dei raggi solari sull'analisi del terreno e delle piante [16].



Figura 1.7: Robot per il trattamento delle piante tramite irrorazione: Agri-Eco robot [17]

Agri-Eco robot, rappresentato in figura 1.7, è un veicolo progettato specificamente per il trattamento con pesticidi sulle coltivazioni di fragole all'interno delle serre. Le caratteristiche che contraddistinguono questo modello sono le due braccia motorizzate per permettere la nebulizzazione del prodotto, contenuto all'interno di un serbatoio nella parte posteriore della macchina. Un'altra particolarità è la specificità del prodotto, in quanto le sue dimensioni sono appositamente studiate per la coltivazione della fragola [17].



Figura 1.8: Applicazione di un robot versatile per l'irrorazione [18]

Questa applicazione, visibile in figura 1.8, è specifica per la distribuzione di concimi o pesticidi allo stato liquido all'interno delle serre. La piattaforma utilizzata per questa funzione è versatile ed adattabile ad una serie di applicazioni diverse; è caratterizzata da un payload di 200 kg e una velocità massima di 3 km/h. I cingoli permettono di raggiungere una pendenza fino a 30° e un basso compattamento del suolo [18].

Capitolo 2

Progettazione AgriMaRo

2.1 Progettazione funzionale

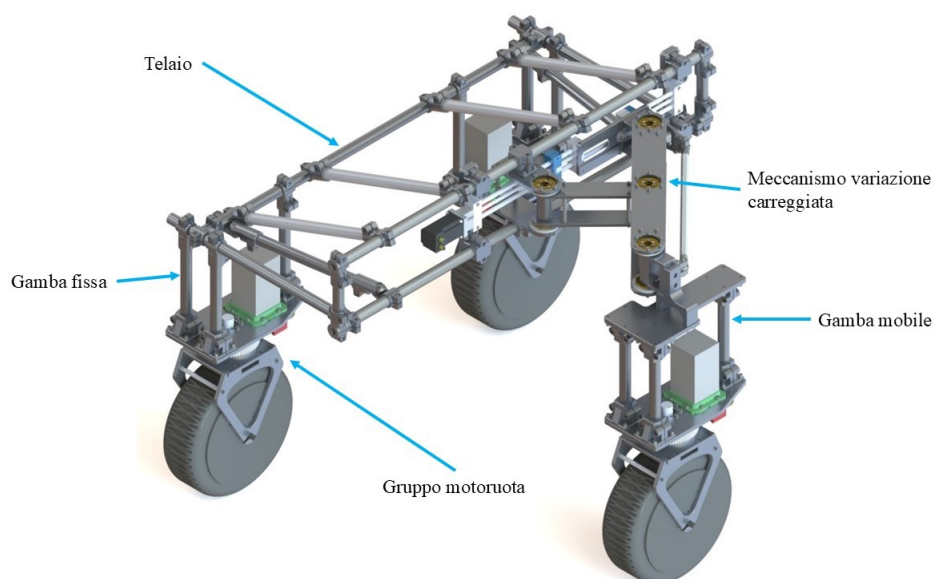


Figura 2.1: Rappresentazione CAD di AgriMaRo

AgriMaRo nasce come un robot versatile, in grado di poter modificare le proprie dimensioni ed adattarsi a diversi terreni, attrezzature ed esigenze. Infatti, è possibile

suddividere il complessivo del robot nelle seguenti sezioni, come visibile in figura 2.1:

- Telaio

- Meccanismo variazione carreggiata

- Gamba (fissa e mobile)

- Gruppo motoruota

Lo scheletro del robot è composto da tubi in alluminio e morsetti di collegamento. L'obiettivo di questa struttura è quello di reggere le sollecitazioni imposte dal terreno, il peso stesso della componentistica del robot e dell'attrezzatura ad esso collegata. A corredo della parte superiore della macchina è presente il meccanismo di variazione della carreggiata, atto a renderne possibile l'adattamento rispetto alla larghezza tra le file all'interno della serra per una determinata coltivazione ortofrutticola. I sistemi che permettono al robot di effettuare i movimenti per i quali è stato ideato, cioè la variazione della carreggiata ed il moto omnidirezionale rispetto al terreno, sono principalmente due: il meccanismo piano di variazione della carreggiata e il gruppo motoruota, che verranno di seguito esposti in dettaglio.

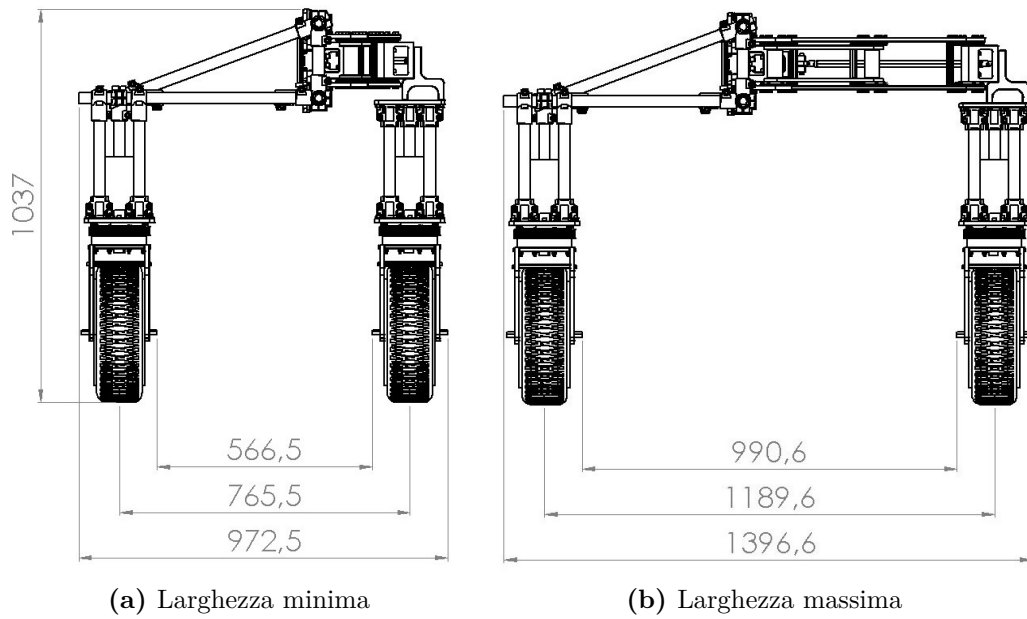


Figura 2.2: Larghezza AgriMaRo

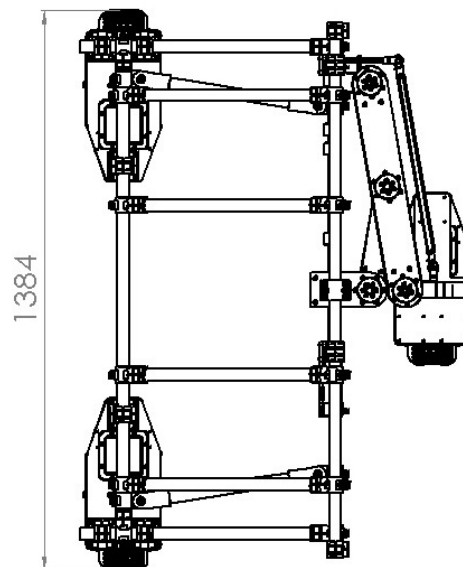


Figura 2.3: Lunghezza AgriMaRo

Per quanto riguarda le dimensioni e gli ingombri, come si può notare dalle

immagini precedenti, figure 2.2 e successiva, AgriMaRo ha un'altezza di 1037 mm e una lunghezza di 1384 mm. La larghezza di ingombro dipende dalla posizione del carrello sulla guida lineare e varia da un minimo di 972,5 mm ad un massimo di 1396,6 mm. Per realizzare tale spostamento il carrello, unitamente alla guida IGUS, percorre una corsa di 422 mm. Riferendosi invece alla carreggiata, essa varia tra un minimo di 765,5 mm e un massimo di 1189,6 mm. La luce effettivamente disponibile tra le due unità, fissa e mobile, ha una larghezza compresa tra 566,5 mm e 990,6 mm.

2.1.1 Meccanismo di variazione della carreggiata

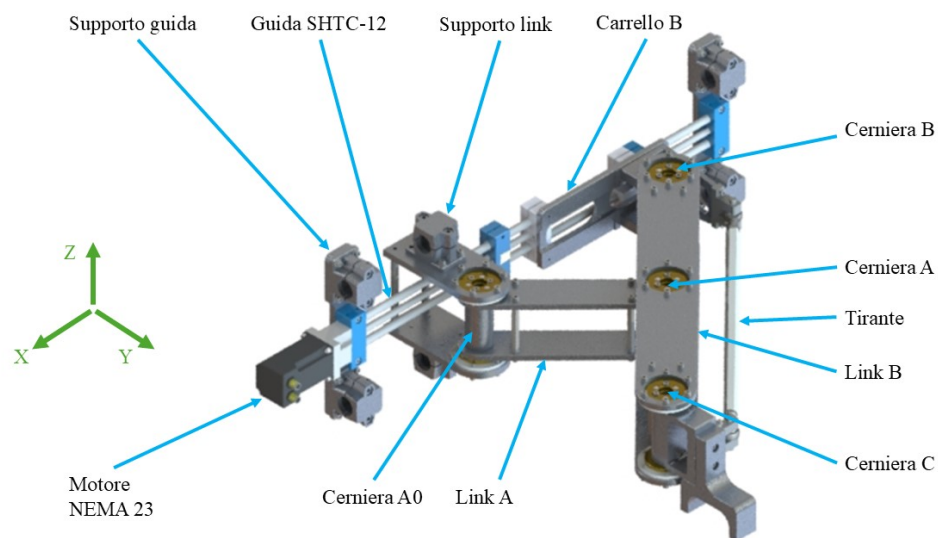


Figura 2.4: Rappresentazione CAD del meccanismo

Il meccanismo selezionato, visibile in figura 2.4, va a minimizzare l'ingombro occupato, il numero di link e cerniere, massimizzando allo stesso tempo la resistenza meccanica, in quanto esso ha anche funzione strutturale di collegamento tra il telaio e la ruota mobile. L'origine di tale cinematismo è dovuta a Scott-Russel e si può

trovare in letteratura sotto il nome di "meccanismo a croce". Quest'ultimo, applicato alla struttura del robot, permette di effettuare una traslazione perfettamente lineare nel piano x-y del modulo gamba mobile con il gruppo motoruota ad esso associato. Come si può osservare in figura 2.4, sia la guida che i link del meccanismo sono assicurati al telaio tramite appositi supporti, costituiti da una parte di lamiera in alluminio e dal raccordo di giunzione per connettere la lamiera con il profilo tubolare del telaio. Il carrello B , il quale porta in movimento l'omonima cerniera, è vincolato in due punti alla guida lineare, corrispondenti alle parti mobili della stessa. La prima contiene una madrevite che si accoppia con la vite messa in rotazione dal motore stepper NEMA 23, la seconda folle e avente la sola funzione di sostegno del carrello. Durante il movimento di allargamento della carreggiata, il carrello viene fatto traslare nel verso positivo dell'asse X ; questo provoca una rotazione combinata dei link A e B tale da muovere la cerniera C lungo l'asse Y con verso positivo. Il compito del tirante è quello di mantenere costante l'orientamento dell'elemento connesso alla cerniera C per tutta la durata del movimento, realizzando di fatto un moto di pura traslazione. In questo modo, il robot potrà effettuare il cambio di larghezza di carreggiata mantenendo la struttura della gamba mobile sempre parallela al telaio della macchina, evitando disallineamenti e rotazioni indesiderate della ruota rispetto al terreno.

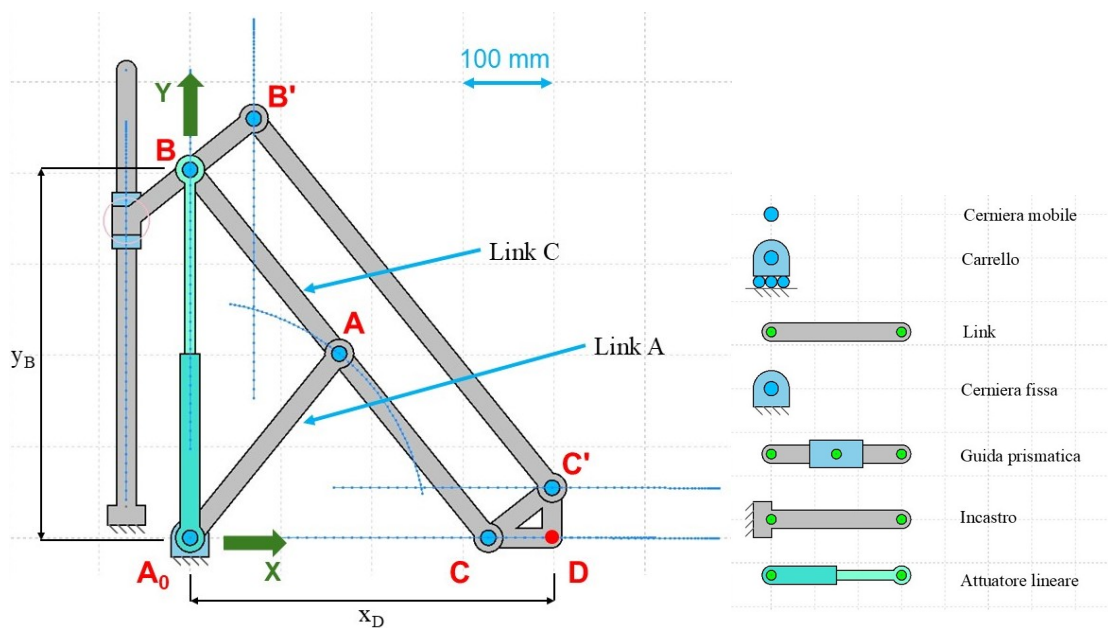


Figura 2.5: Schema funzionale del meccanismo a croce [19], [20]

L'azionamento dell'intero sistema si riduce ad un unico grado di libertà di traslazione. Per una migliore comprensione del meccanismo si riporta lo schema di figura 2.5, nel quale la guida lineare è rappresentata dall'attuatore lineare in verde acqua, il quale percorre una corsa per poter effettuare il movimento del meccanismo. Le traiettorie seguite dalle varie cerniere presenti nel meccanismo sono indicate con le linee di color celeste in figura. Nel modello reale è stata selezionata una guida lineare della IGUS [21], nello specifico il modello SHTC-12 abbinato ad un motore NEMA 23.

Per comprendere a fondo la scelta di questo meccanismo e le proprie caratteristiche, occorre analizzare la relazione esistente tra il moto della guida lineare e quello del gruppo mobile del robot, cioè rispettivamente i punti B e D indicati in figura 2.5.

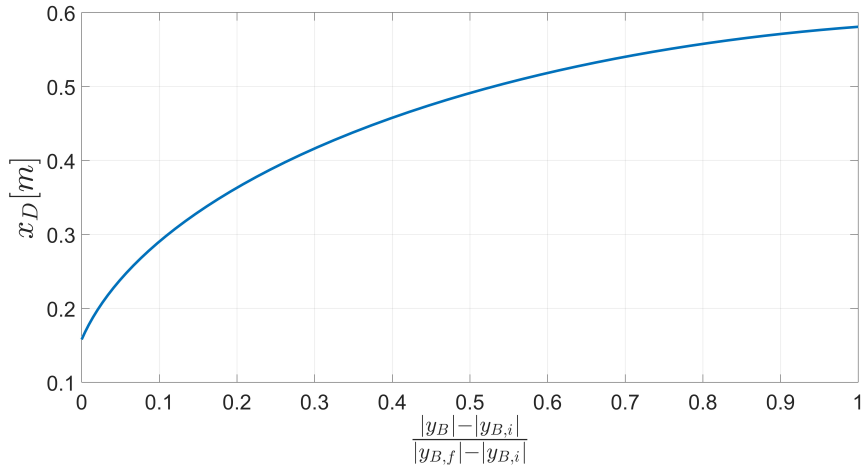


Figura 2.6: Relazione tra x_D e y_B normalizzato [20]

Nel grafico di figura 2.6, in ascissa viene riportata la corsa dell'attuatore normalizzata e, in ordinata, la posizione del punto D sull'asse X . Si specifica che il pedice "i" indica la posizione più compatta del meccanismo, mentre il pedice "f" quella più estesa. Di fatto, l'asse delle ascisse rappresenta la posizione dell'attuatore come frazione della sua stessa corsa totale, per una migliore comprensione del grafico. Per quanto riguarda le velocità dei due punti durante il loro movimento, si definisce una grandezza con il simbolo τ , chiamata rapporto di trasmissione e che rappresenta, in questo caso, il rapporto tra i vettori velocità di D e di B [20]:

$$\tau = \frac{\vec{v}_D}{\vec{v}_B} \quad (2.1)$$

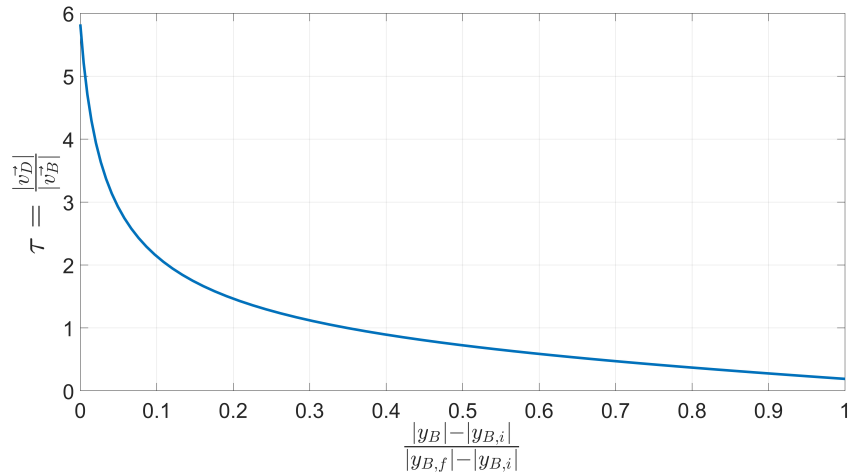


Figura 2.7: Rapporto di trasmissione rispetto a y_B normalizzato [20]

Dal grafico di figura 2.7 si osserva come, concluso il tratto iniziale della corsa, il rapporto tra le velocità dei due punti è sufficientemente vicino all'unità. L'andamento iniziale è giustificato dal fatto che, nella posizione compatta, le cerniere A_0 e C sono molto vicine ed un piccolo spostamento di B provoca una grande traslazione di D . Contrariamente, quando il meccanismo si avvicina alla posizione più estesa, ad una grande variazione della posizione di B corrisponde una piccola traslazione di D . Questo comportamento è dovuto alla particolare geometria del meccanismo di Scott-Russel.

Di seguito si riportano le principali informazioni tecniche riguardo al meccanismo con l'ausilio di alcune tabelle riassuntive. Si noti che nello schema di figura 2.5 viene rappresentato il meccanismo in una sua posizione intermedia generica. In tabella si farà riferimento alle distanze dei punti B e D dall'origine lungo i rispettivi assi di movimento in due situazioni distinte: meccanismo compatto, con pedice "i" e meccanismo esteso, con pedice "f" [20].

Nome	Dimensione [mm]
Link A	260
Link C	520
$y_{B,i}$	512.5
$y_{B,f}$	90.5
$x_{D,i}$	158
$x_{D,f}$	582
Corsa	422

Tabella 2.1: Dimensioni meccanismo

Nome	Valore
Modello	IGUS SHTC-12
Corsa [mm]	620
Carico radiale [N]	2800
Carico assiale [N]	700

Tabella 2.2: Caratteristiche guida lineare [21]

Nome	Valore
Modello	IGUS Nema 23
Coppia max [Nm]	2
Corrente nominale [A]	4.2

Tabella 2.3: Caratteristiche motore della guida [21]

2.1.2 Sistema moto-sterzante

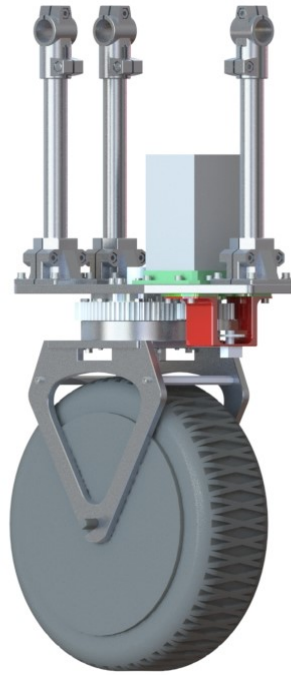


Figura 2.8: Render CAD sistema moto-sterzante

Nella parte inferiore del robot è posizionato il sistema di sterzo e di trazione, che è a sé stante per ognuna delle 3 ruote, rappresentato in figura 2.8. Nello specifico, la parte rotante è completamente al di sotto della parte tubolare, al fine di evitare di portare in rotazione i profili tubolari su cui grava il peso del robot stesso. Di seguito si riporta uno schema iniziale semplificato, per capire meglio il funzionamento dello sterzo della singola motoruota.

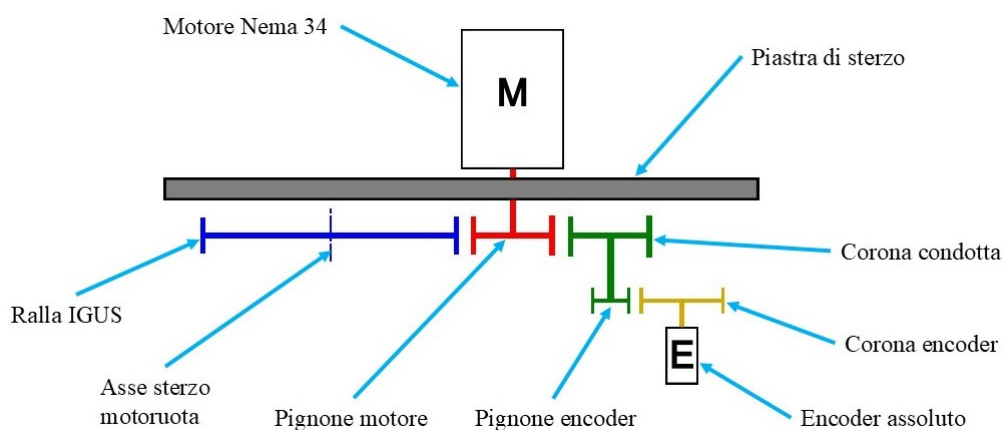


Figura 2.9: Schema semplificato dello sterzo

Come visibile in figura 2.9, il gruppo sterzante è costituito da un insieme di ingranaggi. In particolare, rispetto alla piastra di montaggio dello sterzo, l'asse sterzante della motoruota è posizionato sulla sinistra. La motricità viene fornita, invece, da un pignone motore, collegato direttamente al Nema 34, indicato con la lettera "M". Dalla parte opposta, una corona si occupa di prendere motricità dall'asse motore e fornire la rotazione all'encoder, tramite un'ulteriore coppia di ruote dentate che, grazie al proprio rapporto di trasmissione, riporta la velocità dell'asse dell'encoder, indicato con la lettera "E", al valore corretto per leggere la rotazione effettiva di sterzo della motoruota. Per approfondire il metodo con cui viene montato il complessivo del sistema moto-sterzante, di seguito si riporta un esploso dello stesso.

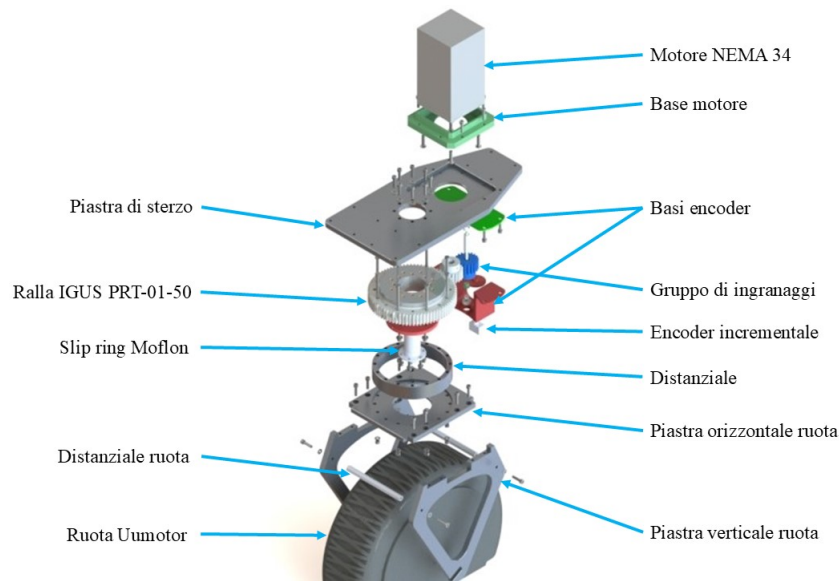


Figura 2.10: Esploso del sistema moto-sterzante

Partendo dall'alto, nella figura 2.10 è presente il motore NEMA 34 di IGUS, in grado di erogare una coppia fino a circa 10 Nm a bassi regimi. Per poter adattare la geometria esterna del motore alla piastra di sterzo è stato previsto un adattatore di materiale plastico, realizzato con stampa 3D, per poter rendere semplice l'eventuale cambio di taglia del motore, richiamando il concetto di flessibilità e modularità, ma allo stesso tempo garantire un perfetto accoppiamento con la piastra stessa. Al di sotto della piastra di sterzo, in corrispondenza dell'asse di sterzo è presente la ralla IGUS PRT-01-50. Quest'ultima permette di scaricare direttamente sulla ruota tutto il peso gravante sulla piastra e, allo stesso tempo, consentire una rotazione relativa tra la parte superiore fissa e la parte inferiore mobile, svincolando in questo modo i due sottosistemi. Un vantaggio di questo prodotto è il foro centrale di 50 mm che permette il passaggio del collettore per i cavi di alimentazione della motoruota. Il carico statico assiale massimo è di 40 kN e la dentatura esterna è di tipo DIN3967. Queste caratteristiche garantiscono una elevata resistenza meccanica, sia assiale che all'usura dei denti. Inoltre, la parte scorrevole di questo componente è realizzata

in un materiale autolubrificante brevettato da IGUS e chiamato iglidur®; ciò fa sì che venga evitato qualsiasi tipo di lubrificazione esterna, abbassando notevolmente la frequenza degli interventi di manutenzione e diminuendo il rischio di usura per una eventuale mancanza di lubrificante. Procedendo verso il basso, nell'immagine si trova un oggetto di colore rosso che rappresenta un adattatore per avvitare il collettore dei cavi alla ralla. Anch'esso è realizzato con la tecnica della stampa 3D ed è in materiale plastico. Ne risulta un componente economico e vantaggioso in quanto non reperibile sul mercato. Infatti, questo tipo di assemblaggio ha un alto livello di customizzazione in quanto coinvolge componenti di diversi marchi e materiali, perciò sorge l'esigenza di adattare i particolari per far sì che si possano assemblare. Si giunge quindi alla descrizione del collettore, nello specifico si tratta del MW1630 di Moflon [22]. Questo oggetto ha il compito di raccordare i cavi che vanno ad alimentare la motoruota in modo da garantire la sterzata infinita. Infatti, svincola la parte statorica superiore dalla parte rotorica inferiore grazie a contatti striscianti interni. Il modello scelto supporta 6 cavi con una portata di corrente di 30 A. Le dimensioni di questo oggetto risultano idonee per questa applicazione specifica.

Un distanziale permette di compensare lo spazio creatosi a causa della presenza del collettore strisciante tra la ralla e la piastra orizzontale della ruota. Esso presenta 16 fori passanti in corrispondenza dei fori della ralla, in modo da permettere il passaggio dei bulloni di serraggio. La piastra orizzontale presente inferiormente chiude il pacchetto che tiene insieme ralla, distanziale e piastra stessa. L'adeguata forza di serraggio viene garantita da 8 bulloni M5x70; inoltre, uno scasso circolare nella parte superiore della piastra orizzontale della ruota garantisce il centraggio del distanziale nel momento del montaggio. L'accoppiamento della parte fissa della ralla con la piastra superiore di sterzo avviene per mezzo di 8 viti M6x16 disposte circonferenzialmente attorno al foro in cui è alloggiato il collettore. Anche in questo

caso, per comodità di montaggio è stata eseguita una tasca circolare nella parte inferiore della piastra.

Infine, per completare il gruppo motoruota, nella parte inferiore dell'immagine rappresentata in figura 2.10 sono presenti due piastre verticali che fungono da forcella per la motoruota. Esse sono vincolate alla piastra orizzontale per mezzo di 8 viti M5x20. Per ciò che riguarda la resistenza alla flessione laterale dovuta al moto di sterzo della ruota sono state inserite due unità di un componente di rinforzo chiamato in figura "distanziale ruota". Nello specifico si tratta di una barra esagonale della Misumi [23] con sede della chiave da 10 mm, lunga 134 mm e fori filettati M5 alle due estremità. Questa struttura è necessaria per dare sostegno alla motoruota KN6104 della Uumotor [24]. Quest'ultima risulta essere la più adatta a questo tipo di applicazione in quanto è in grado di trasmettere una coppia massima di 80 Nm quando alimentata a 48 V. Normalmente verrà considerato un valore massimo di coppia pari a 60 Nm, corrispondente all'alimentazione a 24 V; questo componente è in grado di sopportare un carico fino a 350 kg. Inoltre, il battistrada ha un particolare disegno che permette la trazione anche su terreni sconnessi come quello presente nelle serre.

Parallelamente all'asse di sterzo si trova un gruppo di ingranaggi che permette la misurazione dell'angolo di sterzo tramite un encoder. Per visualizzare meglio il sistema e comprendere il montaggio dei componenti, di seguito si riporta un'immagine dell'esploso dello stesso.

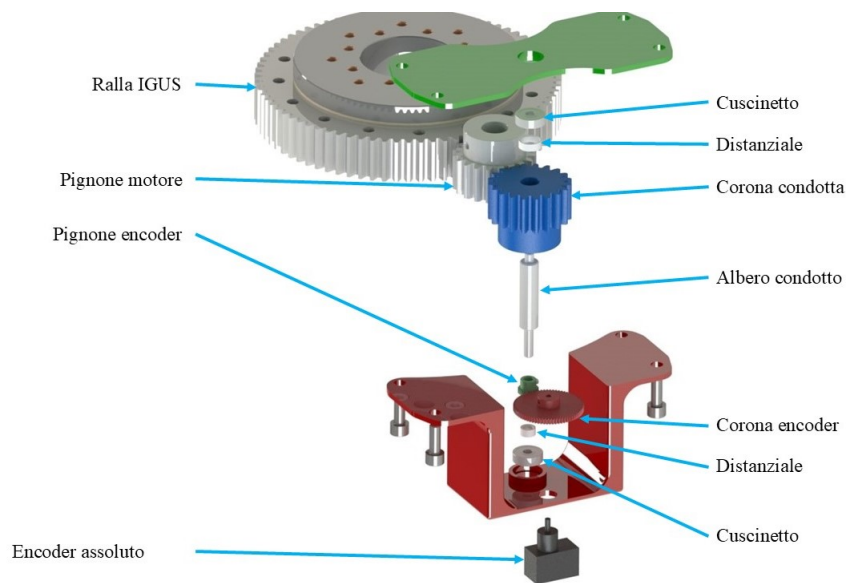


Figura 2.11: Dettaglio gruppo ingranaggi encoder

Per riuscire ad avere un segnale di feedback della rotazione compiuta dalla ruota è necessario andare ad introdurre un dispositivo in grado di effettuare questa misurazione; nello specifico è stato scelto un encoder assoluto. A questo punto sorge il problema di spazio per andare ad inserirlo sfruttando la motricità del motore di sterzo stesso, per cui si è deciso di utilizzare lo spazio presente sulla piastra di sterzo a fianco del motore. È stato possibile inserire un gruppo riduttore per poter rilevare le grandezze cinematiche riferite alla rotazione della ralla stessa, in modo tale da non avere rapporti di riduzione da gestire a valle del segnale dell'encoder. Osservando la figura 2.11, come anticipato la motricità viene presa dal pignone del motore NEMA 34, il quale ingrana con una ruota dentata equivalente, che però in questo caso funge da corona, entrambe con 20 denti. Sullo stesso asse di quest'ultima è presente un albero di trasmissione che permette il calettamento di un secondo pignone, avente anch'esso 20 denti, il quale ingrana con la corona da 78 denti, equivalente alla ralla montata sull'asse di sterzo. In questo modo si raggiunge il rapporto di trasmissione desiderato in uno spazio ridotto. Si specifica che il

pignone e la corona che trasmettono il moto all'encoder sono realizzati in materiale plastico al fine di evitare inutile peso aggiuntivo. Questo risparmio è permesso dal fatto che la coppia da trasmettere è pressoché nulla, al di là degli attriti interni all'encoder e tra le ruote dentate stesse. Di seguito, si riportano alcune tabelle per riassumere le informazioni tecniche relative ai componenti utilizzati in questo sottosistema.

Nome	Codice
Ralla IGUS	PRT-01-50-TO-ST
Pignone motore e corona condotta MISUMI	GEABG2.0-20-20-B-14
Pignone encoder MISUMI	GEABP0.5-20-3-B-5
Cuscinetti MISUMI	C-B625ZZ
Collettore MOFLON	MW1630
Motoruota UUMOTOR	KN6104

Tabella 2.4: Caratteristiche componenti commerciali

Nome	Valore
Modulo ruote di potenza [mm]	2
Modulo ruote di misura [mm]	0.5
Rapporto di trasmissione motore-ruota	3.9
N° denti ralla IGUS	78
N° denti pignone motore e corona condotta	20
N° denti pignone encoder	20
N° denti corona encoder	78
Velocità massima sterzo [rpm]	51.3
Raggio effettivo motoruota [mm]	167
Velocità massima motoruota [rpm]	200
Velocità lineare massima [m/s]	3.5
Coppia massima di sterzo a 25 rpm [Nm]	20.2
Coppia massima motoruota [Nm]	60

Tabella 2.5: Dati tecnici del sistema moto-sterzante

2.2 Progettazione esecutiva

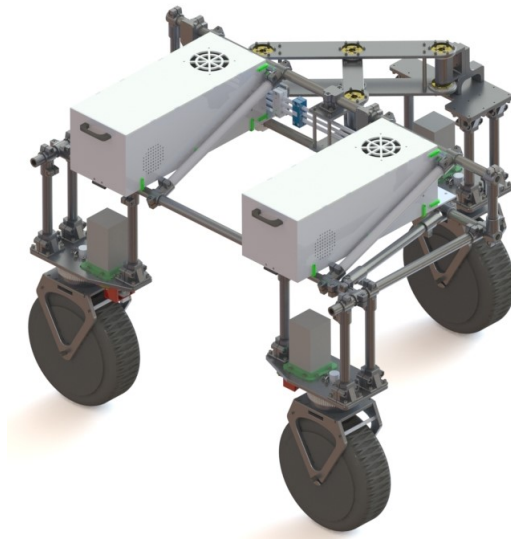


Figura 2.12: Render AgriMaRo esecutivo

In questa sezione verranno descritti più in dettaglio alcuni componenti che permettono di tenere insieme la struttura della macchina e farla funzionare correttamente, cioè il telaio tubolare e l'alloggiamento per la componentistica elettrica ed elettronica, visibili in figura 2.12.

2.2.1 Telaio tubolare

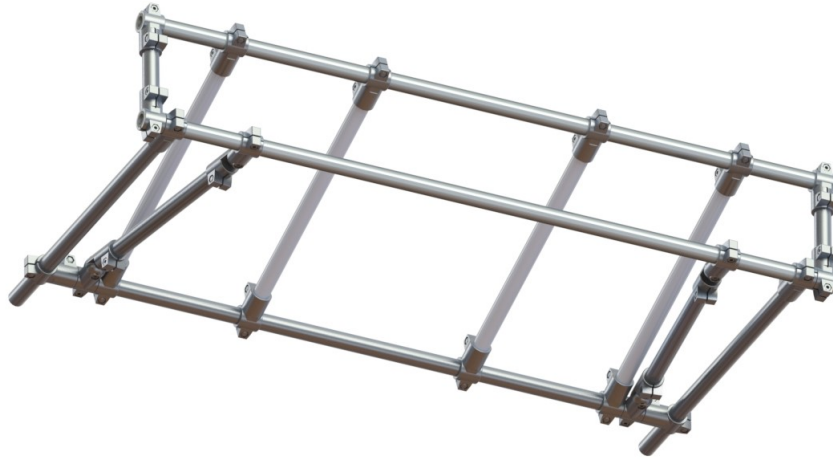


Figura 2.13: Render 3D telaio

Il telaio è composto da una serie di tubi in alluminio 6060 T5 della CO.ME.FI. Metalli [25] con sezione 30x5 mm, collegati tra loro da alcune tipologie di morsetti della Elessa [26]. Due tubi sono invece in acciaio INOX 304 con profilo 30x3 della Punto Metallo [27]. Da analisi FEM eseguite è emerso, infatti, che i due tubi presenti frontalmente, nella zona di collegamento tra il telaio ed il meccanismo di allargamento della carreggiata, risultano essere i più sollecitati. Per tale ragione sono gli unici ad essere realizzati con un materiale più resistente meccanicamente. Mentre, i tubi inclinati servono da rinforzo per mantenere perpendicolari tra loro le due pareti orizzontale e verticale della struttura. Pertanto, la sollecitazione principale a cui viene sottoposto il telaio è proprio quella di flessione dovuta al peso stesso dei componenti che lo costituiscono e quello dei componenti del meccanismo a croce. Gli unici punti in cui la struttura può scaricare le forze a terra, infatti, sono proprio le estremità, in quanto la zona centrale va lasciata libera per effettuare le lavorazioni sul terreno sottostante. Mancando quindi un appoggio centrale, il complessivo flette creando una freccia non trascurabile, soprattutto quando la macchina si trova nella condizione di carreggiata massima.

Nella tabella 2.6 vengono riportati i componenti commerciali utilizzati come morsetti e nella tabella 2.7, invece, si riportano le caratteristiche dei tubi customizzati.

Descrizione	Codice	Quantità
Morsetti di collegamento a T	GN 192-B30-B30-40-2-SW	16
Morsetti di collegamento girevoli	GN 288-B30-B30-S-2-BL	4

Tabella 2.6: Morsetti telaio

Materiale	Sezione [mm x mm]	Lunghezza [mm]	Quantità
AISI 304	30x3	1330	2
Alluminio L6060 T5	30x5	1165	1
Alluminio L6060 T5	30x5	600	2
Alluminio L6060 T5	30x5	385	2
Alluminio L6060 T5	30x5	525	4
Alluminio L6060 T5	30x5	132	2

Tabella 2.7: Tubi telaio

2.2.2 Alloggiamento parti elettriche ed elettroniche

Essendo AgriMaRo una macchina progettata per lavorare in ambienti con scarso livello di pulizia come le serre, anche la componentistica che lo costituisce e che permette di realizzare tutte le sue funzionalità e movimenti deve essere adeguatamente protetta.

Escludendo lo spazio presente inferiormente al portale del robot, dedicato ovviamente ai tool ad esso attaccato ed alle lavorazioni da svolgere in campo, occorre prevedere una locazione più appropriata. Un altro vincolo è l'altezza, in quanto se ci si estende troppo in verticale si rischia di andare a compromettere la stabilità del robot in condizioni di pendenza. La parte di telaio centrale compresa tra i due tubi inclinati viene preservata, altresì, per l'applicazione di un eventuale serbatoio per la distribuzione del fertilizzante, come verrà esposto più in dettaglio nel prossimo

capitolo. Rimangono perciò i due spazi presenti tra i tubi inclinati centrali e quelli laterali da sfruttare. Questa risulta infatti una collocazione comoda per l'operatore in quanto si colloca ad un'altezza facilmente raggiungibile con le mani e allo stesso tempo non è troppo in vicinanza della zona di *workspace* del robot. Inoltre, l'altezza non è tale da compromettere la stabilità. L'idea di introdurre questo alloggiamento nasce nuovamente dal concetto di flessibilità e modularità che contraddistingue questo progetto. Tale spazio, infatti, è utile per alloggiare il pacco batterie ed eventualmente sostituirlo in campo, ma allo stesso tempo l'obiettivo è quello di contenere tutte le componenti elettroniche fragili le quali, se esposte, potrebbero danneggiarsi.

Per facilità di comprensione si riporta di seguito, in figura 2.14, un render 3D del complessivo costituente il progetto del carter di alloggiamento delle parti elettriche ed elettroniche.

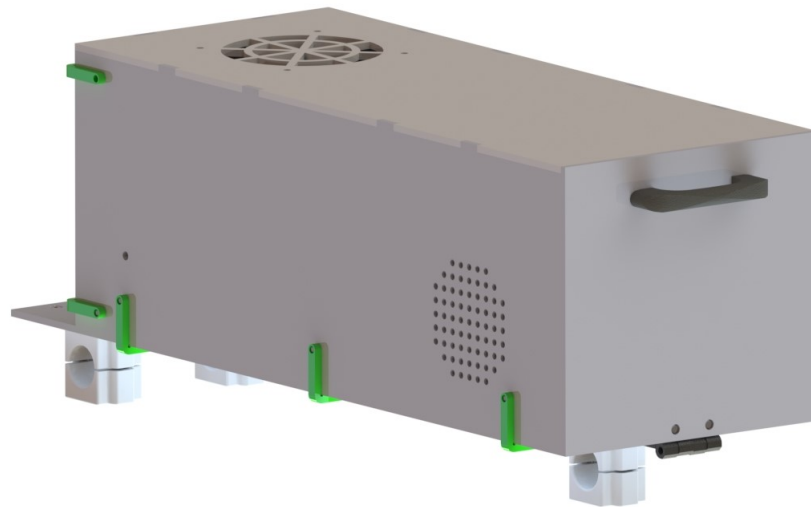


Figura 2.14: Render 3D alloggiamento parti elettriche ed elettroniche

Per prima cosa sono state rilevate le quote di massima per l'ingombro della parte utile di appoggio della scatola, per poter capire ciò che è possibile alloggiare al suo interno, ma soprattutto la geometria da attribuire ai componenti che costituiscono il

complessivo. Attenzione particolare va dedicata allo spazio per il libero movimento del carrello della guida lineare e ai punti di appoggio del componente, per i quali è solo possibile sfruttare i tubi del telaio. In figura 2.15 vengono rappresentate in rosso le zone di posizionamento della scatola e le quote dello spazio massimo sfruttabile per l'inserimento del componente.

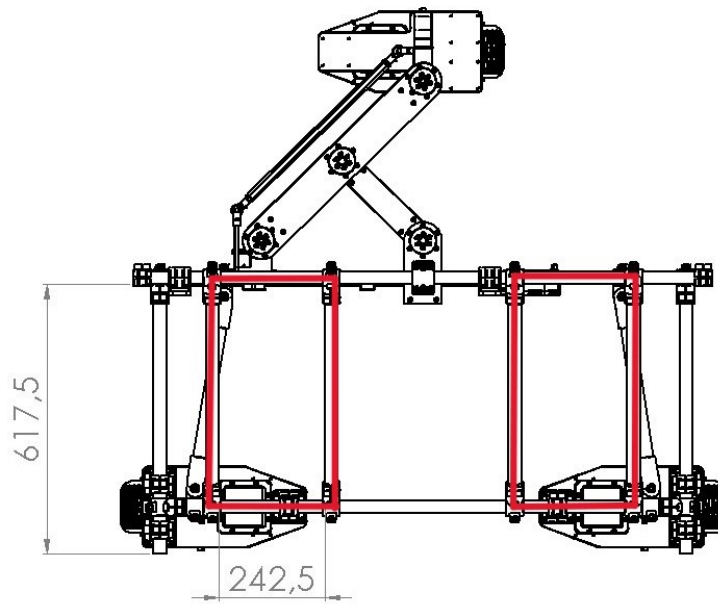


Figura 2.15: Dimensioni della superficie disponibile per l'alloggiamento

In funzione dello spazio libero sui tubi frontali e posteriori, è stato scelto di creare due punti di appoggio sul tubo inferiore di acciaio, posizionato frontalmente e un punto di appoggio sul tubo di alluminio posteriore. Per poter permettere l'appoggio della superficie piana costituente il fondo della scatola sulla superficie circolare dei tubi sono stati creati dei morsetti simili a quelli utilizzati per i tubi stessi, ma in materiale plastico e realizzato con la tecnologia di stampa 3D, in quanto sostanzialmente non hanno particolari sollecitazioni a cui resistere, ma devono solamente tenere in posizione la scatola e fare in modo che non scivoli sul tubo. In

figura 2.16 viene riportata un'immagine rappresentativa di tali componenti.

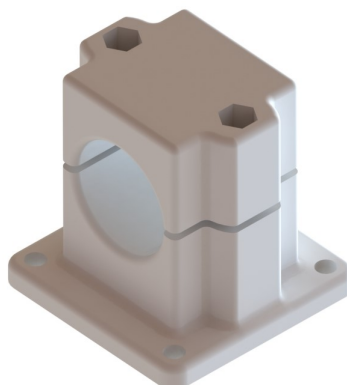


Figura 2.16: Render morsetto

All'interno dei fori passanti esagonali andranno posizionati i bulloni per il serraggio. I fori presenti ai quattro vertici del solido servono invece per connettere il fondo della scatola al morsetto stesso e al loro interno, similmente agli altri, è inseribile un inserto filettato M4 per permettere il serraggio delle viti di collegamento. L'oggetto è scomponibile in due parti, ciò agevola il montaggio e lo smontaggio rapido senza dover scollegare i tubi del telaio.

Il fondo della scatola è la parte più estesa in quanto, come già detto, permette il collegamento ai tubi del telaio. Le pareti verticali si sviluppano solo all'interno dell'area evidenziata in figura 2.15 per una superficie di 581,5 x 225 mm. Sono presenti tre pareti laterali fisse e una al fondo che funge da sportello. Quest'ultimo è incernierato al fondo della scatola nella parte inferiore e ha la possibilità di ruotare di 90°. All'interno della scatola si trova il piano effettivo di appoggio, sostenuto da una guida telescopica che permette la fuoriuscita del piano stesso rispetto alla scatola in modo da rendere agevole l'accesso diretto alla componentistica che è contenuta al suo interno. La guida ha una corsa utile di 406 mm e un carico massimo di 152 N; tali caratteristiche la rendono perfetta per questa applicazione in quanto c'è la necessità di una grande traslazione siccome il piano scorrevole è

molto lungo e inoltre vi saranno alloggiare le batterie, le quali avranno un peso non trascurabile. Il tutto viene chiuso superiormente da un coperchio richiudibile per mezzo di particolari leve di chiusura a scatto che applicano una pressione sul coperchio stesso, agendo su una scanalatura. Questa stessa tipologia di leva viene altresì utilizzata per chiudere lo sportello laterale. Una eventuale evoluzione di questo sistema può essere l'introduzione di guarnizioni di tenuta che evitino il trafileamento dell'acqua all'interno della scatola.

Un ulteriore dettaglio dell'alloggiamento sta nel sistema di circolazione dell'aria. Infatti, sul coperchio è stato predisposto un foro per l'inserimento di una ventola di raffreddamento; quest'ultima ha il compito di prelevare l'aria fresca presente nell'ambiente esterno tramite due feritoie ricavate sulle due pareti laterali e poste nella parte bassa dell'oggetto ed espellerla nella parte superiore. Tale processo è utile per portare via il calore in eccesso che potrebbe svilupparsi all'interno della scatola a causa dei componenti elettronici presenti. Lo spazio effettivamente disponibile per la disposizione della componentistica interna presenta una superficie di 570 x 210 mm e l'accesso è garantito in modo semplice con l'estrazione del cassetto dal fondo della scatola. Se invece vi è la particolare esigenza di dover lavorare su alcuni cablaggi è altresì possibile estrarre superiormente il coperchio e avere tutta la superficie libera per lavorare.

Per tenere insieme le pareti verticali e connetterle al fondo della scatola sono previste delle staffe a "L" con due viti ciascuna. Essendo in materiale plastico, come peraltro tutte le pareti ed il fondo della scatola, occorre inserire degli inserti filettati per poter avvitare le viti di serraggio. Di seguito si riportano alcune immagini che rappresentano le varie parti costituenti l'assemblato finale visibile in figura 2.14.

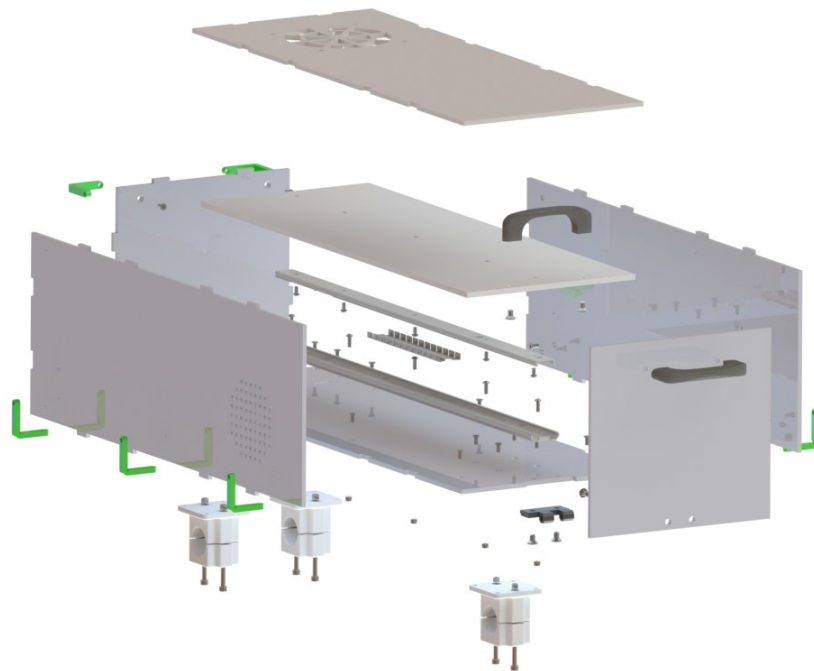


Figura 2.17: Esploso scatola

In figura 2.17 sono visibili i singoli componenti che costituiscono l'assemblato, mentre in figura 2.18 è rappresentato il complessivo nella sua configurazione aperta, quindi a macchina ferma.

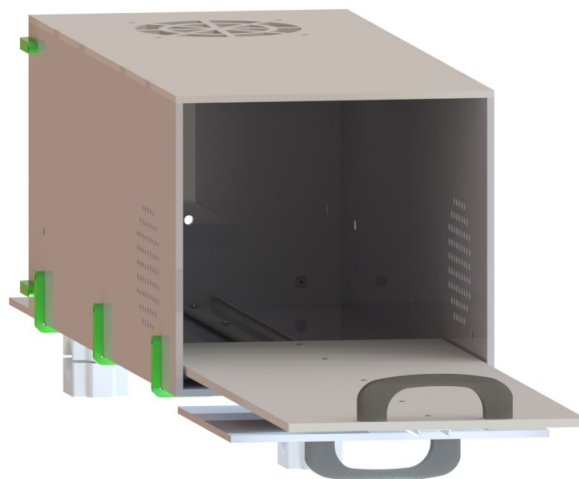


Figura 2.18: Scatola in configurazione aperta

2.3 Alimentazione e controllo della macchina

In questa parte l'obiettivo è la descrizione dei componenti usati per permettere l'alimentazione elettrica ed il funzionamento dei sistemi di bordo di AgriMaRo. Questo robot è composto da diversi sottosistemi che devono svolgere differenti funzioni, come dare motricità alla macchina, poter regolare la carreggiata, svolgere manovre in spazi ristretti e interfacciarsi con gli attrezzi/tool operanti direttamente sul campo. L'obiettivo che viene perseguito rimane quello di creare una macchina versatile e facilmente riconfigurabile; questo perchè essendo un prototipo, dovrà necessariamente essere rimaneggiato in futuro e quindi va tenuto presente che i sistemi di bordo devono poter essere montati e smontati agevolmente. L'impianto elettrico è quindi stato predisposto con questo spirito. Infatti, la comunicazione tra i vari sottosistemi è stata ideata per prevedere una comunicazione esterna tramite sistema CAN bus; ciò agevola particolarmente i collegamenti tra le varie sotto-unità e permette la trasmissione dei dati in modo molto veloce. Inoltre, è stata riservata particolare attenzione alla modularità dell'impianto; perciò, sono presenti predisposizioni per eventuali altri dispositivi non ancora presenti al primo avviamento. Tramite la connessione con bus, infatti, è possibile connettere attrezzature intelligenti con le quali il robot può scambiare direttamente dati in tempo reale. Si è inoltre pensato al vantaggio di avere prese elettriche aggiuntive di tipo civile ma anche USB, per una migliore versatilità. Per rendere più chiara l'idea di come è stato realizzato lo schema elettrico di questo robot, in figura 2.19 si riporta un breve schema con l'intenzione di rendere più comprensibile la spiegazione.

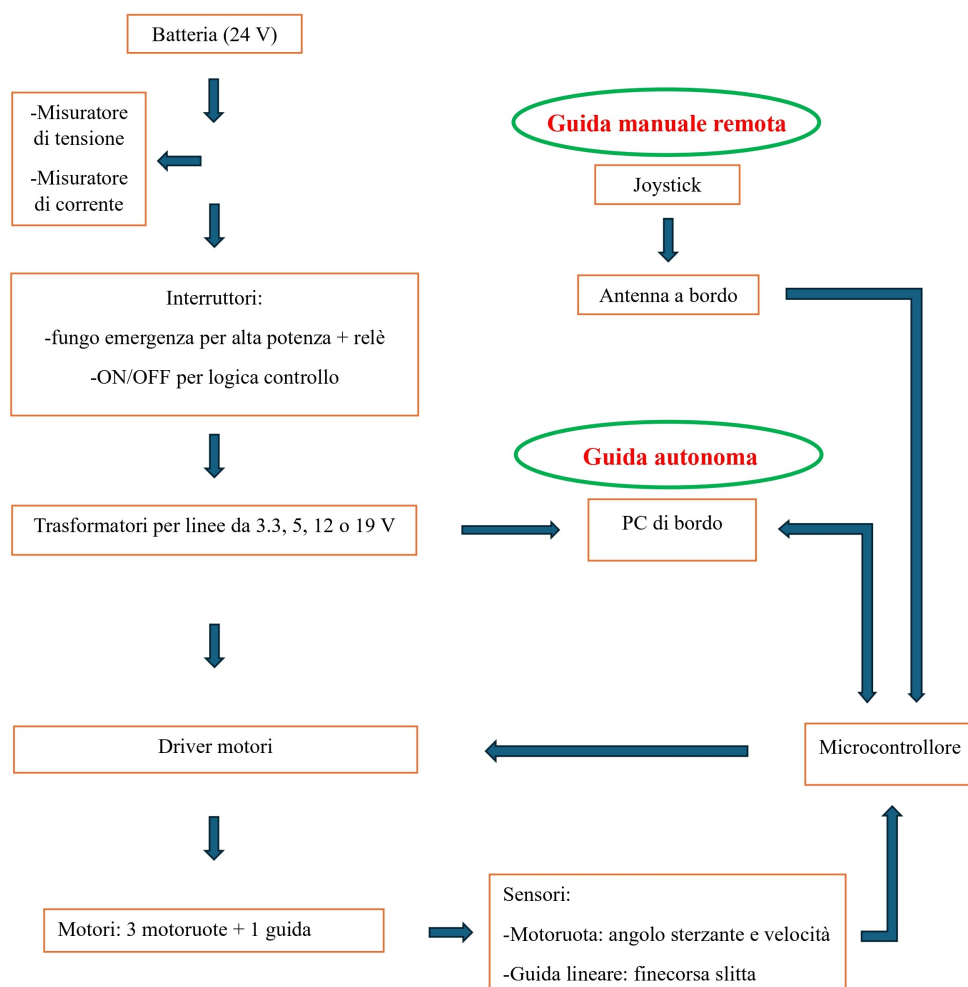


Figura 2.19: Flow-chart schema elettrico

Il flusso di potenza inizia dalla batteria a 24 V di tensione nominale. Per il dimensionamento iniziale di quest'ultima, sono state tenute in considerazione le utenze presenti a bordo della macchina, cioè i vari sottosistemi costituenti il robot. Nello specifico, sono stati presi come riferimento i motori di sterzo, le motoruote, il PC di bordo e un consumo aggiuntivo per sensori e prese di corrente. Si precisa che non è stato incluso il motore della guida lineare in quanto la frequenza di utilizzo di questo sottosistema non è tale da giustificare il conteggio in questa stima. Per arrivare ad ottenere un valore di capacità della batteria, sono stati

prima stimati i valori di corrente nominalmente consumata da ciascun sottosistema precedentemente citato. Questi dati sono stati presi direttamente come valore di corrente dai *datasheet* dei motori o dei dispositivi da alimentare, oppure derivati dai valori di potenza e tensione nominali. Di seguito si riporta una tabella riassuntiva dei dati ricavati.

Sottosistema	Corr. nominale [A]	N° unità	Corr. totale [A]
Motoruote	18	3	54
Sterzo	7	3	21
PC di bordo	6.32	1	6.32
Altro	1	1	1
Totale			82.32

Tabella 2.8: Dati di partenza

Nel caso delle motoruote, il valore nominale di corrente scelto è stato calcolato come il 60% di quella massima dichiarata dal costruttore; negli altri casi ci si è basati sui valori di potenza e tensione nominali.

A questo punto, per dimensionare correttamente la batteria, occorre definire un valore di corrente massima erogabile, arrotondando la cifra appena ottenuta: in questo caso 80 A. Considerando la contemporaneità di utilizzo dei sottosistemi presenti, si definisce un valore di corrente consumata in condizioni standard di funzionamento e pari al 30% del valore di corrente massima, corrispondente a 24 A. Quindi, tenendo conto di un'autonomia di 2 ore si ottiene una capacità pari a 48 Ah, arrotondata a 50 Ah, completando la procedura di dimensionamento. Per maggior chiarezza, si riportano i dati calcolati all'interno di una tabella riassuntiva, esposta di seguito.

Massima corrente erogabile (A)	80
Corrente consumata cond. standard (A)	24
Autonomia (h)	2
Capacità (Ah)	50

Tabella 2.9: Valori finali

Si specifica che questo dimensionamento si basa su una stima dei consumi del robot. Tali valori andranno confermati o modificati in base alle prove sperimentali svolte con la macchina. Inoltre, il volume utile disponibile per un singolo pacco batteria è identificato dallo spazio interno all'alloggiamento della componentistica elettrica ed elettronica e pari a 570 x 210 x 182,5 mm. Questo rappresenta un dato fondamentale da fornire al costruttore della batteria.

Per i primi esperimenti verrà, però, utilizzata una batteria di prova e successivamente ne verrà dimensionata una appropriata con l'obiettivo di raggiungere le 8 ore di autonomia. A valle della fonte di potenza sono presenti due sensori, utili a misurare la tensione e la corrente assorbita dall'intero impianto. Questi dati saranno molto importanti in futuro, durante le prove sperimentali, per ottenere una buona stima dei consumi della macchina. Seguono gli interruttori, i quali hanno principalmente un ruolo di sicurezza, in modo da proteggere le apparecchiature elettriche ed elettroniche presenti a valle della batteria, ma soprattutto l'operatore da eventuali guasti dell'impianto. In particolare, sono presenti tre tipi di interruttori:

- Fungo di emergenza per alta potenza
- Relè di alta potenza
- ON/OFF per la logica di controllo

Proseguendo nella direzione del flusso di potenza si trovano alcuni trasformatori utili a convertire la tensione di 24 V di alimentazione in tensioni più basse, in modo da poter fornire energia ai vari sottosistemi che necessitano di alimentazioni

differenti. A questo punto i collegamenti si suddividono sui diversi utilizzatori che necessitano di corrente elettrica. Principalmente, nota la struttura del robot, è necessaria una linea dedicata per l'alimentazione dei driver dei motori di trazione e del motore che permette la traslazione della guida lineare. Parallelamente viene alimentato il PC di bordo, organo fondamentale che serve per gestire i dati in ingresso e in uscita dalla macchina e per andare ad integrare la guida autonoma. Questo componente dialoga con il microcontrollore, il quale è il vero e proprio cervello della macchina. Quest'ultimo invia segnali di potenza ai driver dei motori ogni volta che ne necessitano e al contempo gestisce i feedback provenienti dai sensori montati direttamente sul campo. Nello specifico, sono presenti i seguenti sensori:

- Motoruota: misurazione angolo di sterzo con encoder e velocità ruota
- Guida lineare: finecorsa slitta guida lineare

Inoltre, non inclusi in questo elenco, vi sono quelli interni ai diversi sottosistemi che generano segnali di misura, letti dal microcontrollore. Lo scambio di dati tra il microcontrollore, il campo ed il pc di bordo permette il completo controllo della macchina; intendendo per campo l'ambiente esterno al robot, cioè il terreno su cui si muove e svolge le proprie mansioni.

Inizialmente AgriMaRo verrà predisposto per una guida manuale tramite un joystick controllato in modalità remota dall'operatore; un'antenna riceve quindi il segnale e lo invia direttamente al microcontrollore. In alternativa, come è stato accennato in precedenza, questo impianto prevede anche una predisposizione per la gestione di una guida autonoma. Infatti, essendo presente la predisposizione per un PC di bordo, quest'ultimo può andare a gestire direttamente il microcontrollore in funzione dei segnali che provengono dal campo tramite i vari trasduttori presenti. In questo caso è necessario, però, installare altri dispositivi che vanno a percepire l'ambiente circostante il robot e molti altri sensori in grado di comunicare i dati

in modo continuo al microcontrollore, al fine di gestire in autonomia tutta la piattaforma, a seconda delle condizioni in cui la macchina lavora.

Segue una descrizione più tecnica dell'impianto elettrico in figura 2.20, con una rappresentazione fisica dei collegamenti che andranno effettuati all'interno del PCB per poter andare ad alimentare e controllare la macchina come è stato appena descritto. Per esigenze grafiche lo schema viene riportato ruotato di 90° rispetto alla pagina. Si precisa inoltre che tale rappresentazione è stata fatta grazie all'utilizzo del software KiCad EDA della KiCad [28].

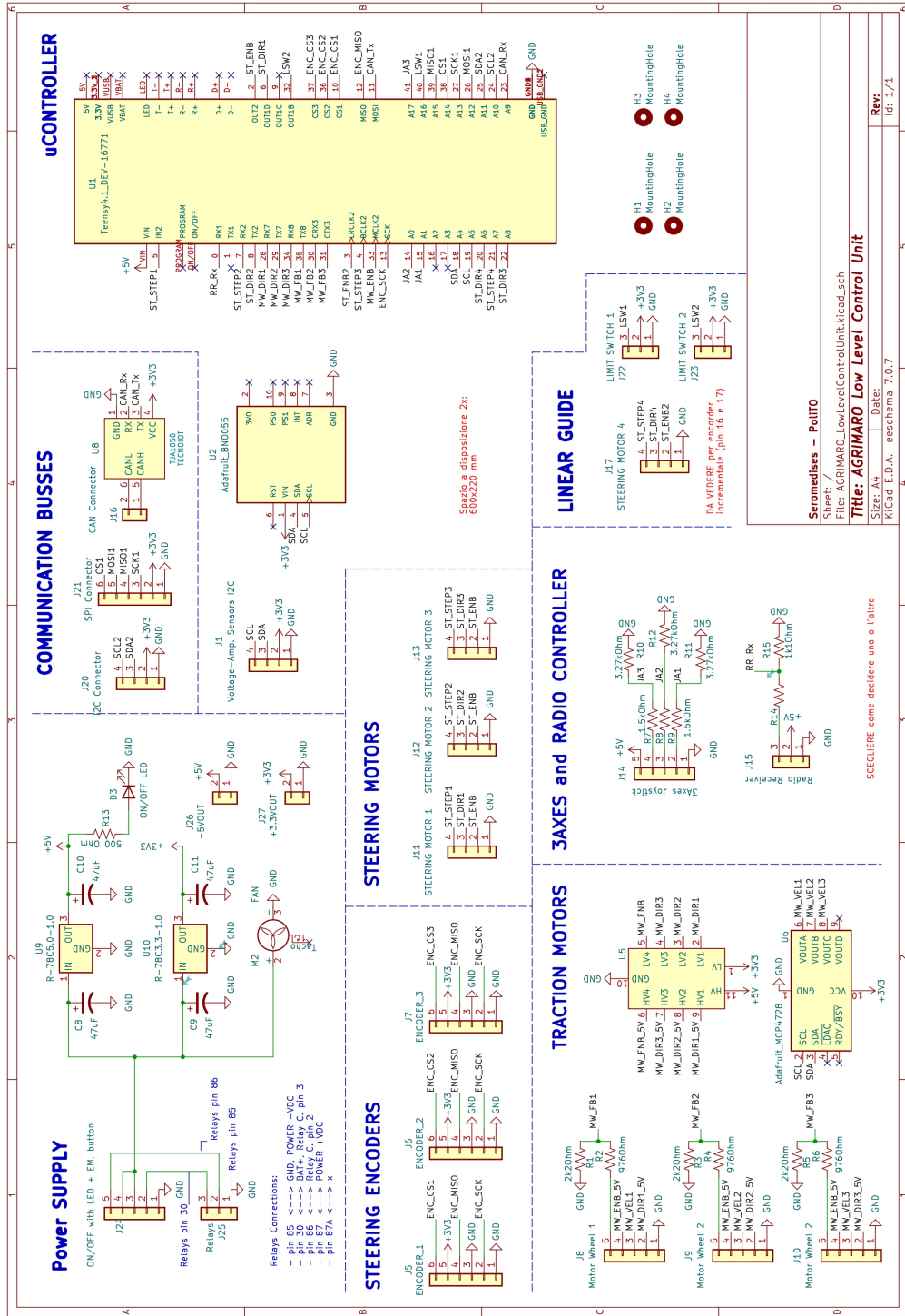


Figura 2.20: Schema elettrico
42

2.4 Cinematica e radio-comando del robot

Per il controllo del robot è necessario definire, innanzitutto, un sistema di riferimento ed una cinematica opportuni.

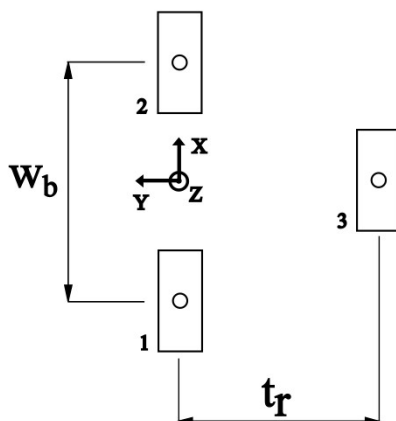


Figura 2.21: Sistema di riferimento del robot

Come si può notare dalla figura 2.21, le tre ruote sono i rettangoli numerati e l'origine del sistema viene chiamata b ; essa si trova sull'asse che congiunge le ruote 1 e 2, in corrispondenza della mezzeria dell'asse stesso. Le quote w_b e t_r rappresentano rispettivamente il passo e la carreggiata della macchina. Per quanto riguarda i comandi del joystick di movimento dei tre gruppi moto-sterzanti, di seguito si riporta una figura rappresentativa delle coordinate imposte come segnale di input.

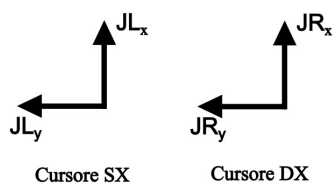


Figura 2.22: Coordinate joystick

I segnali letti dal cursore del joystick vengono internamente codificati da analogici

a digitali e inviati al microcontrollore tramite il radio-comando con un range di variazione tra 172 e 1811. Questo range di variazione viene poi convertito in un intervallo logico compreso tra -1 e 1 tramite il codice del microcontrollore. Nello specifico, i segnali descritti in figura 2.22 utili per la cinematica attuale del robot sono: JR_x , JR_y , JL_y .

Al fine di arrivare a definire la velocità lineare del robot nel piano xy , occorre convertire i segnali JR_x e JR_y nel modulo della velocità lineare, attraverso una funzione di mappatura.

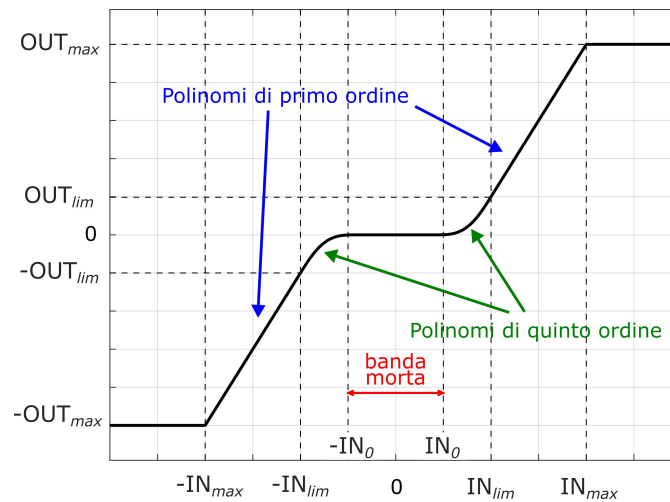


Figura 2.23: Mappa degli input

Dalla rappresentazione di figura 2.23 si nota come vi sia una banda morta centrale, in cui la variazione dell'input tramite il cursore del joystick non provoca una variazione dell'output. Proseguendo verso l'esterno, in entrambi i versi, è presente un tratto di salita del segnale avente l'andamento di un polinomio del quinto ordine. L'ultima parte di segnale fino ai limiti massimi è costituita da un tratto di salita lineare. Di seguito viene descritta la procedura di mappatura analiticamente.

Il risultato da ottenere è rappresentato dalle coordinate degli output, cioè il

vettore velocità scomposto sui due assi del sistema di riferimento del robot, come rappresentato in figura 2.24

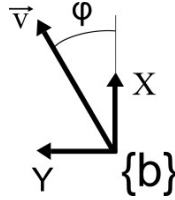


Figura 2.24: Sistema di riferimento della velocità

Il modulo del vettore velocità viene così definito:

$$\|\vec{v}\| = \text{map} \left(\sqrt{JR_x^2 + JR_y^2} \right) \quad (2.2)$$

Intendendo con *map* la funzione di mappatura descritta in figura 2.23. Osservando lo schema, è inoltre possibile ricavare l'angolo φ :

$$\varphi = \text{atan2}(-JR_y, JR_x) \quad (2.3)$$

Da cui si ricavano le componenti output della velocità lineare:

$$\begin{cases} \dot{x}_b = \|\vec{v}\| \cos(\varphi) \\ \dot{y}_b = \|\vec{v}\| \sin(\varphi) \end{cases} \quad (2.4)$$

Viene altresì calcolata la velocità angolare nell'origine b :

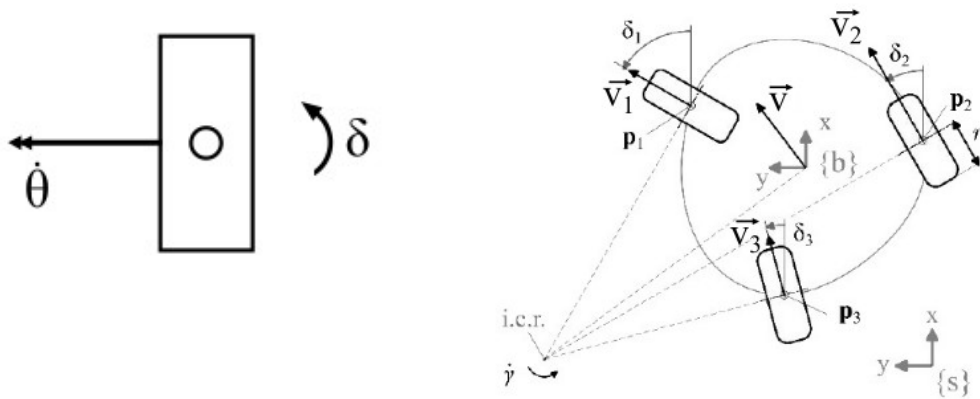
$$\dot{\gamma}_b = \text{map}(-JL_y) \quad (2.5)$$

A questo punto, al fine di comandare i motori di sterzo e le motoruote, è necessario effettuare l'inversione cinematica per trasformare le velocità lineari e quella angolare nell'origine b in angolo di sterzo e velocità angolare della motoruota, trasformando

le variabili esposte di seguito:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{y}_b \\ \dot{\gamma}_b \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

La convenzione utilizzata per la rotazione e lo sterzo della ruota e uno schema di movimento del robot sono raffigurati di seguito.



(a) Convenzione di segno ruota

(b) Schema di movimento del robot [29]

Si riportano, quindi, le equazioni necessarie a ricavare le componenti di velocità lineari per ciascuna ruota, secondo la convenzione dello schema precedente e nella figura 2.21.

$$\begin{cases} v_{1x} = \dot{x}_b \\ v_{1y} = \dot{y}_b - \dot{\gamma}_b \frac{w_b}{2} \end{cases} \rightarrow \|v_1\| \quad (2.7)$$

$$\begin{cases} v_{2x} = \dot{x}_b \\ v_{2y} = \dot{y}_b + \dot{\gamma}_b \frac{w_b}{2} \end{cases} \rightarrow \|v_2\| \quad (2.8)$$

$$\begin{cases} v_{3x} = \dot{x}_b + \dot{\gamma}_b t_r \\ v_{3y} = \dot{y}_b \end{cases} \rightarrow \|v_3\| \quad (2.9)$$

Infine, si riportano le equazioni per ricavare le coordinate per il controllo dei motori, cioè δ e $\dot{\theta}$.

Si specifica che le soluzioni di questa inversione cinematica sono 2, indicate con i pedici A e B , in quanto si ripetono ogni 180° di rotazione. La soluzione finale scelta dal controllo sarà quella con l'angolo δ più vicino a quello attuale. Per semplicità vengono scritte solamente le equazioni nel caso di una generica ruota i -esima; similmente si possono ricavare le altre.

$$\begin{cases} \delta_{i,A} = \arctan(v_{i,y}, v_{i,x}) \\ \delta_{i,B} = \delta_{i,A} + \pi \end{cases} \quad (2.10)$$

$$\begin{cases} \dot{\theta}_{i,A} = \frac{\|v_i\|}{r} \\ \dot{\theta}_{i,B} = -\dot{\theta}_{i,A} \end{cases} \quad (2.11)$$

A conclusione della presente sezione, viene riportato lo schema dei comandi del joystick, utilizzati per il controllo del robot durante i primi test di funzionamento.



Figura 2.25: Descrizione comandi joystick [30]

In figura 2.25, è rappresentato il joystick del radio-comando di AgriMaRo; nello specifico, il modello selezionato è il Taranis X-Lite Pro, di Frsky [30]. Come si può notare dall'immagine, questo modello rende disponibili diverse combinazioni di comandi, grazie alla presenza di due manopole orientabili a 360°, una coppia di interruttori bistabili, una coppia di interruttori a tre posizioni e due cursori con potenziometro. Nel caso del robot in questione, vengono utilizzate le due manopole per il comando dei motori di sterzo e delle motoruote. Gli interruttori a tre posizioni vengono usati per due scopi:

- Abilitazione e movimenti di apertura/chiusura del meccanismo per la variazione della carreggiata
- Abilitazione alla guida, blocco motori durante il funzionamento del meccanismo e predisposizione cambio carreggiata

Per quanto riguarda gli interruttori bistabili, ne viene utilizzato solamente uno e permette l'abilitazione o la disabilitazione dei motori di sterzo e motoruote;

esso funge da sicurezza all'accensione del ramo di potenza, per evitare iniziali movimenti anomali ed imprevisti. Nella parte centrale del joystick è, inoltre, posto il tasto di accensione e spegnimento del dispositivo di comando e lo schermo per la visualizzazione degli stati dei sottosistemi del joystick stesso.

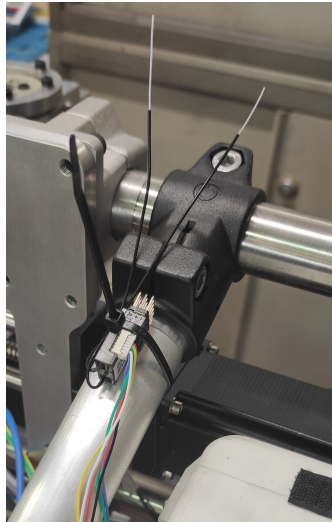


Figura 2.26: Ricevente radio-comando

In figura 2.26 si può osservare la ricevente del segnale radio proveniente dal joystick. Questo dispositivo si occupa di trasferire le informazioni di comando al microcontrollore posizionato sul PCB, al fine di impartire i corretti segnali ai sottosistemi presenti a bordo della macchina. Questo componente è stato posizionato su uno dei profili tubolari inclinati del telaio, in modo da rimanere in vista e relativamente lontano da eventuali disturbi provenienti dalla logica di controllo. Il protocollo di comunicazione utilizzato dal radio-comando è di tipo digitale e viene chiamato S-BUS.

Capitolo 3

Progettazione tool

Finora è stata presentata la struttura principale di AgriMaRo, cioè quella che permette al robot di muoversi. In questo capitolo verrà, invece, analizzato un aspetto più funzionale, cioè i sistemi che possono essere associati alla macchina per poter effettuare alcune lavorazioni in campo, nello specifico all'interno delle serre. L'obiettivo di questa parte è permettere ad AgriMaRo di raggiungere i requisiti del settore per il quale è stato progettato, cioè l'agricoltura di precisione e quindi permettergli di svolgere un compito, un'operazione sul campo, nel modo più preciso possibile ed ottimizzando le risorse a propria disposizione. In una prima parte viene analizzata la fattibilità delle lavorazioni in agricoltura in base alle capacità e caratteristiche della macchina; ciò porterà ad includere o escludere alcune operazioni da svolgere in serra. La seconda parte, invece, è di carattere progettuale. Inizialmente viene presentata una piattaforma di adattamento tra il telaio e l'attrezzo, che permette di integrare i due sottosistemi in funzione della configurazione assunta dal robot. Poi, vengono descritti i due sistemi principali, customizzati rispetto alle caratteristiche della struttura portante e trainante del robot, cercando di ridurre gli ingombri ed ottimizzare lo spazio a disposizione. La prima applicazione riguarda la gestione delle infestanti a ridosso della pianta e la

seconda la distribuzione precisa e localizzata di fertilizzante solido.

3.1 Valutazione di fattibilità delle lavorazioni

Prima di procedere con la parte progettuale di ciò che si va a connettere alla struttura di AgriMaRo, è necessario analizzare l'entità delle lavorazioni che si possono effettuare con questa macchina. In generale, l'esigenza di rendere leggero il robot, mantenendo il peso dei componenti ridotto, è in forte contrasto con la possibilità di svolgere lavorazioni pesanti, in quanto la componente peso del veicolo è fondamentale per la riuscita di queste ultime. Fin dall'inizio del progetto, già partendo dalla scelta di un telaio tubolare in alluminio, la linea da seguire è stata chiara, cioè quella di minimizzare i pesi al fine di poter muovere agilmente la piattaforma e compattare il meno possibile il terreno. Questo comporta un limite nella capacità di trazione del veicolo; quindi, le destinazioni d'uso sono da rapportare a questo limite. Vi sono alcune lavorazioni che risultano più impegnative a livello di richiesta di forza di trazione, come l'aratura o l'erpatura del terreno. Tali lavorazioni vengono eseguite durante la preparazione del terreno in vista della semina. Quest'ultima è un'operazione che può essere classificata come leggera, ma dipende molto dalla profondità di lavoro dell'elemento di semina. Infatti, il livello di difficoltà di una lavorazione rispetto ad un'altra è proprio determinato dalla resistenza che viene opposta dal terreno e tale parametro è proporzionale alla quantità di terreno spostato e dalla sua densità. Altre lavorazioni che non richiedono una grossa disponibilità di potenza trainante sono, per esempio, quelle di controllo delle infestanti e la loro estirpatura, in quanto viene lavorata solo la parte superficiale del terreno, spesso coinvolgendo una superficie limitata. L'obiettivo di questa sezione è fornire una valutazione di tipo quantitativo sul limite di forza trainante che è in grado di sviluppare il robot e, conseguentemente, capire meglio quale categoria di lavorazioni potrà andare ad effettuare. Per fare ciò, occorre

chiarire meglio il significato di aderenza attraverso la propria definizione e uno schema semplificato di quanto accade fra terreno e ruota [31].

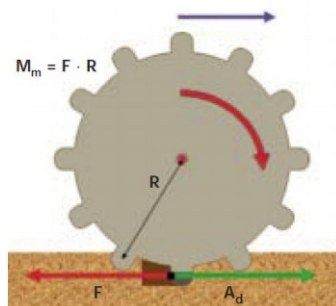


Figura 3.1: Schema ruota-terreno [31]

«Essa corrisponde alla reazione che il terreno esercita su una ruota motrice in risposta alle sollecitazioni che questa impone sul terreno stesso a seguito del momento motore di cui è dotata» [31]. Tale definizione è semplicemente la spiegazione di quanto è rappresentato nello schema di figura 3.1. Infatti, per il principio di azione e reazione, la ruota esercita un momento motore rispetto al terreno, generando così una forza tangente al punto di contatto con il terreno, di colore rosso, con verso opposto all'avanzamento della ruota, rappresentato in questo caso dalla freccia di colore blu. Di conseguenza, il terreno reagisce con la forza di colore verde, la quale rappresenta proprio la forza di aderenza. Di seguito, vengono indicati qualitativamente gli aspetti che migliorano l'aderenza [31]:

- L'entità della forza premente esercitata dalla ruota sul terreno, dovuta al peso del veicolo
- La grandezza della superficie di contatto tra la ruota ed il terreno
- L'altezza delle scanalature presenti sul battistrada
- L'entità delle forze interne presenti nel terreno, atte a compattare le particelle che costituiscono il suolo sottostante lo pneumatico

Si passa ora a descrivere quantitativamente ciò che rappresenta l'aderenza, indicata con il simbolo A_d . Tale parametro si esprime attraverso la seguente formula:

$$A_d = G_a \cdot c_a \quad (3.1)$$

Dove G_a indica il peso totale aderente della macchina e si esprime in N, mentre c_a rappresenta il coefficiente di aderenza ed è un valore adimensionale, compreso tra 0 e 1.

Occorre porre particolare attenzione al valore di G_a , in quanto dipende dalla tipologia e struttura del veicolo. Infatti, il modulo di questa variabile rappresenta solo la porzione di peso che effettivamente contribuisce alla trazione del veicolo. Per cui, nel caso in cui non tutte le ruote su cui poggia la struttura del veicolo fossero motrici, occorrerebbe proporzionare opportunamente la frazione di peso che effettivamente grava sulle ruote di trazione. Per esprimere matematicamente questo concetto si riporta la seguente espressione:

$$G_a = K \cdot G \quad (3.2)$$

In cui G rappresenta il peso totale del veicolo, mentre K è il parametro adimensionale che indica la frazione di peso gravante sulle ruote motrici, anch'esso varia da 0 a 1. Nel caso di AgriMaRo, tutte le tre ruote presenti sono motrici, pertanto $K = 1$ e di conseguenza $G_a = G$.

Per quanto riguarda il coefficiente di aderenza c_a , esso dipende da entrambi gli elementi che si trovano in contatto durante l'avanzamento della macchina, cioè nuovamente la ruota ed il terreno. I valori assunti da questo coefficiente sono di carattere empirico, pertanto sono solamente indicativi. Il valore reale di questo parametro è difficile da individuare perchè dipende da molti fattori che agiscono in concomitanza, come le condizioni ambientali quali umidità, temperatura, compattezza del suolo e così via. Anche le condizioni dello pneumatico costituiscono un fattore di variazione del coefficiente di aderenza. Alcuni esempi possono essere lo

stato di usura dello pneumatico, il disegno del battistrada, la pressione di gonfiaggio. Una regola generale che si può adottare per questo parametro è che all'aumentare dell'umidità e al diminuire della compattazione del suolo, c_a diminuisce.

Occorre ora specificare che, durante la lavorazione, non va considerato il valore di aderenza nella sua totalità, bensì una parte viene persa a causa della resistenza all'avanzamento del veicolo trainante. Infatti, l'aderenza può essere riscritta come segue:

$$A_d = R_r + T \quad (3.3)$$

Dove T rappresenta la forza di trazione effettivamente spendibile nel traino dell'attrezzo, mentre R_r rappresenta la componente di forza persa a causa della resistenza al rotolamento e si può esprimere come:

$$R_r = c_r \cdot G \quad (3.4)$$

Nella precedente equazione il termine c_r indica il coefficiente di rotolamento, il quale dipende nuovamente dalla combinazione di caratteristiche di terreno e veicolo. Andando ad eguagliare le due espressioni del termine di aderenza, si ottiene:

$$c_a \cdot (K \cdot G) = c_r \cdot G + T \quad (3.5)$$

Infine, si può esprimere il peso necessario per ottenere una determinata forza di trazione:

$$G = \frac{T}{K \cdot c_a - c_r} \quad (3.6)$$

Le precedenti osservazioni valgono nel caso di traino di un attrezzo; la situazione cambia laddove si vada ad attaccare alla macchina un attrezzo portato o semiportato. Per spiegare meglio questo concetto viene riportata un'immagine che utilizza come tipologia di veicolo una trattoria agricola, ma il discorso è analogo nel caso specifico di AgriMaRo [31].

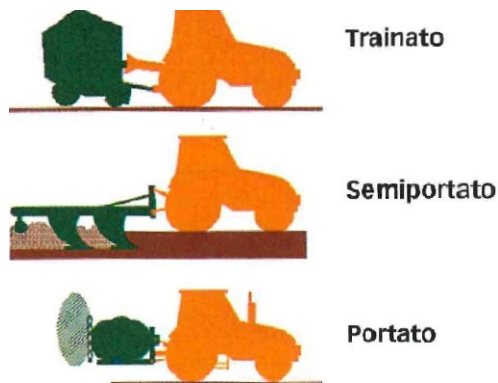


Figura 3.2: Collegamento attrezzi [31]

Osservando la rappresentazione di figura 3.2, si possono fare alcune osservazioni. Nella configurazione di tipo semiportato o portato, il valore di peso necessario per l'avanzamento a fronte di una determinata forza di tiro va ridotto rispettivamente del 10% e del 20%, in quanto in queste condizioni la forza T ha anche una componente verticale verso il basso, la quale aiuta il veicolo ad aumentare la propria aderenza, in quanto agisce sull'asse più vicino al punto di attacco dell'attrezzo che, nel caso della trattoria, risulta normalmente quello posteriore [31]. Per i calcoli che si andranno a fare in seguito, riguardo al caso specifico di AgriMaRo non verrà considerato questo effetto benefico, in quanto la struttura della macchina non è paragonabile a quella di una trattoria e l'attrezzo non viene connesso nella medesima posizione. Inoltre, essendo un calcolo preliminare, è buona norma adottare calcoli conservativi. Di seguito, viene riportata una tabella contenente i valori dei coefficienti di aderenza e rotolamento normalmente assunti per i calcoli; si specifica che tali valori si riferiscono a trattorie gommate [31].

Tipo di terreno	Coeff. aderenza c_a	Coeff. rotolamento c_r
Strada pavimentata	0.90-1.00	0.01-0.03
Strada in terra battuta	0.60-0.65	0.04-0.06
Stoppie di cereali	0.45-0.50	0.06-0.08
Cotica erbosa	0.40-0.45	0.08-0.09
Terreno umido	0.35-0.40	0.10-0.12
Letto di semina	0.30-0.35	0.12-0.16

Tabella 3.1: c_a e c_r per vari tipi di terreno [31]

Rimane, infine, da descrivere come viene calcolata e da cosa dipende la forza T di trazione necessaria per una determinata operazione da svolgere sul campo o su strada. Tale calcolo coinvolge due contesti diversi:

- La lavorazione vera e propria del terreno in cui la resistenza da superare è proprio quella opposta dall'organo che penetra negli strati subsuperficiali del suolo con un certo valore di profondità
- Il traino di attrezzi sulla superficie del suolo; in questa situazione la resistenza da superare è puramente quella dovuta al rotolamento degli pneumatici.

La prima situazione normalmente risulta sempre essere quella più limitante in termini di caratteristiche necessarie per il veicolo trainante, in quanto la richiesta di forza scaricata al suolo è notevole. In questo caso, il modulo di T viene così calcolato:

$$T = \rho \cdot I_f \cdot p \quad (3.7)$$

I termini coinvolti sono la larghezza del fronte di lavoro I_f espressa in m ; la profondità di lavoro p espressa in cm ed il coefficiente di resistenza alla lavorazione ρ espresso in $N/(m \cdot cm)$. Quest'ultimo indica la componente orizzontale della forza resistente opposta dal suolo, considerando un piano di terreno lavorato largo $1m$ e profondo $1cm$. Il valore di questa grandezza è fortemente variabile in funzione della tipologia di lavorazione effettuata e le condizioni di impasto e compattamento

del terreno. Normalmente, in agricoltura vengono considerati tre tipi di terreno distinguendoli, si dice, per l'"impasto" che li caratterizza. Quest'ultimo può essere leggero, medio o pesante. Facendo riferimento alla composizione principale del terreno, l'impasto leggero è prevalentemente di carattere sabbioso, mentre quello pesante è di tipo argilloso; il medio risulta avere una composizione intermedia. Per semplificare l'identificazione di ρ , è possibile fare riferimento a valori empirici relativi alla casistica di impasto medio, chiamando in questo caso il coefficiente di resistenza alla lavorazione ρ_0 e calcolando, quindi, ρ in questo modo:

$$\rho = K_t \cdot \rho_0 \quad (3.8)$$

K_t esprime il grado di tenacità del terreno rispetto allo standard del medio impasto ed è un valore adimensionale. Di norma, assume i seguenti valori:

- $K_t = 0.65$ per i terreni ad impasto leggero
- $K_t = 1.4$ per i terreni ad impasto pesante

Viene, quindi, riportata una tabella con i valori di riferimento di ρ_0 in varie casistiche [31].

Operazione	ρ_0 $N/(m \cdot cm)$
Discissura con scarificatori e ripuntatori	250-300
Aratura con aratri a versioio	600-700
Coltivazione chisel ed estirpatori	300-350
Erpicazione con erpici a denti elastici, combinati e vibrocoltivatori	200-250
Erpicazione con erpici a denti rotanti o fissi	150-200

Tabella 3.2: Valori di ρ_0 per diverse lavorazioni [31]

Nel caso in cui l'azione da eseguire sia solo quella di traino di attrezzature sul suolo, occorre utilizzare la seguente relazione per il calcolo della forza T :

$$T = c_r \cdot G_{mo} \quad (3.9)$$

Dove G_{mo} rappresenta il peso lordo dell'attrezzatura che si vuole trainare, che comprende quindi anche il contenuto trasportato; in pratica, tutto il peso gravante sulle ruote.

Nel caso del robot oggetto di analisi, sono state assunte alcune ipotesi. Innanzitutto, è stata considerata una massa pari a 100 kg, che rappresenta un dato conservativo in quanto senza considerare la massa delle batterie e della componentistica elettronica si arriva a quasi 90 kg da calcoli eseguiti sul software Solidworks [32], prendendo come riferimento il file CAD presentato inizialmente. Tale massa non tiene perciò in considerazione del peso esercitato dal meccanismo di centraggio e da qualunque tool ad esso attaccato; per tale ragione, questa stima risulta conservativa. Inoltre, siccome tutte e tre le ruote sono motrici, si tiene conto di tutto il peso derivante dalla struttura del robot per arrivare alla forza di aderenza esprimibile da questa macchina, cioè $K = 1$. In un primo momento si considerano le lavorazioni più pesanti; successivamente si passa a quelle più superficiali. Al termine dell'analisi si potrà capire il limite di AgriMaRo e ciò che è in grado di compiere [31].

3.1.1 Lavorazioni pesanti

In questo calcolo vengono prese in considerazione le lavorazioni particolarmente gravose in campo agricolo. Tra queste, la principale e più conosciuta risulta essere l'aratura. Considerando la struttura del robot e la destinazione d'uso per cui è stato pensato, questa lavorazione è un azzardo e si prevede che il veicolo in questione non riuscirà ad effettuarla. In ogni caso, questa stima aiuterà a porre un limite alle possibilità del robot, cercando di restringere sempre più il campo applicativo. Come è stato spiegato in precedenza, i conti dipendono molto dalle condizioni di lavoro che si vanno a considerare; pertanto, verranno sviluppate tutte e tre le casistiche viste, dall'impasto più sabbioso al più argilloso, tenendo in considerazione i valori empirici precedentemente esposti per la valutazione delle grandezze necessarie ai

fini di calcolo. Fondamentalmente, la valutazione si compone di due verifiche, una riguardante l'aderenza e una la coppia. Se anche solo una delle due non fornisce un risultato positivo, la lavorazione non è effettuabile [31].

Verifica aderenza

La procedura per effettuare questa verifica si compone di quattro passi:

- Scelta dei coefficienti di aderenza e rotolamento
- Applicazione dell'equazione 3.5 esplicitando T
- Scelta dai parametri di trazione e calcolo di T
- Confronto tra i due valori ottenuti; se il secondo valore è superiore al primo, la verifica non è soddisfatta e viceversa.

Per comodità, si esprime il primo valore di T calcolato dall'equazione 3.5 come T_{disp} in quanto rappresenta la forza di trazione disponibile, cioè il valore che concretizza l'aderenza del veicolo. Il secondo valore calcolato viene chiamato T_{nec} , siccome indica la forza necessaria per fare avanzare l'attrezzo all'interno del terreno. Come accennato in precedenza, deve valere la relazione $T_{disp} > T_{nec}$. Si specifica che la valutazione prevede la variazione di più parametri tra i tre casi, nello specifico:

- Situazione peggiore: terreno prevalentemente argilloso, basso coefficiente di aderenza e elevato coefficiente di rotolamento
- Situazione intermedia: terreno di medio impasto, valori di coefficiente di aderenza e rotolamento intermedi
- Situazione agevole: terreno principalmente sabbioso, facile da lavorare; elevato coefficiente di aderenza e basso coefficiente di rotolamento

Inoltre, il valore del coefficiente di resistenza alla lavorazione è stato variato all'interno del range presente in tabella. In questo modo viene svolta una comparazione che tiene conto di quattro coefficienti variabili. Vengono, invece, mantenute costanti le dimensioni del fronte di terreno che viene lavorato. Si considera un solo vomero in azione, una profondità di 20cm e una larghezza di 0.1m , cioè parametri minimi per gli standard dell'aratura per superfici ridotte. A valle del confronto tra i due valori di forza di trazione, nel caso in cui $T_{disp} \leq T_{nec}$, viene calcolata la massa di zavorre necessaria per rendere la lavorazione fattibile, utilizzando la seguente relazione:

$$m_{zav} = \frac{1}{g} \cdot \left(\frac{T_{nec}}{c_a - c_r} \right) - m_{st} \quad (3.10)$$

In cui m_{st} indica il valore standard di massa assunto come ipotesi per questa analisi, cioè 100 kg . Di seguito si riporta una tabella riassuntiva dei parametri selezionati e dei calcoli effettuati.

Parametri scelti	Sit. peggiore	Sit. intermedia	Sit. agevole
$c_a[-]$	0.3	0.4	0.5
$c_r[-]$	0.16	0.10	0.06
$\rho_0[N/(m \cdot cm)]$	700	650	600
$K_t[-]$	1.5	1	0.65
$I_f[m]$	0.1	0.1	0.1
$p[cm]$	20	20	20
$T_{disp}[N]$	137	294	432
$T_{nec}[N]$	2100	1300	780
$m_{zav}[kg]$	1429	342	81

Tabella 3.3: Calcoli aderenza caso aratura

Come da previsioni, l'aratura non è fattibile considerando la struttura del robot. Al limite, nel caso di un terreno di impasto leggero e in buone condizioni del suolo su cui poggiano le ruote di trazione, è possibile effettuare questa operazione zavorrando con circa 80 kg il veicolo. Tenendo, quindi, conto dell'aggiunta di peso derivante dalla stessa struttura per collegare il vomero al telaio, questo valore si ridurrebbe

ulteriormente. Anche in questa condizione però, non è comunque consigliabile procedere con l'aratura utilizzando AgriMaRo. Nelle altre due situazioni, la massa da aggiungere per zavorrare il mezzo non è fisicamente ammissibile perchè supera di molto il valore della stessa massa del robot. Un'ulteriore considerazione doverosa è l'improbabilità di trovarsi a lavorare nelle condizioni descritte dalla situazione peggiore, in quanto in serra l'ambiente è comunque protetto rispetto all'esterno ed il terreno abitualmente selezionato per costruire una serra è difficilmente di impasto argilloso. Questa condizione, infatti, è stata inclusa a fini puramente teorici, per poter considerare un buon margine di sicurezza rispetto a situazioni più standard. Infine, in agricoltura è di buona norma non effettuare l'aratura in caso di suolo eccessivamente bagnato in quanto si rischia di produrre zolle di terreno lavorate di dimensioni elevate e di compattare molto il terreno [31].

Verifica coppia

Questa verifica consiste, fondamentalmente, nel confrontare la forza massima sviluppabile dalle motoruote, considerando il valore dichiarato di coppia massima dalla casa produttrice ed il raggio del battistrada. In questo modo si può completare la valutazione della fattibilità della lavorazione e capire quale limite si raggiunge prima, se quello di aderenza o quello di disponibilità di coppia. Questa procedura di verifica è riassumibile nei passi seguenti:

- Valutazione della coppia massima e del raggio del battistrada
- Calcolo della forza massima superabile, considerando la totalità delle motoruote presenti.
- Confronto del valore ottenuto con quello di T_{nec} precedentemente calcolato

Dalla consultazione del datasheet del modello di motoruota selezionato KN6104 Uumotor [24] e da rilievi sperimentali sul battistrada sono emersi i seguenti valori.

La coppia massima del range di lavoro disponibile per ciascuna motoruota è pari a $C_{max} = 60Nm$ e il raggio del battistrada è pari a $r = 17cm$. Considerando la presenza di tre motoruote trainanti e trattando lo pneumatico come un corpo rigido, è possibile scrivere la seguente relazione, utile per effettuare un semplice calcolo di massima:

$$F_{disp} = 3 \cdot \left(\frac{C_{max}}{r}\right) = 3 \cdot \left(\frac{60}{0.17}\right) = 1059N \quad (3.11)$$

F_{disp} rappresenta la forza teorica massima di tiro da parte del robot, considerando la disponibilità di coppia delle motoruote. Effettuando un confronto tra il valore emerso dal calcolo ed il valore di T_{nec} , calcolato nel paragrafo precedente per i tre casi visti, ci si accorge che la verifica è positiva almeno per la situazione più agevole. Questo risultato testimonia che l'aspetto più limitante per questo progetto è sicuramente l'aderenza. Considerando il solo aspetto della potenza, la lavorazione di aratura sarebbe da considerarsi fattibile, tenendo presente che il valore di forza calcolato con quest'ultima verifica non si discosta di molto da quella richiesta nella situazione intermedia riportata in tabella 3.3. Questo risultato è molto positivo dal punto di vista del sistema di trazione del robot, il quale si presta a superare anche lavorazioni pesanti. Alla luce di questa analisi si afferma che il limite maggiore è rappresentato dal peso del veicolo, troppo basso per poter effettuare lavorazioni gravose nel campo dell'agricoltura [31].

3.1.2 Lavorazioni leggere

Una volta appurato che la macchina in analisi non è adatta a svolgere lavorazioni pesanti, come da aspettative progettuali iniziali, è bene analizzare altre possibili destinazioni d'uso. In agricoltura esistono molte operazioni che si adattano all'ambiente di serra e che non comportano un notevole dispendio energetico in termini di richiesta di trazione alla ruota. Alcune di queste sono la fertilizzazione, il trattamento delle infestanti, operazioni di monitoraggio dello stato di salute della pianta,

per esempio. In questa categoria sono, altresì, incluse le lavorazioni superficiali del terreno, come alcuni tipi di erpicatura o la semina ed il trapianto di colture e ortaggi. In accordo con il precedente confronto effettuato sull'aratura, di seguito verrà solamente considerata la verifica di aderenza, ritenuta la più impattante sui limiti di utilizzo di AgriMaRo. Tale considerazione è giustificata dall'inferiore richiesta di potenza alla ruota nell'ambito delle lavorazioni leggere [31].

Verifica aderenza

In questa analisi si è deciso di effettuare nuovamente il calcolo su tre situazioni diverse, lasciando invariati i coefficienti di aderenza e rotolamento e la composizione del terreno considerata rispetto al caso precedente. I parametri che variano sono: il coefficiente di resistenza alla lavorazione e le dimensioni del fronte di terreno lavorato. Queste ultime rimangono fisse per le tre diverse situazioni considerate e sono tipiche di una lavorazione puramente superficiale. Infatti, viene considerata una profondità di 5cm e una larghezza di 30cm . Tipicamente le attrezzature che effettuano lavorazioni di finitura o comunque superficiali si estendono maggiormente in larghezza. Spesso sono coinvolti più elementi di lavoro che fisicamente impattano sul terreno, al fine di ottimizzare il numero di passate da eseguire per lavorare la superficie dell'appezzamento. Si specifica che, per effettuare i calcoli e renderli verosimili rispetto alla presente applicazione, è stato utilizzato il range di valori dell'operazione di erpicatura con erpici elastici combinati e vibrocoltivatori presente in tabella 3.2 [31]. Per comodità vengono riassunte le grandezze di interesse ai fini di calcolo in una tabella [31].

Parametri scelti	Sit. peggiore	Sit. intermedia	Sit. agevole
$c_a[-]$	0.3	0.4	0.5
$c_r[-]$	0.16	0.10	0.06
$\rho_0[N/(m \cdot cm)]$	250	225	200
$K_t[-]$	1.5	1	0.65
$I_f[m]$	0.3	0.3	0.3
$p[cm]$	5	5	5
$T_{disp}[N]$	137	294	432
$T_{nec}[N]$	563	338	195
$m_{zav}[kg]$	310	15	-

Tabella 3.4: Calcoli aderenza caso lavorazioni leggere

In questo caso si nota la differenza rispetto alla precedente analisi. Ne risulta la possibilità di effettuare la lavorazione nelle condizioni di lavoro normali, anche in caso di medio impasto del terreno. In quest'ultima situazione la zavorra richiesta è di soli $15kg$, valore che è tranquillamente raggiungibile dalla sola considerazione del peso aggiuntivo derivante dalla struttura di connessione dell'attrezzo al robot. Rimane problematica la configurazione peggiore del suolo, cioè quando tutti i parametri sono avversi. Tale casistica va però contestualizzata come era stato fatto in precedenza. Si precisa che è molto raro lavorare nelle condizioni previste da questo layout, il quale vuole semplicemente essere un caso limite teorico di progetto. Per quanto riguarda la verifica della coppia, l'entità dei valori di T_{nec} in tabella 3.4 non è tale da richiedere tutta la disponibilità di potenza meccanica alla ruota da parte del robot. Pertanto, si trascura la verifica della coppia perchè non sarebbe significativa e risulterebbe soltanto una ripetizione rispetto al caso precedente, dato che il gruppo di trazione del veicolo rimane il medesimo. A corredo della valutazione che è stata effettuata per le lavorazioni pesanti e leggere, si afferma che AgriMaRo è adatto solamente a svolgere operazioni che rientrano nella seconda categoria citata. Questo risultato è fondamentale per lo sviluppo del progetto e permette di attribuire alla macchina il corretto campo di applicazione, dimostrandone l'efficacia

solo nelle situazioni in cui non è richiesta una grossa forza di trazione dell'attrezzo, bensì precisione e qualità.

3.2 Meccanismo di centraggio dell'attrezzatura

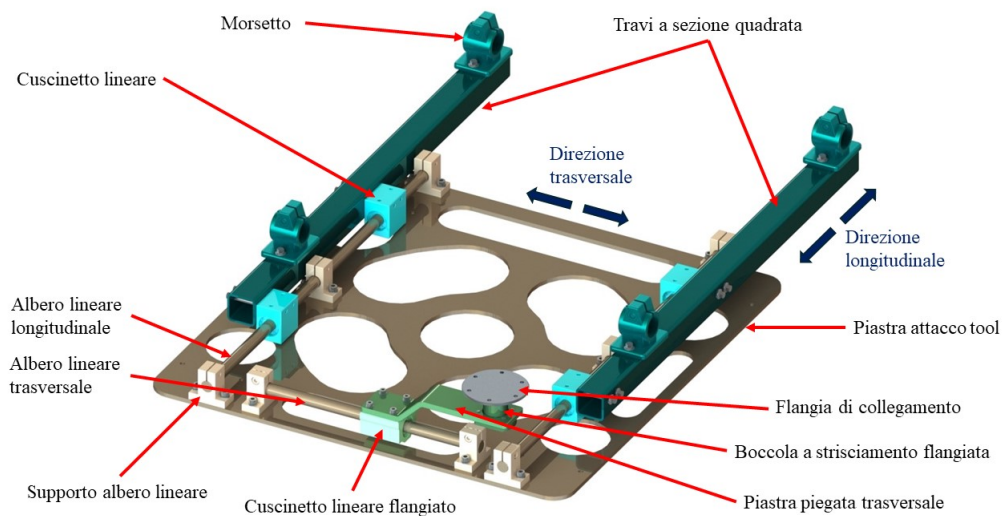


Figura 3.3: Render 3D meccanismo di centraggio

La gestione della variazione della carreggiata su questo robot comporta inevitabilmente il sorgere di un altro problema, cioè quando si va a collegare un'attrezzatura che deve seguire l'aiuola di un determinato ortaggio. In figura 3.3 è possibile osservare lo sviluppo finale del meccanismo. Durante il movimento di cambio di carreggiata il piano mediano tra il gruppo di ruote fisse e quella mobile si sposta in modo continuativo, per cui nasce la necessità di creare qualcosa che permetta all'*end effector* del robot di spostarsi in modo proporzionale al meccanismo a croce. Inizialmente, si è pensato ad un sistema a cinghie e pulegge mosso dalla stessa gamba mobile che permettesse di trascinare la struttura avvolgendo e svolgendo una cinghia dentata, ma questo sistema presentava alcuni problemi. Innanzitutto,

l'ingombro eccessivo dovuto al fissaggio della puleggia al telaio e la conseguente inflessione dello stesso corpo vincolante a causa della propria lunghezza. Inoltre, con questo sistema nasce il problema del tensionamento della cinghia, che deve essere garantito costantemente. Ciò comporterebbe l'aggiunta di un tensionatore e quindi l'ulteriore ingombro che ne deriverebbe, oltre all'inutile aggiunta di complessità nel sistema. A questo punto, è stata ricercata un'altra soluzione più semplice, sfruttando una particolare caratteristica intrinseca al meccanismo di allargamento della carreggiata.

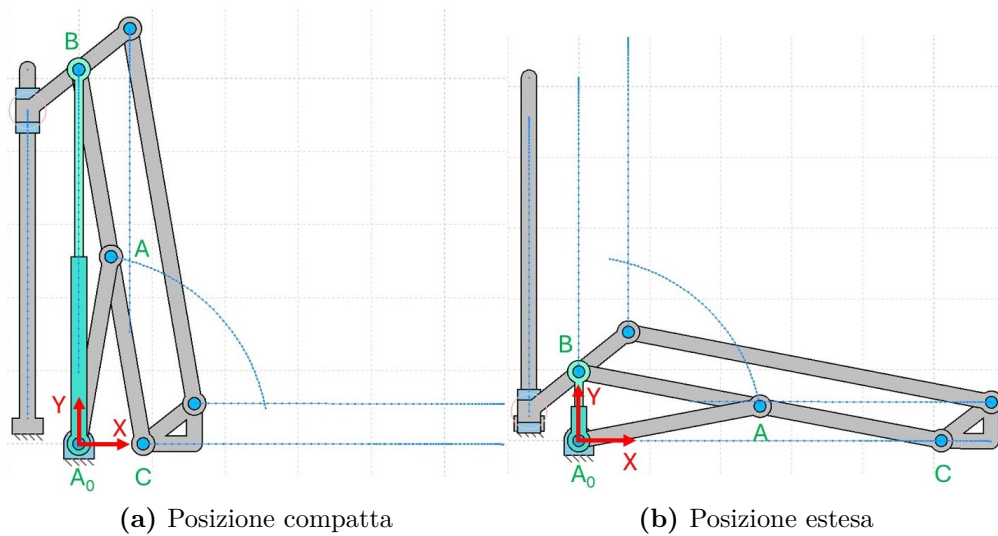


Figura 3.4: Schema meccanismo a croce

Nella figura ?? è rappresentato uno schema del meccanismo a croce di variazione della carreggiata, eseguito utilizzando il software GIM [19]. Le linee sottili color celeste indicano le traiettorie dei vari punti notevoli dello schema. Le due immagini simulano il campo di moto del meccanismo e permettono di notare un dettaglio. Proiettando i tratti di link $\overline{A_0A}$ e \overline{AC} sull'asse X si osserva che il punto A si trova sempre alla metà della distanza tra i punti A_0 e C . Quindi, la componente orizzontale della traiettoria del punto A rappresenta proprio il moto del meccanismo di centraggio desiderato. In questo modo è possibile demandare lo spostamento

della piattaforma a cui è vincolata l'attrezzatura allo stesso motore che permette la variazione di carreggiata, cioè quello che alimenta la guida lineare. Tale soluzione semplifica di molto il layout della struttura e permette di sfruttare un sistema di attuazione preesistente. Lo svantaggio che comporta questa scelta si concretizza nella disponibilità di potenza "extra" del motore NEMA 23, scelto in precedenza per fornire l'energia meccanica alla guida lineare. Infatti, quest'ultimo, essendo stato dimensionato solamente per sopperire all'energia meccanica richiesta dal movimento delle parti che compongono il meccanismo e il sistema vite-madrevite della slitta SHTC-12, potrebbe risentire dell'aggiunta di questo nuovo carico. Per questa ragione è bene porre particolare attenzione alla minimizzazione dell'attrito tra i componenti a contatto che costituiranno il meccanismo di centraggio del tool. Se, a seguito di test sperimentali futuri, il motore non si rivelerà sufficiente, occorrerà aumentarne la taglia. Quest'operazione viene resa particolarmente agevole grazie alla flangia di collegamento tra il motore stesso e la guida lineare, in quanto il suo profilo è standardizzato dalla casa produttrice.

Per il progetto di questo meccanismo occorre tenere conto del fatto che il robot andrà a lavorare procedendo in direzione perpendicolare rispetto a quella di estensione della carreggiata; quindi, pensando ad una lavorazione del terreno in serra al di sopra di un'aiuola di colture orticole, lo sforzo che la struttura subirà da parte dell'attrezzatura connessa sarà principalmente di trazione e flessione rispetto alla direzione di avanzamento. Fatta questa considerazione, la scelta che ne è conseguita è stata quella di vincolare il sistema di centraggio al telaio della macchina tramite due travi disposte trasversalmente rispetto alla direzione di avanzamento della macchina. In figura 3.3 è possibile distinguere i tre principali sottosistemi di questo meccanismo. Per comprendere meglio questo sistema con i rispettivi vincoli e membri, di seguito se ne riporta uno schema semplificato.

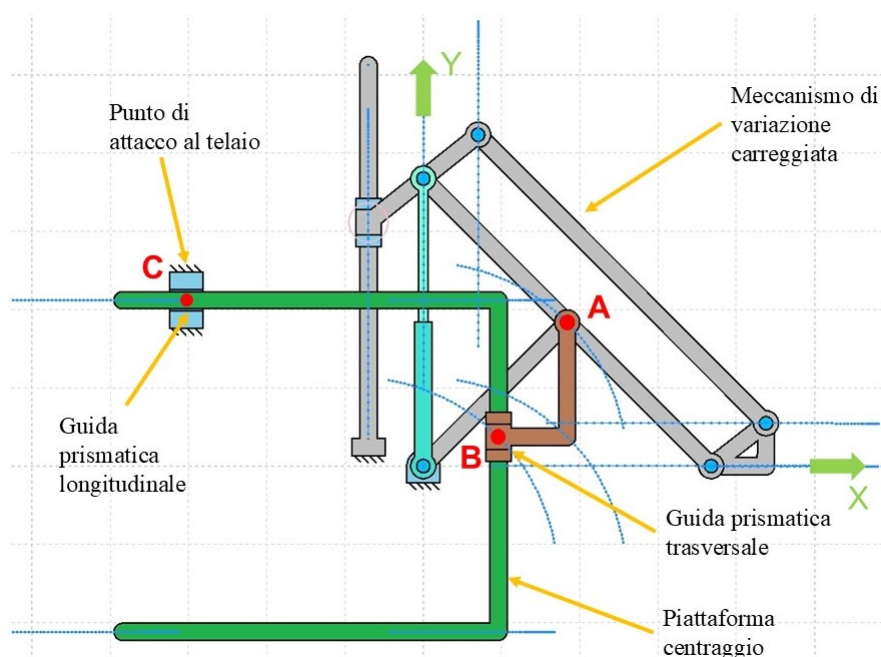


Figura 3.5: Schema semplificato meccanismo

Nello schema di figura 3.5 è visibile una rappresentazione semplificata del meccanismo di centraggio dell'attrezzatura, unitamente a quello di allargamento della carreggiata. I punti indicati in rosso rappresentano quelli notevoli per questo meccanismo. Nello specifico, la cerniera A provvede a fornire motricità al sottosistema mobile, costituito dalla piattaforma di attacco del tool. Essa è raffigurata con l'asta piegata ad U in verde. Il punto C rappresenta il vincolo della guida prismatica, che nel progetto reale è costituito da 4 cuscinetti lineari. Esso permette alla piastra di scorrere solamente lungo la direzione X . Il moto bidirezionale del punto A viene ridotto ad un grado di libertà grazie alla cerniera stessa e all'elemento \overline{AB} , collegato alla piattaforma per mezzo di una guida prismatica. Per una migliore comprensione dello schema, il link \overline{AB} marrone viene rappresentato come un'asta a "L"; nel progetto del meccanismo i punti A e B sono allineati nella direzione dell'asse Y . La sola componente di moto utile al movimento della piattaforma risulta essere lungo la direzione X . Tutto il sistema si riduce, quindi, ad un solo grado di libertà,

raggiungendo l'obiettivo prefissato in precedenza. Le traiettorie seguite dai membri dei due meccanismi accoppiati sono indicate in azzurro, a dimostrazione di quanto detto.

3.2.1 Parte fissa

I due principali elementi che permettono il sostegno di tutta la struttura sono le travi a sezione quadrata. La scelta di questo tipo di profilo è scaturita da un confronto con i profilati in alluminio. Infatti, inizialmente erano stati scelti questi ultimi, ma per alcuni motivi che verranno spiegati di seguito la scelta è ricaduta sul tubolare quadrato. Viene quindi riportata un'immagine esplicativa delle tipologie di profili e successivamente una tabella di confronto.

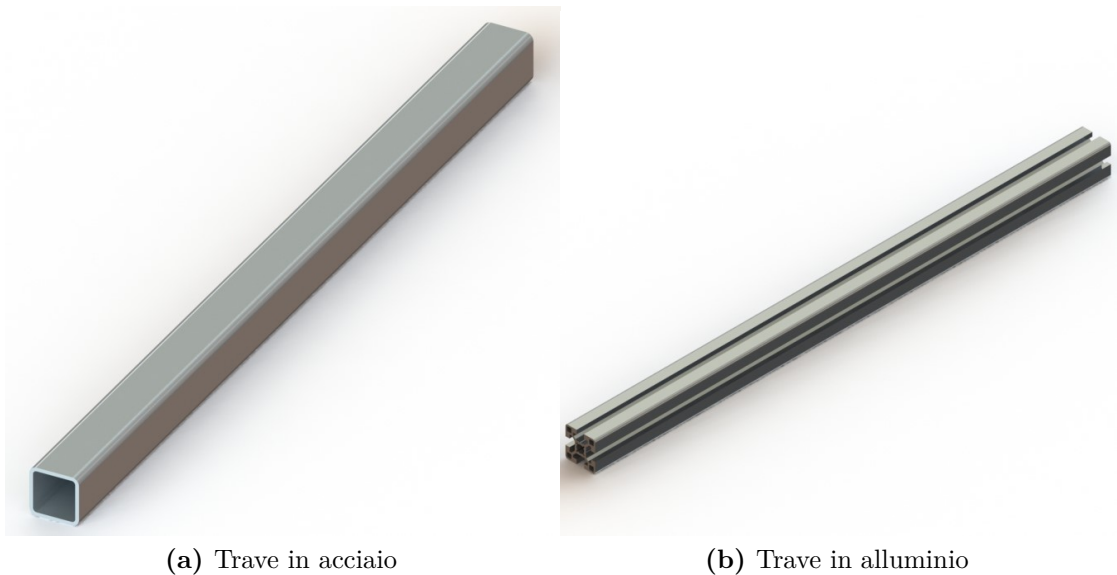


Figura 3.6: Viste in 3D delle due soluzioni

Profilo	Materiale	Fornitore	$J_x=J_y$ [cm ⁴]	L [mm]	Prezzo [€]
HFS 40x40	EN AC-51400-T5	Misumi	10.4	694	15.26
40x40x3	S235JR	Punto Metallo	10.2	694	10.13

Tabella 3.5: Confronto profili travi

In figura ?? è possibile osservare le due diverse geometrie. Il confronto è stato fatto prendendo due fornitori di riferimento. Il primo è Misumi [23], che verrà mantenuto per la maggior parte dei componenti utilizzati per il complessivo del meccanismo di centraggio. Il secondo è Punto Metallo [27], già utilizzato per i tubi in INOX della struttura del telaio. Come si può notare dalla tabella, le due opzioni presentano un aspetto simile, cioè il momento di inerzia lungo i due assi principali. Per quanto riguarda invece il costo, il valore è stato rilevato dal sito di entrambi i fornitori inserendo come input i dati essenziali. Dal confronto risulta più economica la soluzione con i profili in acciaio. Un altro aspetto è il materiale, in quanto considerando l'alluminio è più facile trattare il problema della corrosione grazie alla naturale protezione che offre questo materiale. Nel caso dell'acciaio, invece, la resistenza è data dalla zincatura del materiale, che però è comunque meno durevole nel tempo. Per contro, l'acciaio offre una maggiore tensione di snervamento; questo aspetto aumenta il margine di sicurezza a parità di aspetti geometrici e modulo di resistenza a flessione. Pertanto, l'acciaio rimane una scelta strutturalmente migliore. Infine, un'ulteriore questione che è stata presa in considerazione è la connessione di oggetti al profilo. Analizzando l'HFS in alluminio, la connessione è standardizzata e avviene per mezzo di inserti filettati inseribili all'interno della fessura presente sulle quattro facce del profilo. Ciò rappresenta un vantaggio nel caso di una struttura a portale e/o simmetrica in cui più profilati vengono collegati insieme. Nel caso in esame, invece, questo sistema di collegamento è svantaggioso perchè l'oggetto da collegare viene posto a sbalzo e la sola connessione tramite

l'inserto risulterebbe debole meccanicamente. La scelta di un profilo più semplice come il tubo a sezione quadrata permette di effettuare forature passanti e sfruttare anche la faccia opposta del profilo, come verrà spiegato successivamente. Un altro vantaggio del profilo a sezione quadrata è che il foro di collegamento può essere eseguito su qualsiasi asse all'interno della superficie della faccia laterale, mentre nel caso del profilato in alluminio la corsia di scorrimento dell'inserto filettato vincola in altezza la posizione dell'oggetto che viene collegato. A conclusione di questa analisi di confronto, è stato deciso di utilizzare il profilo in acciaio per i numerosi vantaggi offerti.

Proseguendo con la descrizione delle parti che compongono il complessivo, è fondamentale spiegare come viene realizzato il collegamento tra la trave ed il telaio della macchina. La variazione di sezione da circolare a quadrata tra i due sottosistemi comporta la risoluzione di una problematica di tipo geometrico. La soluzione è rappresentata dall'utilizzo di morsetti che permettano questo dualismo di geometrie. Per tale ragione sono stati scelti nuovamente morsetti Elesca [26] per la loro geometria, la quale permette, altresì, di poter facilmente smontare il meccanismo semplicemente svitando i due bulloni che collegano la superficie inferiore del morsetto con quella superiore della trave. In questo modo il morsetto rimane collegato in modo permanente al telaio del robot, ma ciò non rappresenta un problema dal momento che il volume occupato da questi morsetti non interferisce con altri oggetti presenti nelle circostanze.

Viene quindi riportata un'immagine rappresentativa del morsetto utilizzato e le caratteristiche principali dello stesso in figura 3.7.



Figura 3.7: Morsetto di collegamento Elesa GN 146.3 [26]

Fornitore	Descrizione	Materiale	Prezzo [€]
Elesa	GN 146.3-B30-40-2-BL	Alluminio	21.35

Tabella 3.6: Dati principali morsetto di collegamento

Dalla tabella 3.6 si evince che il prezzo di ciascun morsetto è abbastanza elevato, soprattutto se comparato a quello della trave. La giustificazione di questa scelta risiede nella semplicità di connessione che offre tale prodotto. La presenza del telaio a profilo tubolare della macchina influenza negativamente la scelta di questa configurazione e porta all'aumento del costo previsto per la realizzazione di questo progetto.

A conclusione della parte fissa del meccanismo, va giustificata la scelta dei componenti che permettono lo scorrimento del piano di collegamento con l'attrezzatura. Il fornitore di riferimento rimane Misumi [23], in quanto dal sito è possibile configurare agevolmente il particolare in funzione delle proprie esigenze ed è inoltre presente un'ampia gamma di componentistica che ricopre la gran parte di applicazioni nella meccanica. Gli obiettivi da perseguire nella ricerca dei componenti sono diversi.

Innanzitutto, occorre scegliere con cura le parti ai fini della resistenza meccanica quando il sistema viene sottoposto agli sforzi provenienti dalla lavorazione che si sta realizzando con l'ausilio del tool connesso al robot. Inoltre, come accennato in precedenza, occorre minimizzare gli attriti tra le parti e rendere agevole il movimento tra loro per poter ridurre il consumo energetico e rientrare nel margine di disponibilità di potenza del motore primario, cioè quello che alimenta la guida lineare. Pertanto, combinando la configurazione geometrica del sistema e la gestione dello scorrimento reciproco tra guida prismatica e albero, sono stati selezionati dei cuscinetti lineari. Il modello scelto, del quale si riportano le caratteristiche in tabella 3.7, è particolarmente utile per questa applicazione, in quanto ha un profilo sufficientemente alto da permettere all'albero lineare in esso inserito di scorrere ad un'altezza inferiore rispetto a quella dei fori di collegamento e quindi al di sotto dello scatolato che funge da trave di sostegno. Inoltre, un'altra importante caratteristica di questo componente è la guarnizione di tenuta presente su entrambe le facce perpendicolari all'asse di scorrimento. Ciò garantisce la pulizia degli organi interni al cuscinetto anche in presenza di sporcizia nell'ambiente esterno. Collegandosi al discorso della pulizia, un dettaglio presente in questo modello è la possibilità di rifornimento di grasso a basso particolato, ciò garantisce la possibilità di eseguire agevolmente la manutenzione su questo dispositivo. Infine, sono presenti due coppie di fori per poter eseguire il fissaggio del particolare, due verticali e due orizzontali, con filettatura M6. Nel caso in esame è stato scelto il fissaggio orizzontale, utilizzando una coppia di bulloni per ogni cuscinetto, garantendo così un accoppiamento rigido e resistente. I bulloni utilizzati collegano il cuscinetto alla trave tramite due fori passanti sulle facce laterali di quest'ultima. In questo modo la sollecitazione subita dal cuscinetto viene trasmessa a tutta la trave. Per ciascun cuscinetto il coefficiente di carico dinamico è di 775 N, mentre quello statico di 1180 N e il diametro del foro interno è di 16 mm. Di seguito si riporta un'immagine rappresentativa del

componente.



Figura 3.8: Cuscinetto lineare Misumi [23]

Fornitore	Codice	Materiale	Prezzo [€]
Misumi	SLHSS16G	INOX EN 1.4125	51.47

Tabella 3.7: Dati cuscinetto lineare

La nota negativa di questo componente è il costo importante, ma quest'ultimo è giustificato dall'elevata qualità dell'oggetto. Come si evince dai dati precedentemente esposti e dalla figura 3.8, il materiale dell'involucro è acciaio inossidabile; inoltre, le caratteristiche costruttive lo rendono particolarmente idoneo per l'applicazione in un contesto di lavoro all'interno dell'ambiente di una serra.

3.2.2 Parte mobile

Si passa ora alla descrizione dei componenti che traslano in direzione longitudinale secondo il sistema di riferimento di figura 3.3. Essi costituiscono la parte finale della struttura che muove la piattaforma a cui viene connesso l'attrezzo che si vuole utilizzare.

Tre elementi fondamentali di questa parte sono gli alberi lineari che, insieme ai cuscinetti a cui vengono abbinati, realizzano la connessione albero-mozzo atta a permettere lo scorrimento tra le due parti. Il fornitore di questi componenti è

nuovamente Misumi [23] e il modello scelto presenta un materiale molto resistente, cioè un acciaio per cuscinetti di durezza elevata. Le caratteristiche meccaniche vengono conferite al componente tramite il processo di tempra a induzione e una cromatura dura che rendono la superficie dell'albero lucida ed impenetrabile da particelle esterne presenti nell'ambiente di lavoro. Queste qualità, insieme alla tolleranza g6 che è stata scelta per questo componente, conferiscono all'accoppiamento albero-cuscinetto lineare ottime caratteristiche di scorrimento, ma allo stesso tempo ottime caratteristiche meccaniche in quanto i materiali scelti consentono di resistere ad elevate sollecitazioni di flessione, provocate dall'avanzamento del robot sul terreno durante una lavorazione. Le medesime proprietà meccaniche che possiede l'albero lineare trasversale sono anche presenti nel caso di quello trasversale; l'unica differenza risulta quindi la lunghezza, che varia in funzione della corsa effettuata dal cuscinetto.

Per quanto riguarda i supporti degli alberi lineari, occorre distinguere i due casi, quello longitudinale e quello trasversale. Nel caso longitudinale sono stati predisposti tre vincoli sull'albero, in quanto la lunghezza di 613 mm con soli due vincoli rischierebbe di provocare l'inflessione dell'albero. Inoltre, con questa configurazione viene garantita la giusta corsa della piattaforma rispetto al telaio del robot durante il cambio di carreggiata. Nella posizione più compatta e in quella più estesa i supporti raggiungono i limiti della corsa disponibile, ma non vanno comunque a toccare i cuscinetti, in quanto è stato lasciato sufficiente spazio di extra-corsa. L'inserimento di tre supporti permette quindi al sistema di essere più equilibrato, anche quando si trova a fine corsa nella condizione di carreggiata massima in quanto il peso della struttura da portare viene comunque scaricato tramite i quattro cuscinetti ed i sei supporti presenti longitudinalmente. Nel caso dell'albero trasversale, la corsa da effettuare risulta molto ridotta rispetto a quella longitudinale. Ciò è dovuto alla scarsa componente di spostamento del punto di collegamento del sistema con il link

B lungo la direzione trasversale. Questo fatto permette di rendere più compatto il sottosistema albero-mozzo trasversale, dato che deve essere inserito nella porzione di superficie compresa tra i due alberi lineari longitudinali. I supporti sono realizzati in acciaio altoresistenziale da bonifica, il C45E; inoltre, per resistere alla corrosione, essi subiscono un trattamento di nichelatura chimica. Infine, essi sono dotati di due fori per l'inserimento di viti M6 di collegamento e vengono venduti insieme alla vite di serraggio del morsetto presente nella parte superiore, anch'essa M6. Per completare la descrizione della parte mobile, manca la piastra di attacco del tool, cioè l'elemento che permette la connessione del telaio dell'attrezzatura con il meccanismo di centraggio. L'idea alla base della creazione di questo oggetto è permettere una agevole connessione delle due parti, lasciando allo stesso tempo lo spazio per eventuali passaggi di cavi, tubazioni pneumatiche e, più in generale, linee di comunicazione tra l'attrezzo e il robot. L'altra caratteristica che è stata ricercata durante il progetto del suddetto componente è la copertura di tutto il *workspace* del robot, la cui dimensione limite è rappresentata dalla distanza interna tra la coppia di ruote fisse e la ruota mobile. Oltre a questa distanza, va ovviamente considerato un certo margine di spazio per non creare possibilità di urto durante il movimento di cambio della carreggiata. Questa esigenza va coordinata con la resistenza del componente nelle zone di collegamento dell'attrezzo e, contemporaneamente, il contenimento dei pesi. Pertanto, la piastra è stata realizzata in s275JR, materiale avente buone caratteristiche meccaniche, ma dotato di elevato peso specifico. A causa di ciò, sfruttando altresì l'esigenza dichiarata in precedenza del passaggio di connessioni cablate, sono stati creati fori ed asole di alleggerimento laddove il materiale non è utile alla resistenza meccanica del componente, considerando le posizioni dei fori di collegamento con i componenti del meccanismo e la struttura del tool che verrà collegato sulla superficie inferiore della piastra. Di seguito, vengono inseriti alcuni disegni relativi al componente customizzato, la piastra di attacco

del tool, per chiarirne meglio la geometria. Si riportano, inoltre, in figura 3.9 e successiva, le immagini rappresentative dei componenti commerciali e si riassumono le loro caratteristiche principali all'interno di una tabella.

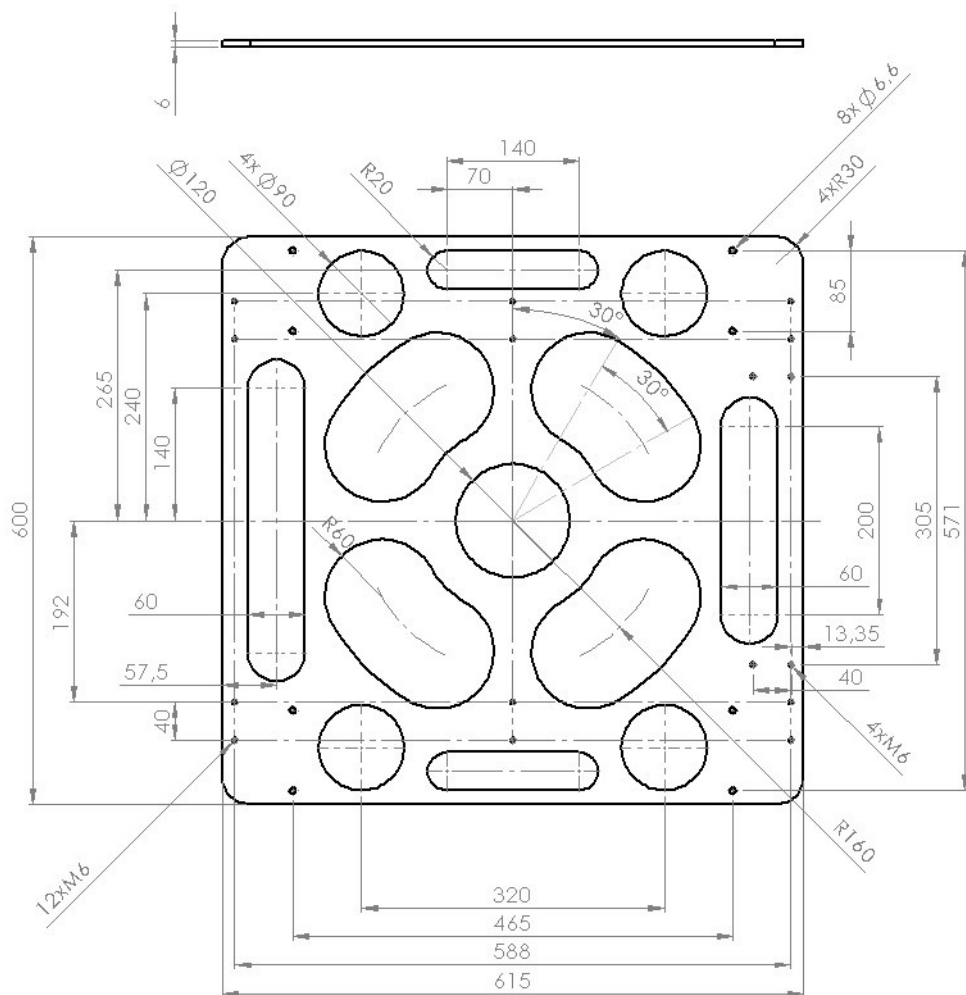


Figura 3.9: Disegno piastra di attacco tool

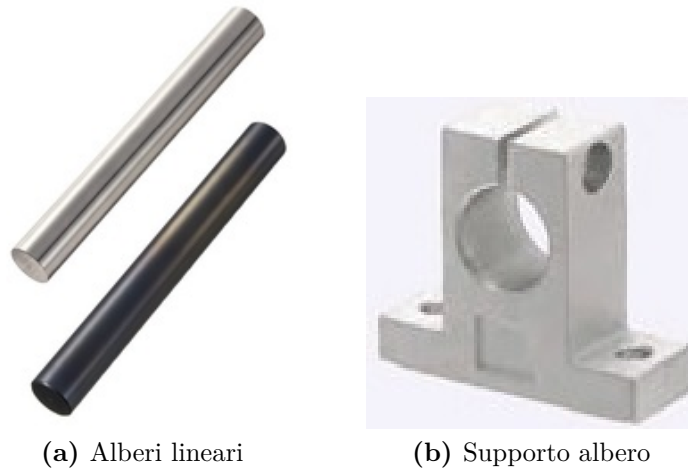


Figura 3.10: Componenti commerciali parte mobile

Descrizione	Codice	Materiale	Φ [mm]	L [mm]	Prezzo [€]
Albero long.	PSFJ16-613	EN 1.3505	16	613	36.70
Albero trasv.	PSFJ16-330	EN 1.3505	16	330	14.06
Supporti	SHAMN16	EN 1.1191	16	25	33.55

Tabella 3.8: Caratteristiche componenti commerciali parte mobile

Il costo più rilevante è dovuto ai supporti degli alberi lineari, in quanto il materiale che li costituisce è di qualità elevata e di conseguenza costoso. La scelta di questo componente risulta essere di carattere conservativo, al fine di garantire un'elevata resistenza meccanica, indipendentemente dall'attrezzatura che si va ad utilizzare al di sotto del telaio del robot. Essendo un'ipotesi di primo progetto e non dovendo essere costruita nell'ambito di questo lavoro di tesi, questa struttura mira ad essere funzionale al compito che deve svolgere. La prosecuzione di questo lavoro può portare in futuro ad un'ottimizzazione dei componenti, eseguendo per esempio un'analisi FEM della struttura e cercando di ridurre i costi delle singole parti costituenti l'assemblato finale.

3.2.3 Guida trasversale

Questo sottosistema ha il compito di fornire il moto al meccanismo, collegandosi al punto A del meccanismo a croce. Il movimento della lamiera che compone il link B e a cui va ad attaccarsi la piattaforma di centraggio è composto da una rototraslazione; infatti, il componente ruota e trasla rispetto ad entrambi gli assi del piano in cui si muove. L'obiettivo del sottosistema qui descritto è quello di estrapolare solamente la componente di moto utile al movimento, cioè quella nella direzione di allargamento della carreggiata. L'idea di fondo è utilizzare una lamiera come telaio strutturale e alle due estremità aggiungere i vincoli che permettono di sfogare i due gradi di libertà in eccesso, cioè la rotazione e la traslazione sull'asse trasversale. Per quanto riguarda la traslazione trasversale è stata mantenuta la configurazione già utilizzata per quella longitudinale, cioè l'accoppiamento albero lineare - cuscinetto lineare, che si rivela un'ottima soluzione per questa applicazione nell'ottica di minimizzare gli attriti. Per la cerniera si può osservare che, durante il moto del meccanismo a croce, la sua rotazione si concretizza in un angolo di circa 70° . Tale valore non giustifica la scelta di un cuscinetto volvente, bensì risulta idonea per una boccola a strisciamento. In questo modo si semplifica notevolmente l'accoppiamento, non dovendo pensare ad alloggiare i cuscinetti all'interno di una sede opportuna. Allo stesso tempo, il collegamento risulta anche più rigido grazie all'elevata superficie di contatto che prevede la boccola. Il componente selezionato per questa funzione è una boccola a strisciamento flangiata il cui alloggiamento è realizzato in acciaio comune, S235JR; l'inserito metallico che permette lo strisciamento è composto da una lega di ottone ad alta resistenza. La tenuta è realizzata tramite guarnizioni senza contatto che permettono di separare l'ambiente esterno dall'interno, in cui c'è movimento reciproco tra le parti ed è bene che non vengano introdotte particelle esterne che potrebbero andare ad usurare in modo anomalo le superfici a contatto. La parte flangiata di questa boccola

permette l'agevole collegamento con la piastra, che verrà descritta in seguito, tramite quattro viti M5. Nella parte interna invece, l'accoppiamento è realizzato mediante un albero flangiato collegato tramite sei viti M5 alla ralla centrale del link B senza particolari modifiche alla struttura preesistente. La flangia è realizzata in alluminio, in quanto viene collegata al meccanismo e il proprio peso grava su di esso; la scelta è ulteriormente guidata dalla volontà di mantenere una continuità estetica del robot. Inoltre, il diametro dell'albero è di 20 mm e l'esecuzione di tale componente in acciaio renderebbe il sistema eccessivamente sovradimensionato per la funzione che deve svolgere. La lega di alluminio idonea dovrà essere concordata con il fornitore del componente al fine di garantire l'adeguato rapporto qualità-prezzo. Per connettere la cerniera con il cuscinetto lineare è stata progettata una piastra in materiale S355N avente discrete caratteristiche meccaniche. Queste ultime sono necessarie a resistere alla sollecitazione principale che subisce questa piastra, cioè torsione attorno all'asse verticale del robot. Questo componente presenta una particolare forma a causa della differenza di altezza tra il piano del meccanismo a croce ed il piano del meccanismo di centraggio. In parte quest'ultima viene compensata dalla lunghezza della boccola e la propria flangia, in parte dal cuscinetto lineare, anch'esso flangiato. La geometria della piastra scaturisce quindi da un compromesso di queste caratteristiche. Al contempo occorre fare attenzione a non impattare il supporto dell'albero lineare longitudinale nella configurazione più compatta del robot, che è molto vicino alla posizione della boccola. Ciò spiega il prolungamento del piano della piastra all'altezza del collegamento con la flangia della boccola. Per raccordare i due piani è stato scelto di effettuare una piega, che non deve essere troppo accentuata per due ragioni principali. Innanzitutto, per un motivo pratico; l'acciaio S355N non è facile da piegare in quanto presenta un limite di snervamento elevato, pertanto non potrebbe sopportare pieghe a 90° senza rischiare rotture o presenze di grinze e/o cricche e comunque non sarebbe

un'operazione comune ad una normale carpenteria, bensì un'operazione di nicchia, soprattutto considerando lo spessore di 8 mm. Inoltre, un angolo di piega eccessivo rischierebbe di provocare l'effetto di concentrazione delle tensioni nelle zone di appoggio del coltello di piega e tale situazione, assieme alla sollecitazione di torsione, può provocare danni durante il funzionamento o l'innesco di cricche riducendo la vita utile del componente. Passando alla descrizione del particolare che svolge il ruolo di guida prismatica, cioè il cuscinetto lineare flangiato, è stato selezionato dal sito Misumi [23]. Le caratteristiche di questo prodotto sono le medesime rispetto ai cuscinetti lineari longitudinali; anche in questo modello è prevista la possibilità di rifornimento di lubrificante. La differenza tra i due modelli è il montaggio, in quanto in questo caso è predisposta una flangia la cui faccia superiore contiene quattro fori M5 per il collegamento filettato di questo oggetto con la piastra piegata. Di seguito vengono riportati i disegni quotati dei componenti customizzati e le immagini rappresentative di quelli commerciali. A seguire, una tabella riassuntiva con le caratteristiche principali dei particolari commerciali.

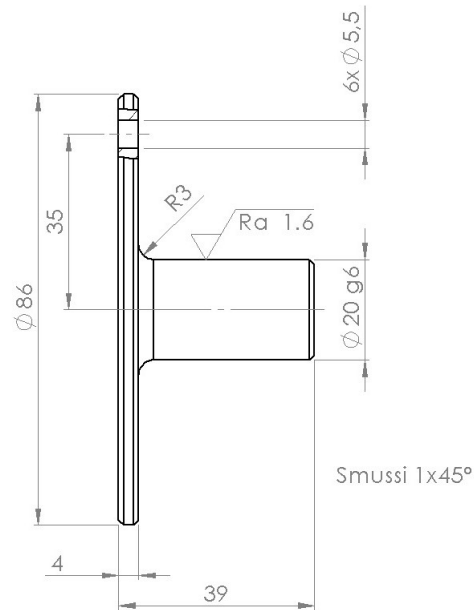


Figura 3.11: Disegno flangia di collegamento

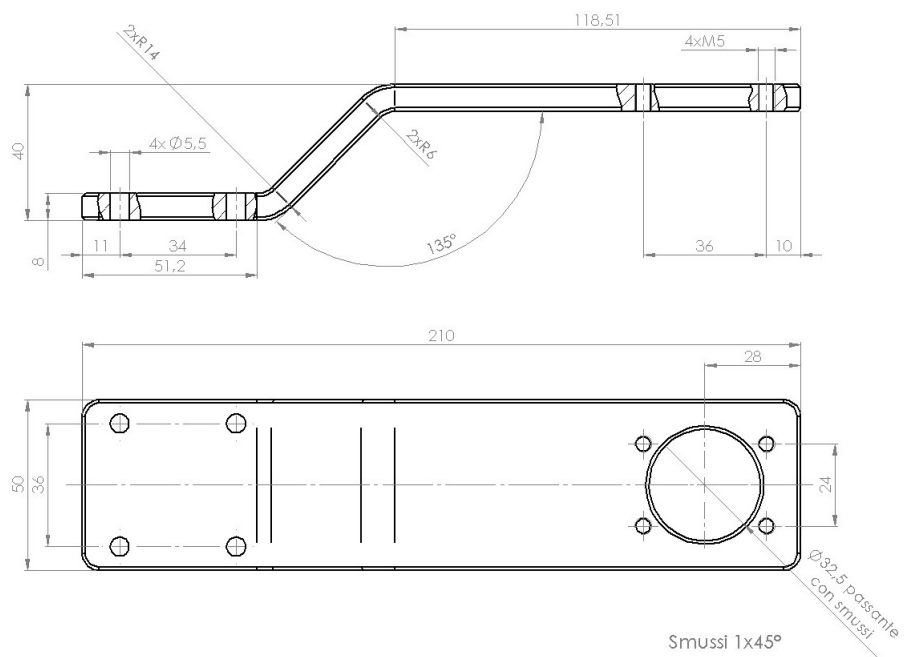
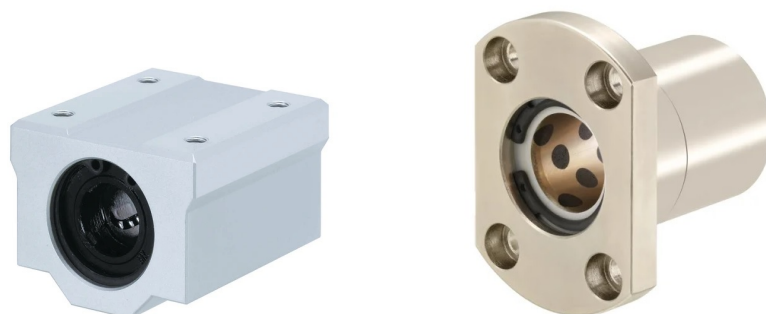


Figura 3.12: Disegno piastra piegata trasversale



(a) Cuscinetto lineare flangiato

(b) Boccola a strisciamento

Figura 3.13: Componenti commerciali guida trasversale Misumi [23]

Descrizione	Codice	Materiale alloggiamento	Prezzo [€]
Cusc. lin. flang.	LHBB-MX16	EN 1.3505	15.38
Boccola a strisc.	MFNS-S20	EN 1.0038	39.67

Tabella 3.9: Caratteristiche componenti commerciali Guida trasversale

3.3 Primo tool: applicazione finger weeder

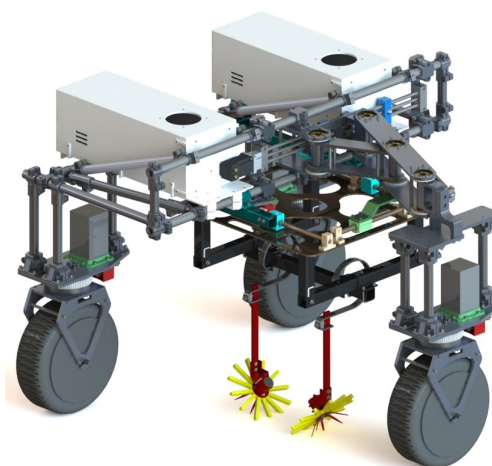


Figura 3.14: Render completo applicazione finger weeder

In questa sezione viene presentata una prima applicazione di AgriMaRo nel campo dell'agricoltura di precisione. La tipologia di lavorazione è stata selezionata in base ai risultati ottenuti dall'analisi svolta all'inizio del presente capitolo. La tecnologia utilizzata per realizzare questa attrezzatura è quella dei "finger weeder", inventata in passato, ma tuttora in fase di sviluppo e miglioramento per renderla sempre più efficace ed efficiente. Il suo utilizzo è mirato a combattere le malerbe all'interno delle coltivazioni, specialmente quelle che si sviluppano tra una pianta e l'altra. Le erbe infestanti sono la causa principale della perdita di resa delle colture e per tale ragione stanno minacciando la produzione di cibo a livello globale. I paesi più industrializzati tendono ad usare erbicidi, in quanto molto efficaci e poco dispendiosi a livello economico. Negli ultimi anni però, l'interesse si è spostato sullo studio di metodi alternativi, evitando prodotti chimici. L'incentivo nel progredire su questo fronte è dovuto a diversi fattori, come la preoccupazione per la salute della popolazione, la richiesta sempre più grande di prodotti alimentari non trattati, l'aumento delle infestanti resistenti ai diserbanti e la sempre più scarsa disponibilità di ingredienti chimici per la loro fabbricazione. Attualmente, il controllo meccanico delle infestanti è la migliore alternativa a quello chimico e vi sono due principali campi applicativi, sulla fila o tra le file della coltura di interesse. La prima tipologia è la più complicata perchè richiede l'applicazione di tool meccanici in grado di effettuare una selezione tra l'infestante e la pianta coltivata, per non compromettere la resa della coltivazione a causa di perdite anomale di piante durante il trattamento. Esistono, però, alcune tipologie di tool per il trattamento delle infestanti che coinvolgono tecnologie avanzate. Questi prevedono l'utilizzo di sistemi visivi che individuano la geometria della malerba e la eliminano, risparmiando le piante sane coltivate e permettendo una minore perdita di resa sul raccolto. Per contro, queste tecnologie sono molto più costose dei metodi meccanici e solo le grosse aziende agricole possono permettersi l'investimento. La

zona interfilare invece, è caratterizzata da un più facile controllo meccanico delle malerbe, in quanto è un'area in cui l'attrezzo può eliminare tutto ciò che è presente sul suolo, senza bisogno di effettuare alcun tipo di selezione. Vi sono, però, alcune colture come la cipolla e la barbabietola che, a causa della loro conformazione durante la crescita, rendono difficoltosa anche questa procedura. Il prodotto "finger weeder" è uno dei più comuni metodi di diserbo meccanico, che agisce sulla fila della coltura, tra una pianta e l'altra. Fondamentalmente è costituito da "dita" di materiale simile alla gomma, attaccate ad una parte conica di acciaio. Il movimento viene fornito dall'avanzamento della trattrice combinato con l'attrito del tool con il terreno. L'aspetto più interessante di questa tecnologia è proprio la semplicità, in quanto non c'è bisogno di complicati sistemi di controllo per azionare il sistema quali, per esempio, sensori ottici. La selezione viene svolta semplicemente grazie ad una differenza strutturale della pianta. Infatti, le infestanti possiedono un limitato apparato radicale nei loro primi stadi di crescita. Tale caratteristica le differenzia dalla pianta della coltura coltivata, la quale possiede un sistema di radici più folto e quindi risulta essere ben ancorata al terreno. L'aspetto negativo di questa tecnologia è il potenziale danno che viene apportato anche alle piante coltivate, in quanto piccole imprecisioni sulla geometria della fila o nell'apparato radicale della pianta potrebbero provocare la non riuscita dell'intervento sul suolo. Per questa ragione, la tecnologia sfruttata dai "finger weeder" è più adatta per coltivazioni trapiantate. In questo caso, la pianta è già relativamente sviluppata nel momento in cui viene messa nel terreno e presenta una struttura più solida fin dal momento di inizio crescita delle malerbe. Ciò rappresenta un vantaggio, in caso di utilizzo del tool descritto per il controllo delle infestanti. I metodi di diserbo meccanico dimostrano un buon livello di efficacia, ma la raccomandazione principale per il loro utilizzo è effettuare il trattamento quando la pianta infestante è debole e sensibile. Infatti, alcuni studi hanno dimostrato la perdita di efficacia del trattamento se

effettuato troppo tardi. Nello specifico, riferendosi all'utilizzo di finger weeder, il range di efficacia è compreso tra la comparsa della seconda e quarta foglia della pianta infestante. Ciò comporta che l'utilizzo di tale metodo ha una finestra di applicazione limitata e va spesso combinato con altre tecnologie per raggiungere un risultato migliore. I finger weeder, come altri metodi meccanici di rimozione delle malerbe, effettuano la lavorazione seppellendo e/o sradicando la pianta da scartare. La forza necessaria per l'azione di sradicamento dipende dalla tipologia di pianta e vi sono diversi fattori che ne influenzano il modulo. Tra questi la condizione del suolo, il grado di crescita della pianta da eliminare e la geometria dell'apparato radicale. Alcuni recenti esperimenti condotti su campi sperimentali con l'utilizzo dei finger weeder, hanno evidenziato come la specie di infestante abbia influenza sulla forza richiesta per l'estrazione della pianta e sull'efficacia del trattamento in generale. Il risultato dell'analisi condotta ha rivelato la maggiore sensibilità delle infestanti a foglia larga rispetto alle graminacee. Ciò si è tradotto in una maggiore forza sradicante da applicare nel caso di graminacee in quanto hanno un apparato radicale più complesso e strutturato. Di conseguenza, un trattamento svolto su specie di erba a foglia larga può avere una finestra applicativa ed efficace più ampia; nel caso di graminacee, per raggiungere risultati migliori e svolgere un controllo continuativo, occorre integrare il diserbo meccanico con altre metodologie operative e, talvolta, ricorrere all'utilizzo congiunto di erbicidi [33], [34].

L'applicazione realizzata e descritta nella presente sezione è rappresentata, completa di piattaforma di connessione con il telaio del robot, in figura 3.14. Nello specifico, il tool è prodotto dall'azienda Tilmor [35], specializzata nella progettazione e realizzazione di attrezzature per la semina, la lavorazione del terreno, la raccolta e la post-raccolta. La filosofia di questo marchio è quella di produrre oggetti utili e accessibili anche per le piccole aziende agricole, permettendo di migliorare la loro produttività. Lo sviluppo di questa applicazione è nato dalla ripresa

di una proposta inserita all'interno del primo documento di tesi sviluppato su questo robot [1]. Il modello di riferimento scelto appartiene alla categoria "Finger Weeders"; la dimensione selezionata in questo caso è di 9 pollici, in quanto più compatta rispetto agli altri modelli e inseribile nel *workspace* di AgriMaRo. Il finger weeder è collegabile alla struttura in vari modi, customizzati dall'azienda in base all'applicazione di interesse. Purtroppo, non è stato possibile reperire la rappresentazione CAD di questo prodotto tramite l'azienda; perciò, si è scelto di eseguire una rappresentazione abbastanza fedele alle dimensioni reali con l'ausilio del software Solidworks [32]. Per agevolare la comprensione si riporta, di seguito, una descrizione dettagliata del prodotto, utilizzando alcune immagini prese dal sito del produttore.

La parte finale del tool è composta da un supporto in acciaio, opportunamente raccordato, avente il compito di sostenere il gruppo rotante.



Figura 3.15: Gruppo rotante finger weeder [35]

Il gruppo rotante è costituito da tre parti principali: il mandrino, il disco e la piastra motrice, visibili nelle seguenti immagini.

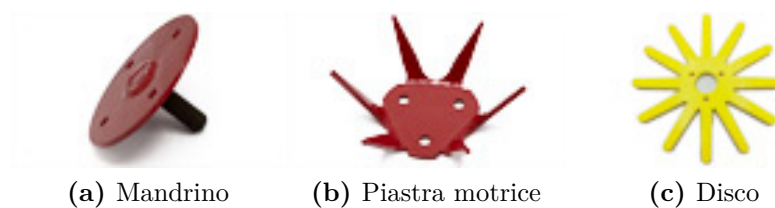


Figura 3.16: Gruppo rotante [35]

I componenti raffigurati sono specifici per il disco da 9 pollici. Quest'ultimo può avere diverse consistenze, a seconda dell'applicazione in cui verrà usato. Tilmor ha deciso di identificare le diverse mescole utilizzando le seguenti corrispondenze:

- rosso: mescola morbida
- giallo: mescola intermedia
- arancione: mescola dura

Si specifica che il disco a mescola dura nell'immagine sottostante è di dimensioni maggiori per mancanza di altra fonte all'interno del sito.

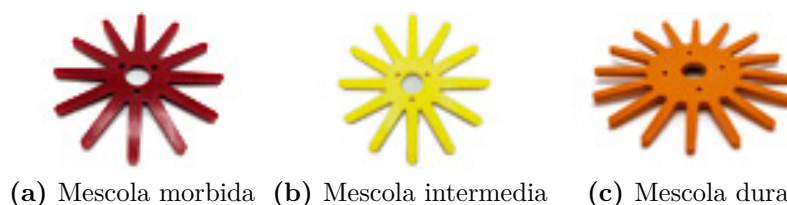


Figura 3.17: Dischi con mescole diverse [35]

Il produttore permette di configurare il tool a seconda delle esigenze del cliente. Infatti, è possibile creare diverse configurazioni, componendole nei modi più svariati e combinando i finger weeder anche ad altre attrezzature. Di seguito vengono riportati alcuni esempi applicativi, presi dal sito Tilmor.

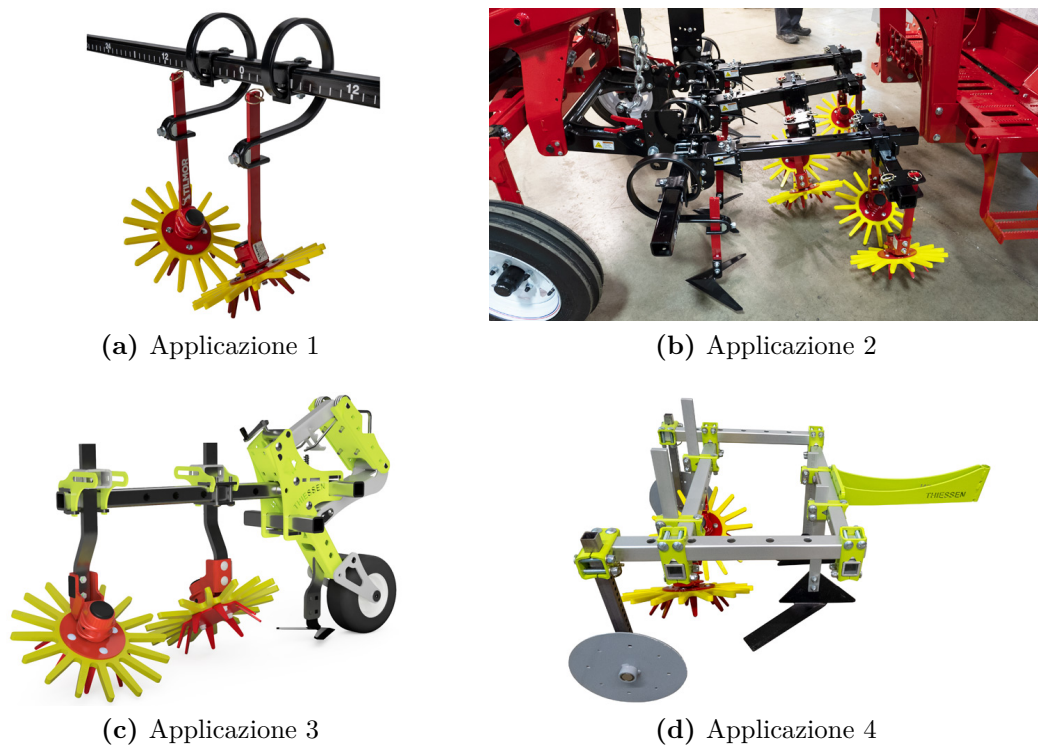


Figura 3.18: Applicazioni finger weeder [35]

Come si può notare dai numerosi esempi, i dischi flessibili vanno sempre accoppiati, in modo che contengano la fila coltivata da trattare. A livello pratico accade che, a causa del diverso diametro tra i denti connessi alla piastra motrice e le "dita" del disco, queste ultime possiedono una velocità tangenziale maggiore. Al contatto con il terreno, quindi, il disco slitta rispetto al suolo e, tale movimento, provoca il distacco delle radici delle malerbe dal terreno. La figura precedente mostra, inoltre, che è possibile abbinare tale tecnologia con altre attrezzature, per esempio piccole zappe o versoi atti a rincalzare il terreno presente tra le file coltivate, rinfrescando il terreno sottostante la pianta e ricoprendo eventuali residui di infestanti sradicate. La struttura portante del gruppo rotante può essere variamente configurata. Innanzitutto, l'asta che collega l'*end-effector* con il telaio può essere rigida o flessibile. Infatti, come si può notare dall'immagine, esistono alcune molle che permettono

di ammortizzare le asperità e imperfezioni del terreno, rendendo meno rigido il collegamento con il telaio e causando, perciò, un livello inferiore di vibrazioni. Le travi che realizzano la struttura portante sono appositamente forate per rendere il sistema più versatile. In questo modo le dimensioni della zona lavorata possono essere riadattate a seconda dell'aiuola orticola da trattare. La loro geometria è rappresentata da tubolari a sezione quadrata in acciaio, rendendo la struttura semplice e snella, ma resistente.

Non avendo a disposizione il CAD originale e non avendo richiesto un preventivo dettagliato all'azienda in questa fase preliminare di sviluppo dell'applicazione, è stata disegnata una versione riadattata alla struttura di AgriMaRo, della quale si riporta una figura di dettaglio di seguito.

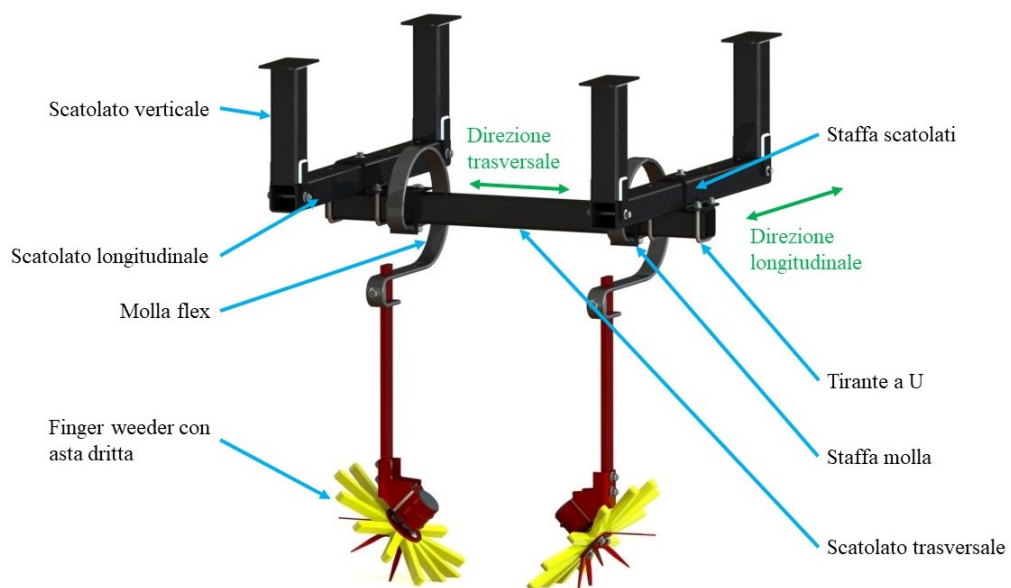


Figura 3.19: CAD struttura applicazione finger weeder

Lo spazio occupato dalla struttura visibile in figura 3.19 è ottimizzato per essere contenuto all'interno del *workspace* del robot, anche nella configurazione più compatta. Di conseguenza le travi, chiamate commercialmente "scatolati", sono state customizzate per questa esigenza. Nello specifico, lo scatolato verticale è

saldato all'estremità superiore con una piastra forata, utile per il collegamento con la piastra di attacco del tool, progettata in precedenza. All'estremità inferiore è saldato con due piastre che fungono da incastro per lo scatolato longitudinale. Queste ultime prevedono un foro passante per ospitare la vite di collegamento M6. La trave posta in direzione longitudinale porta una serie di fori passanti filettati M6 per poter avvitare la staffa di collegamento in posizione più avanzata o arretrata. Tale componente serve per avvitare due tiranti a U, con filettatura M6, che rappresentano la sede per l'inserimento dello scatolato trasversale. Questo ospita le staffe che permettono di collegare le molle alla struttura fissa. La regolazione in larghezza può, quindi, essere effettuata cambiando la posizione delle staffe per le molle, assicurate alla trave trasversale grazie a un bullone M8. La regolazione in altezza si effettua variando la posizione reciproca dell'asta e della molla, tramite il serraggio di una vite M8, che forza il contatto tra due superfici. Quelle dell'asta verticale e di un distanziale forato incastrato tra molla ed asta. Otto bulloni M6 assicurano la totalità della struttura alla piattaforma di centraggio, posta al di sotto del telaio del robot, assicurando la stabilità dell'intero sistema. Al fine di chiarire meglio l'assemblaggio dei componenti del complessivo, si riporta di seguito un esploso del CAD di riferimento e, a seguire, i disegni quotati delle parti customizzate, con lavorazioni particolari, utilizzate per la struttura appena descritta.

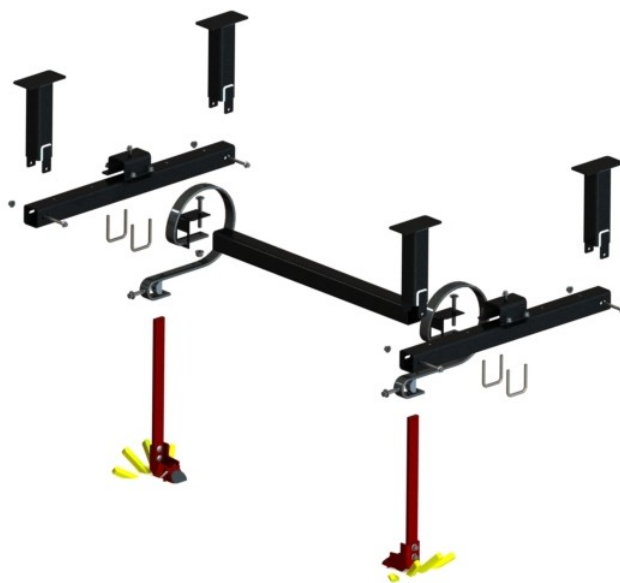


Figura 3.20: Esploso complessivo applicazione finger weeder

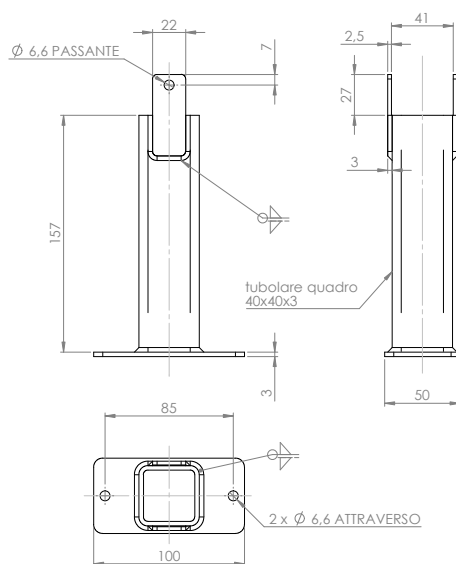


Figura 3.21: Scatolato verticale

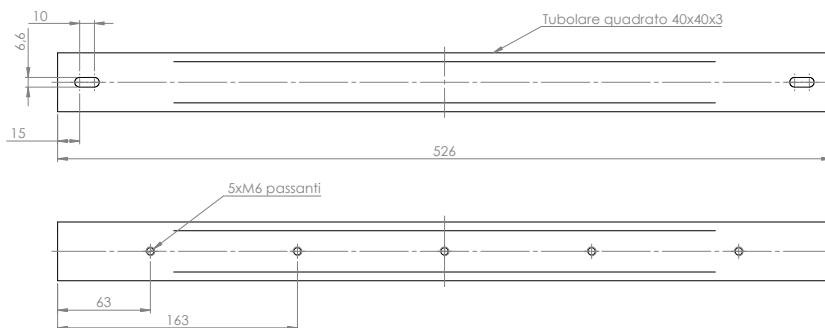


Figura 3.22: Scatolato longitudinale

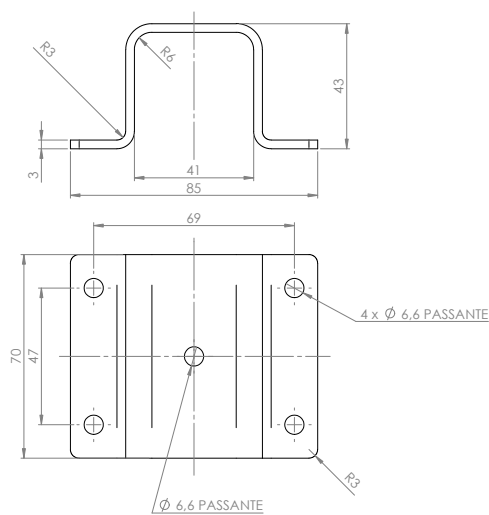


Figura 3.23: Staffa scatolati

Infine, viene riportata una tabella con le caratteristiche principali dei componenti lamierati customizzati.

Parte	Materiale	L [mm]	Profilo bxhxs [mm x mm x mm]	N°
Scatolato vert.	S235	-	40x40x3	4
Scatolato long.	S235	526	40x40x3	2
Scatolato trasv.	S235	550	40x40x3	1
Staffa scatolati	S235	-	-	2

Tabella 3.10: Caratteristiche componenti customizzati

Si intende specificare che, per quanto riguarda i componenti commerciali, essendosi basati su una rappresentazione approssimativa delle parti reali e non avendo trattato con il produttore per la loro realizzazione, non vengono riportate le caratteristiche dettagliate di questi ultimi, in quanto non ancora definite con precisione in questa proposta applicativa.

3.4 Secondo tool: applicazione distribuzione di fertilizzante

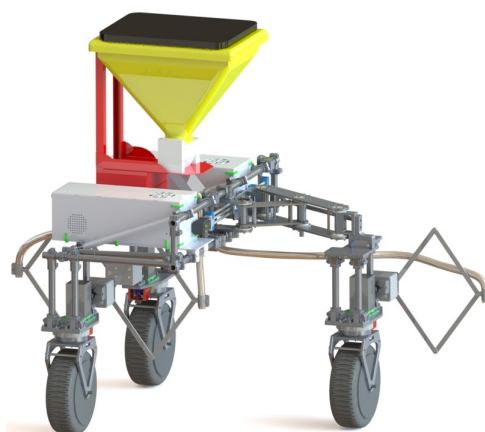


Figura 3.24: Render completo distribuzione fertilizzante

La seconda applicazione pensata per AgriMaRo è rappresentata da uno strumento per la distribuzione di fertilizzante solido. Anche in questo caso, il campo di applicazione rimane l'agricoltura di precisione, in quanto si ricerca la distribuzione localizzata di prodotto e nella quantità esatta rispetto alla richiesta effettiva della pianta. L'obiettivo è quello di sviluppare un'attrezzatura da applicare alla struttura del veicolo, la quale permetta di trasportare una certa quantità di concime, contenuta all'interno di un serbatoio e distribuirla direttamente sul filare in cui sono disposte le piante coltivate. Anche in questo caso, occorre porre attenzione all'adattamento di tale attrezzatura rispetto al cambio di carreggiata. Infatti, in qualunque condizione, il robot deve essere in grado di distribuire prodotto alla larghezza adeguata e in modo coordinato rispetto alla carreggiata presente tra le aiuole ortofrutticole.

Dalla letteratura è noto che la crescita delle piante necessita dell'apporto di sostanze nutritive come azoto, fosforo e potassio. Questi elementi, se non sono sufficientemente presenti all'interno del terreno coltivato, devono essere apportati artificialmente e ciò si può realizzare attraverso diverse tecniche e prodotti. Innanzitutto, è opportuno classificare le tipologie di concimazione che si possono effettuare sulla coltivazione, brevemente esposte di seguito per una migliore comprensione [36], [37].

- **Concimazione ordinaria**

Lo scopo dell'applicazione di questa tecnica è il mantenimento delle proprietà del suolo. Nello specifico, vi sono due principi che vengono seguiti in questo caso: l'anticipazione e la restituzione. Il primo è preferibile, in quanto prevede di agire in anticipo rispetto alla presenza effettiva della pianta nel terreno, al fine di fornire a quest'ultimo il giusto apporto di elementi nutritivi che verranno consumati dalla pianta. Il secondo presuppone la semplice restituzione delle risorse consumate dalla coltura in fase di crescita e sviluppo, al fine di riportare

la fertilità del terreno ad un livello accettabile. Solitamente viene utilizzato il primo, in quanto è maggiormente cautelativo rispetto alla produttività del terreno e della coltivazione [37].

- **Concimazione di fondo**

Questa tecnica non è ricorsiva, in quanto è prevista solamente per la prima messa a coltura di coltivazioni erbacee o legnose. L'obiettivo è rappresentato dal grande apporto di sostanze nutritive in profondità, dove andranno a farsi spazio le radici delle piante. Questa concimazione trova luogo anche in contesti in cui il terreno proviene da una coltivazione pluriennale che ha richiesto una notevole quantità di risorse al terreno. In questo caso la tecnica prende il nome di "Concimazione di arricchimento" [37].

- **Concimazione minerale e organica**

La concimazione minerale è costituita dall'utilizzo di prodotti provenienti dall'industria estrattiva. Essi costituiscono la base dei concimi, che vengono assemblati grazie all'utilizzo di processi chimici. Pertanto, questo tipo di fertilizzante non può essere utilizzato in caso di regime di coltivazione biologico. I concimi organici sono, invece, prodotti completamente biologici, derivati dalla combinazione del carbonio con altri elementi nutritivi per le colture. Gli esempi principali di questo tipo di fertilizzanti sono il letame e il liquame, normalmente prelevati dalle lettiere degli animali presenti all'interno degli allevamenti. Queste due categorie sono in contrapposizione per quanto riguarda efficacia e dosaggio. Infatti, i concimi minerali sono molto più efficaci degli organici, in quanto sono appositamente prodotti per avere un titolo elevato di sostanze nutritive per il terreno. Pertanto, a parità di superficie trattata, la quantità di concime minerale da distribuire è molto inferiore rispetto all'organico. Allo stesso tempo, i costi di produzione dei fertilizzanti minerali sono più elevati rispetto agli organici. La scelta di una o l'altra tipologia

dipende fortemente dall'azienda agricola che va ad utilizzare questi prodotti e dal regime di coltivazione che adotta; inoltre, è fondamentale considerare la composizione del terreno in cui è posta la coltura [37].

- **Fertirrigazione**

Questa tecnica è particolare rispetto alle altre, in quanto utilizza un mezzo di diffusione della sostanza fertilizzante, cioè l'acqua di irrigazione della coltivazione. Normalmente viene applicata ad impianti di irrigazione localizzati e sottoposti a pressione controllata, al fine di dosare al meglio la quantità di elementi nutritivi per le piante, posti all'interno della soluzione. Molto spesso vengono utilizzati concimi minerali e non organici, a causa della possibile sporcizia presente all'interno di questi ultimi, che potrebbe provocare l'ostruzione delle valvole di dosaggio o dei terminali di distribuzione [37].

- **Concimazione fogliare**

Come si può evincere dal nome stesso, questo tipo di concimazione sfrutta la capacità delle piante di assorbire elementi nutritivi tramite le foglie. Va tenuto presente che, nonostante questo metodo di assorbimento sia molto efficace, la quantità di prodotto che possono assorbire le foglie è limitata e ciò che non viene utilizzato costituisce uno spreco. Inoltre, occorre porre attenzione alla concentrazione della soluzione fertilizzante, dal momento che il prodotto può diventare fitotossico in determinate condizioni; quindi, può costituire un danno per la pianta [37].

A corredo della valutazione delle tipologie di fertilizzazione, è opportuno specificare che l'apporto di azoto sui terreni coltivati non costituisce sempre un beneficio. Infatti, a causa dell'aumento della richiesta di cibo, i produttori sono portati ad aumentare la resa delle coltivazioni per ottimizzare la superficie utilizzata. Ciò provoca un aumento della concentrazione di azoto nel terreno per poter fornire il corretto apporto nutritivo alle piante. Di conseguenza, siccome le risorse del

terreno o la sostanza organica apportata non è più sufficiente per soddisfare la produzione richiesta, si utilizzano fertilizzanti minerali. Questi ultimi, se distribuiti in dosi elevate, possono provocare danni all'ambiente circostante la coltivazione. Alcuni studi condotti in serra evidenziano, infatti, l'aumento delle emissioni gassose di sostanze inquinanti, provocato dall'eccessiva concentrazione di azoto nella zona coltivata [36]. Tale aspetto è fortemente legato al tema portato avanti in questo documento, cioè l'agricoltura di precisione. Infatti, eseguendo opportunamente attività di monitoraggio sulla coltivazione e utilizzando attrezzatura precisa per la distribuzione di prodotti fertilizzanti, è possibile ridurre l'impatto provocato dall'utilizzo di sostanze nutritive di apporto sul terreno. L'utilizzo di prodotti per il miglioramento del livello di fertilità del terreno è opportuno solo dove il suolo lo richiede, evitando sprechi e costi aggiuntivi. La trattazione prosegue con la descrizione e la motivazione delle scelte effettuate per l'applicazione di interesse. La scelta dell'attrezzatura da applicare alla struttura del robot si è basata sulla valutazione di un prodotto commerciale, effettuata in un documento di tesi precedente riguardo ad AgriMaRo [1]. Il nome commerciale di questo prodotto è MDG 40 M1, di APV [38]; di seguito ne viene riportata un'immagine rappresentativa in figura 3.25.



Figura 3.25: MDG 40 M1 [38]

Questo attrezzo è stato progettato per la dosatura e distribuzione di sementi

o pellet senza l'utilizzo di un flusso d'aria. Infatti, la lettera "G" presente nella sigla sta per *Gravitation*; ciò indica che il trasporto del prodotto da distribuire avviene sfruttando semplicemente la gravità. Tale aspetto agevola notevolmente l'alimentazione ed il controllo di questo attrezzo, pensando all'applicazione sulla struttura di AgriMaRo. L'alimentazione di questo sistema, infatti, è costituita unicamente dal prodotto da distribuire e dalla tensione fornita al motore di dosaggio. Quest'ultimo porta in rotazione un albero di semina che, grazie ad alcuni elementi opportunamente dimensionati, lascia passare la corretta quantità di semente o pellet per ogni rotazione compiuta. Il controllo di questo sistema è affidato ad un modulo elettronico, collegato alla macchina operatrice su cui è montato questo dispositivo. Vi sono quattro tipologie di configurazione del modulo, a seconda delle esigenze dell'operatore. Una di queste, la più evoluta, permette la connessione ISOBUS direttamente con il PC di bordo della macchina, visualizzando i dati ed i parametri impostati sullo schermo già presente a bordo. La facilità di installazione di questo prodotto risiede proprio nella semplicità dei collegamenti da realizzare, che vengono raggruppati in un unico connettore. La versione selezionata prevede un serbatoio con una capacità di 40 litri. La massa complessiva del sistema, costituito da serbatoio, dispositivo di attuazione e distribuzione e telaio di sostegno, raggiunge i 22 kg. Le dimensioni di massima sono comprese nel volume avente un'altezza di 83 cm, una larghezza di 47 cm ed una profondità di 60 cm. L'alimentazione del motore prevede una tensione di 12 V e una corrente di 10 A. Esiste anche una versione di questo attrezzo con serbatoio da 100 litri di capacità; per motivi di pesi e ingombri, però, non è stata presa in considerazione. Nel contesto applicativo del robot in questione, è fondamentale l'ottimizzazione degli spazi occupati da tutti i sottosistemi. Le dimensioni del volume disponibile sono contenute e l'adattamento di attrezzature agricole, genericamente caratterizzate da un ingombro notevole, non è di facile attuazione. Per contestualizzare questo aspetto, si riporta una

rappresentazione dell'area destinata all'inserimento dell'applicazione sulla struttura portante di AgriMaRo. In figura 3.26 la superficie è evidenziata con un rettangolo rosso.

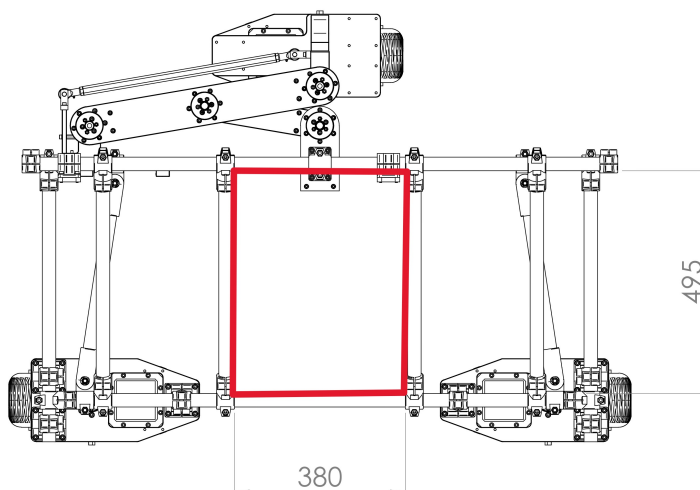


Figura 3.26: Superficie disponibile per l'attrezzatura, in mm

Per chiarire meglio le modalità di montaggio di questa attrezzatura, di seguito vengono riportate alcune immagini a titolo esemplificativo.



(a) Applicazione su erpice

(b) Applicazione su seminatrice

Figura 3.27: Esempi applicativi MDG 40 M1 [38]

3.4.1 Struttura di collegamento del serbatoio

Come è visibile dalle immagini precedenti, è necessario creare una struttura di sostegno per il serbatoio. Essa deve poter permettere l'adattamento dell'attrezzo rispetto al veicolo, senza creare intralcio alla componentistica già presente a bordo macchina ma, allo stesso tempo, garantendo adeguata rigidità per sorreggere il peso dovuto alla struttura ed al suo contenuto. Un altro aspetto importante è rappresentato dalla facilità di montaggio e smontaggio dell'applicazione. Infatti, come detto in precedenza, AgriMaRo è un robot versatile che deve poter portare diverse attrezzature per svolgere svariate lavorazioni all'interno delle serre. Risulta fondamentale, quindi, garantire velocità e facilità per l'operatore durante la procedura di cambio attrezzo. L'azienda produttrice del MDG 40 M1 consiglia il montaggio attraverso l'utilizzo di una piastra e contropiastra aventi una superficie di appoggio minima di 240 x 140 cm, unite da 8 bulloni con diametro minimo 10 mm. Questa modalità di montaggio non risulta efficiente nel caso di AgriMaRo, in quanto non è presente una trave di profilo tubolare attorno alla quale stringere le piastre di collegamento. Essendo, infatti, un attrezzo creato per l'agricoltura in campo aperto, si prevede il montaggio su una struttura di dimensioni rilevanti. Nel caso del robot in questione, i tubolari costituenti il telaio sono caratterizzati da un diametro di soli 30 mm. Ne consegue che la struttura da creare per connettere i due sottosistemi rappresenta un compromesso tra le esigenze strutturali di entrambi gli oggetti. Al fine di fornire una spiegazione più comprensibile della struttura, di seguito ne viene riportata un'immagine rappresentativa in figura 3.28.



Figura 3.28: Struttura di collegamento dell'attrezzatura

L'aspetto cruciale è costituito dai punti di appoggio della struttura portante dell'attrezzatura sul telaio della macchina. In totale sono quattro e sono situati sui tubolari tondi che formano la base del telaio di AgriMaRo. Al fine di creare una struttura comoda per la connessione all'attrezzo, sono stati inseriti due tubolari in alluminio caratterizzati nuovamente da un diametro di 30 mm, posizionati in modo ortogonale rispetto ai tubolari di appoggio. Per permettere l'unione di questi componenti, sono stati selezionati dei morsetti Elesà [26]. Questi ultimi sono suddivisi in due parti, per poter agevolare il disaccoppiamento dei due tubolari trasversali rispetto al telaio del robot. Proseguendo in verticale, si trovano quattro morsetti, già utilizzati per connettere il meccanismo di variazione carreggiata al telaio. La particolarità che li caratterizza risiede nella superficie piana, che consente l'inserimento di un collegamento filettato tra il morsetto e una lamiera forata. Inoltre, il profilo circolare del morsetto è smontabile grazie alla presenza di due bulloni. La superficie piana dei morsetti è stata connessa a quattro scatolati flangiati,

aventi profilo 30 x 30 x 1.6 mm. L'inserimento di questi ultimi è fondamentale per poter innalzare il piano di appoggio della struttura dell'attrezzo, in modo da evitare sovrapposizioni con il telaio del robot. La flangia superiore dei profili tubolari quadri è collegata attraverso 16 bulloni M6 ad una lamiera piana, saldata perimetralmente alla struttura creata da APV [38]. Come detto in precedenza, le scelte fatte per connettere i diversi componenti sono scaturite da alcuni compromessi, dovuti principalmente alla geometria dei sottosistemi da unire. Come regola generale, si è cercato di mantenere il più distante possibile i quattro punti di appoggio, per garantire una maggiore stabilità. Di seguito, viene riportato un esploso del sistema di montaggio dell'attrezzatura appena descritta e, successivamente, i disegni quotati dei componenti customizzati. Infine, due tabelle riassuntive con le caratteristiche delle singole parti.

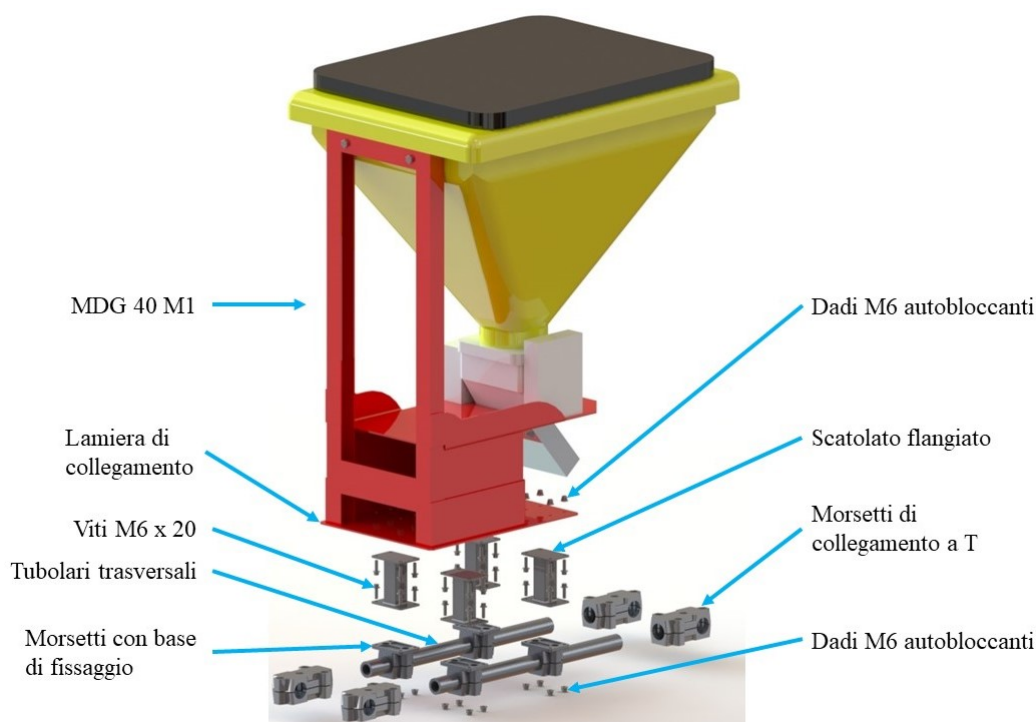


Figura 3.29: Esploso struttura di collegamento MDG 40 M1

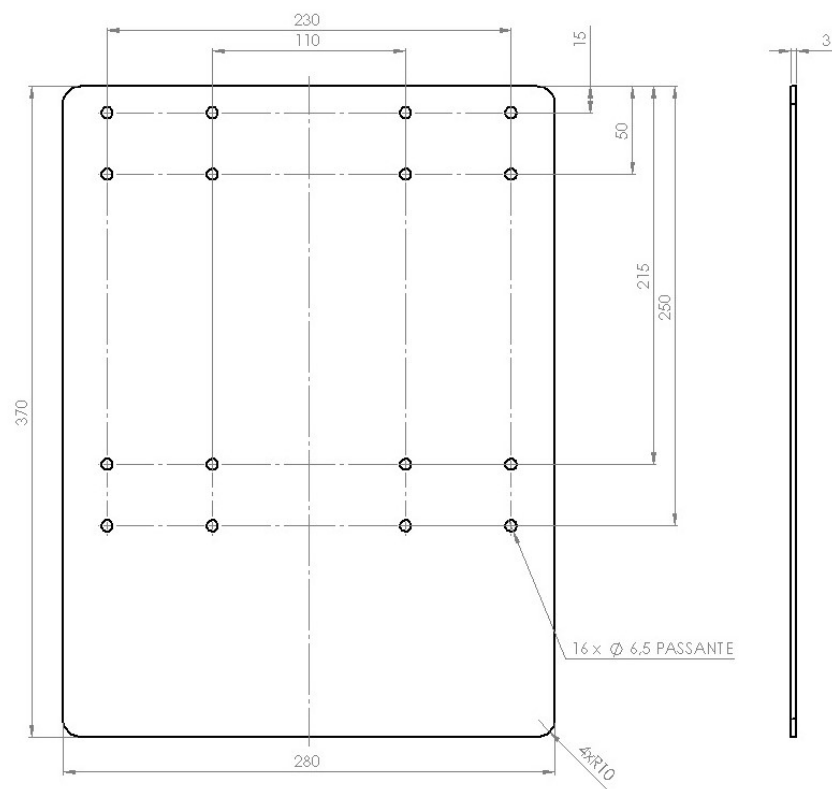


Figura 3.30: Lamiera di collegamento

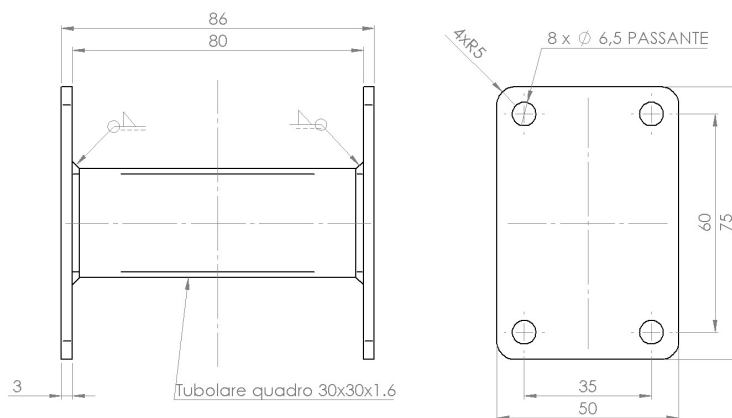


Figura 3.31: Scatolato flangiato

Parte	Materiale	L [mm]	Sezione [mm x mm]	N°
Scatolato flangiato	S235	-	-	4
Lamiera di collegamento	S235	-	-	1
Tubolare trasversale	L6060 T5	450	30x5	2

Tabella 3.11: Caratteristiche componenti customizzati MDG 40 M1

Descrizione	Codice	Materiale	N°	Prezzo unità [€]
Mors. a T	GN 193-B30-B30-50-2-BL	All.	4	34,34
Mors. con base	GN 147-B30-1-BL	All.	4	-

Tabella 3.12: Caratteristiche componenti commerciali Elessa [26]

3.4.2 Dispositivo di distribuzione fertilizzante



Figura 3.32: Meccanismo di distribuzione

L'attrezzo selezionato per questa applicazione consente di scegliere se distribuire il prodotto fertilizzante, o la semente, in modo localizzato o diffuso. Nel primo caso, a valle del dosatore, è inserito un collettore destinato al collegamento di tubi flessibili che trasportano per gravità il prodotto fino al punto desiderato. L'alternativa è rappresentata da un disco palettato che diffonde il concime o la semente su una superficie ampia, utilizzato perlopiù in campo aperto. Nel caso di AgriMaRo, l'applicazione si presta alla distribuzione localizzata ed è, pertanto, necessario creare un percorso atto a veicolare il prodotto da somministrare alla pianta dal serbatoio al terreno. In particolare, siccome questo sistema sfrutta solamente la gravità per fornire energia cinetica al prodotto, occorre porre attenzione a non creare tratti orizzontali durante il percorso, al fine di evitare ostruzioni. I tubi normalmente utilizzati per questa esigenza sono molto flessibili ed adattabili a varie lunghezze e percorsi. Pertanto, si è scelto di movimentare la parte finale del condotto con l'ausilio di un morsetto, il quale si muove orizzontalmente per poter variare la traiettoria di distribuzione del prodotto. Per garantire un ingombro contenuto in posizione retratta, si è scelto un meccanismo semplice, quale un pentalatero. La particolarità, in questo caso, sta nel fatto che le due cerniere sono molto ravvicinate tra loro e la motricità viene fornita ad una sola di esse; ciò permette di avere un unico grado di libertà per controllare l'intero meccanismo. Tale vantaggio è permesso grazie all'utilizzo di una trasmissione del moto realizzata tramite l'accoppiamento tra due ruote dentate aventi lo stesso numero di denti. Di seguito, viene riportata una rappresentazione schematica del meccanismo, realizzata con il software GIM [19].

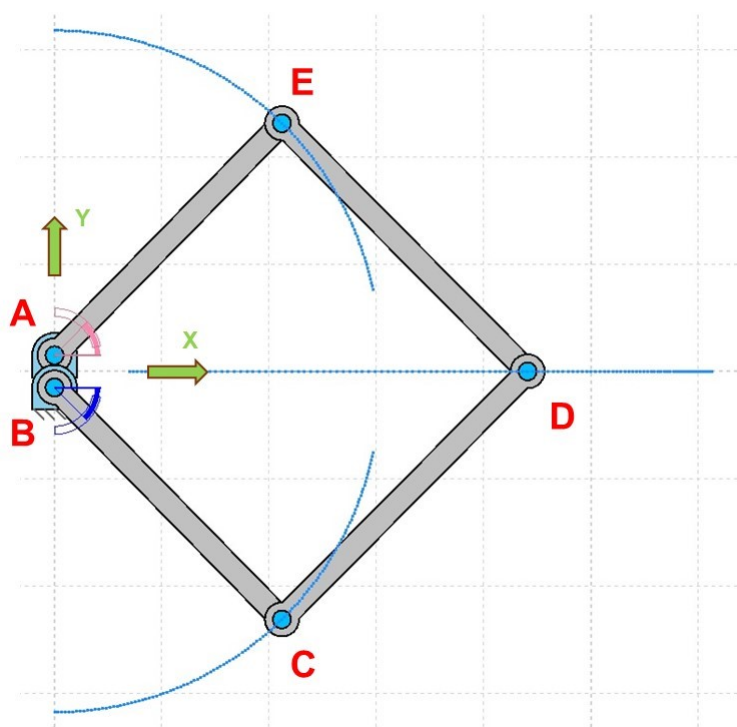


Figura 3.33: Schema meccanismo di distribuzione [19]

Nella figura 3.33 sono visibili i punti notevoli del meccanismo, designati con le lettere in rosso e le traiettorie da loro seguite con linee azzurre. D'ora in avanti, i link \overline{AE} e \overline{BC} verranno chiamati manovelle; i link \overline{DE} e \overline{CD} bielle. Infatti, vedendo il meccanismo suddiviso lungo l'asse X, si possono identificare due sistemi biella-manovella eccentrici. Sostanzialmente, si osserva che la contro-rotazione delle cerniere A e B provoca la traslazione rettilinea del punto D, dove verrà posizionato il morsetto di sostegno del tubo flessibile. Essendo una traslazione orizzontale, il problema che risulta subito evidente è quello del sostegno della struttura stessa e la sua cedevolezza; a tal proposito vanno fatte alcune considerazioni. Il peso da movimentare è pressoché nullo, infatti il tubo ha una massa irrisoria ed è vincolato superiormente alla tramoggia del sistema di dosaggio del fertilizzante. Uno dei requisiti fondamentali dei link deve essere la leggerezza, per evitare di avere problemi nella movimentazione e resistenza meccanica del sistema. Di conseguenza,

la motorizzazione del sistema non deve essere particolarmente prestante in termini meccanici, ma il più possibile precisa nel posizionamento dell'albero motore. Tale requisito è fondamentale per garantire precisione nello spostamento del punto D, in quanto pochi gradi di rotazione del motore corrispondono ad un'ampia traslazione orizzontale. Infatti, percorrendo un angolo di circa 78° , il punto D trasla di 600 mm. Per capire meglio la configurazione selezionata, atta a fornire motricità al sistema, di seguito viene riportato uno schema preliminare; successivamente vengono dichiarati i componenti selezionati e le loro caratteristiche.

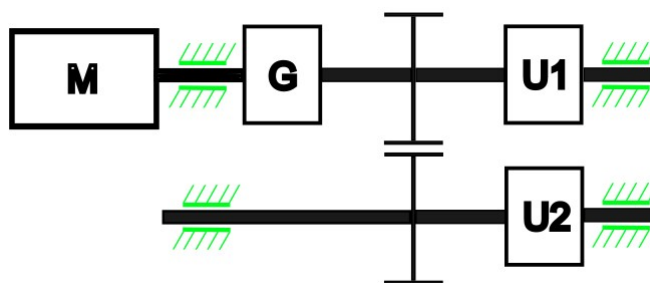


Figura 3.34: Schema a blocchi trasmissione del moto

La descrizione inizia dalla sorgente di energia meccanica, cioè il motore, indicato con il blocco M in figura 3.34. In questo caso è stato selezionato il DYNAMIXEL XH540-W150-T, di Robotis [39]. Con alimentazione a 12 V, raggiunge una coppia di taglio di 7.1 Nm; nominalmente lavora fino ai 4.5 Nm. La massa complessiva è di soli 165 g e le dimensioni sono contenute: il volume occupato è di 33.5 x 58.5 x 44 mm. Questo motore è, infatti, tipicamente utilizzato nella robotica di piccola taglia. Una caratteristica interessante è la presenza, già all'interno del carter motore, dei sensori necessari per il controllo delle variabili cinematiche durante il funzionamento. Questo aspetto lo rende particolarmente versatile e facile da inserire in diversi sottosistemi. Inoltre, questo dispositivo è agevolmente fissabile, grazie alla geometria a parallelepipedo e la predisposizione di fori filettati. In

particolare, è stato selezionato questo modello perchè già presente in laboratorio e adatto alle esigenze di questo sistema.

Proseguendo all'interno dello schema, a valle del motore si trova un giunto elastico con inserto polimerico, atto a smorzare le eventuali vibrazioni create dal moto del meccanismo articolato e rendere più regolare la rotazione della trasmissione, anche nei cambi di direzione. Il modello selezionato accetta un range di coppia dai 3 ai 5 Nm, coerenti con la coppia fornita dal motore. Per connettere il giunto al motore, vista la particolare forma della propria flangia di uscita, è stato creato un albero flangiato collegabile a quest'ultima tramite 8 viti M2.5. Tale componente serve a garantire un'estremità cilindrica, accoppiabile attraverso un grano al giunto di trasmissione. Il diametro selezionato per l'accoppiamento è di 6 mm. Dall'altra estremità del giunto vi è un ulteriore albero di trasmissione, nuovamente di diametro 6 mm, su cui vengono calettati una ruota dentata e la manovella superiore del meccanismo, chiamata U1 in figura. L'albero di interesse è lungo complessivamente 80 mm ed è lavorato per l'inserimento di un anello elastico all'estremità opposta al motore. La ruota dentata ingrana con un'altra ruota avente le medesime caratteristiche, in quanto la velocità in uscita voluta è la medesima e l'unica necessità è quella di invertire il verso di rotazione. La seconda ruota dentata è calettata su un ulteriore albero, posizionato inferiormente rispetto al primo e lungo 118 mm. La motricità viene fornita tramite la ruota dentata e l'utilizzatore U2, in questo caso, rappresenta la manovella inferiore del meccanismo. Le estremità degli alberi sono sostenute da cuscinetti volventi BC6-16AZZ. Per quanto riguarda le ruote dentate, è stato scelto un modulo pari a 1, per poter avere un numero maggiore di denti a parità di diametro e garantire una maggiore precisione nel posizionamento, data la bassa velocità di rotazione attesa. Sono caratterizzate da 30 denti ed una larghezza di fascia pari a 6 mm. Ne consegue che il diametro primitivo è pari a 30 mm, ciò garantisce l'interasse di 30 mm tra

l'albero superiore e quello inferiore. Il sistema di trasmissione viene tenuto insieme da un carter opportunamente dimensionato e realizzato con la tecnica di stampa 3D. Nella parte anteriore è presente la parte di trasmissione del moto, mentre in quella posteriore sono posizionati quattro tiranti per il collegamento alla gamba del robot. La connessione tra gamba e carter avviene nuovamente per mezzo di un morsetto Elesà [26], della stessa tipologia già utilizzata per la connessione del serbatoio per il fertilizzante. Questa collocazione del meccanismo permette di lavorare all'interno del *workspace* dedicato all'attrezzatura, senza interferire con il resto della componentistica, come il telaio o la scatola per l'alloggiamento dei componenti elettronici.

Per il buon funzionamento del meccanismo, occorre che il punto D trasli fino alla metà della massima carreggiata; in questo modo è possibile garantire il trattamento del filare coltivato. Ne consegue che è stata scelta una corsa di 600 mm, con una posizione minima del tubo a 70 mm di distanza dall'asse motorizzato del meccanismo e una posizione massima a 670 mm da esso. Per concretizzare il progetto del meccanismo è stato essenziale trovare la giusta configurazione di biella e manovella per raggiungere la corsa voluta, pur mantenendo ingombri contenuti e un interasse fissato tra le ruote dentate. Dopo diversi tentativi, si è giunti alla configurazione definitiva, che prevede una manovella lunga 318 mm e una biella lunga 335 mm. Per snellire il sistema e renderlo più leggero, i link vengono realizzati in materiale plastico, con la tecnica di stampa additiva. Lo stesso vale per il manicotto che vincola il tubo flessibile al meccanismo; in questo caso un bullone permette di regolare la forza di presa sul tubo stesso. Per questo motivo, occorre utilizzare un tipo di materiale più flessibile per la stampa di tale oggetto. I giunti tra i link sono realizzati con delle boccole a strisciamento realizzate da Igus [21]. Nuovamente, il loro materiale costituente è l'iglidur®, caratterizzato da buone capacità di autolubrificazione. L'unione dei giunti è realizzata tramite dei

perni con due sedi per anelli elastici alle estremità. Di seguito, vengono esposte alcune immagini dei componenti commerciali selezionati, i disegni quotati di quelli da realizzare ed un esploso del complessivo assemblato. Infine, vengono riassunte tutte le caratteristiche in due tabelle.



(a) Morsetti di collegamento [26]



(b) Barre filettate [23]

Figura 3.35: Parti di collegamento

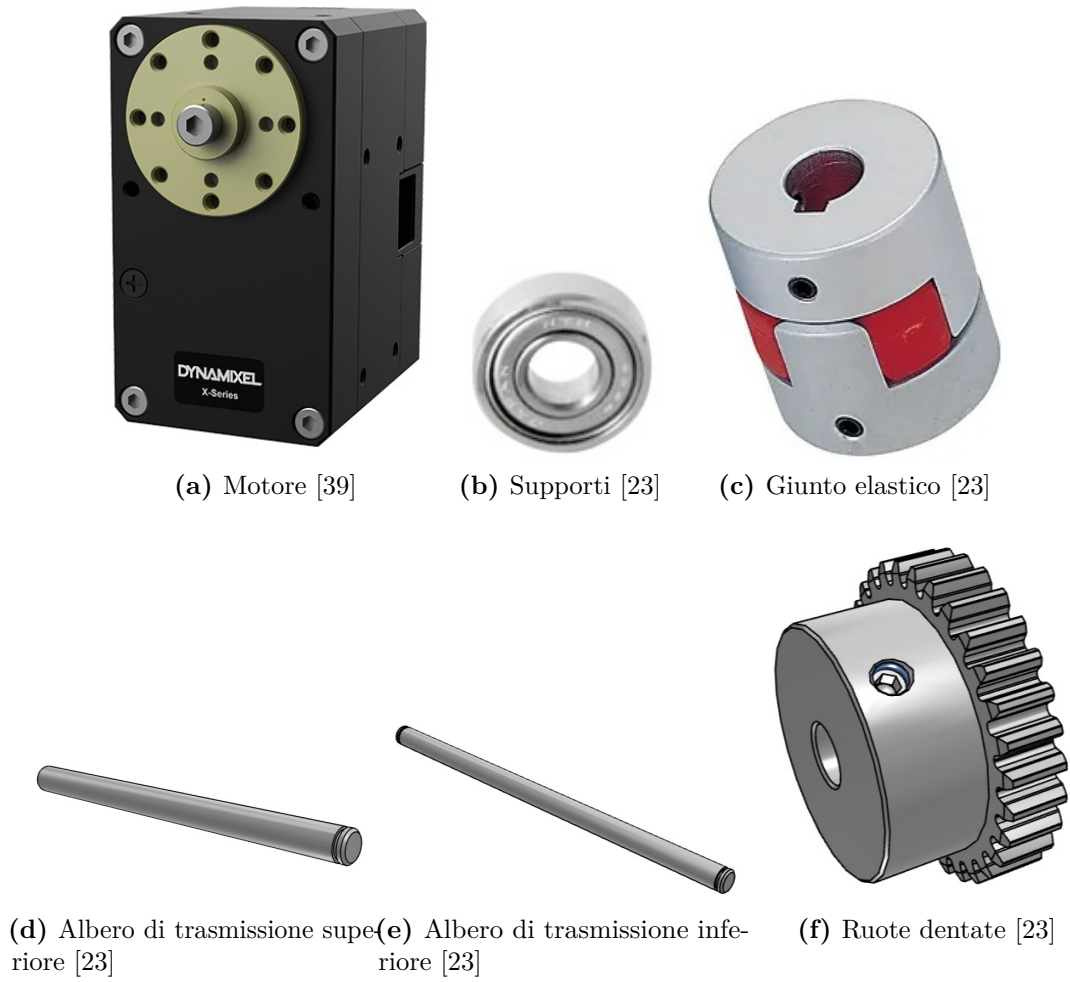


Figura 3.36: Componenti di trasmissione



(a) Inserti filettati per link [23]
 (b) Boccole autolubrificanti [23]
 (c) Perni per giunzioni link [23]

Figura 3.37: Parti di collegamento dei link

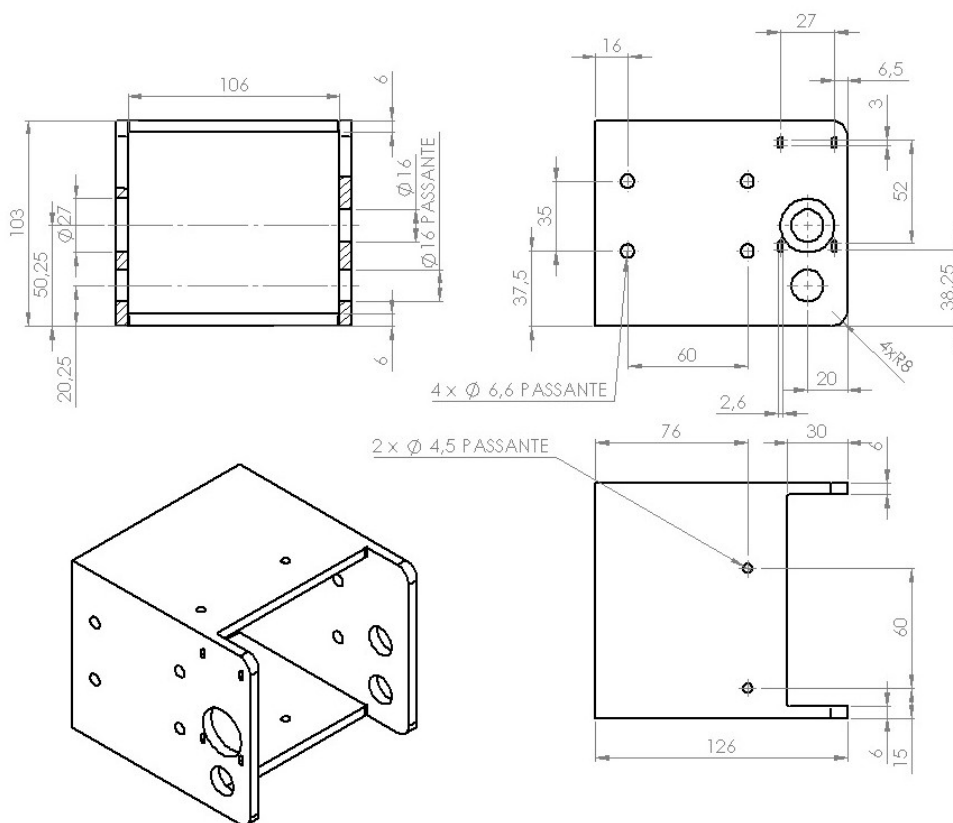


Figura 3.38: Carter meccanismo

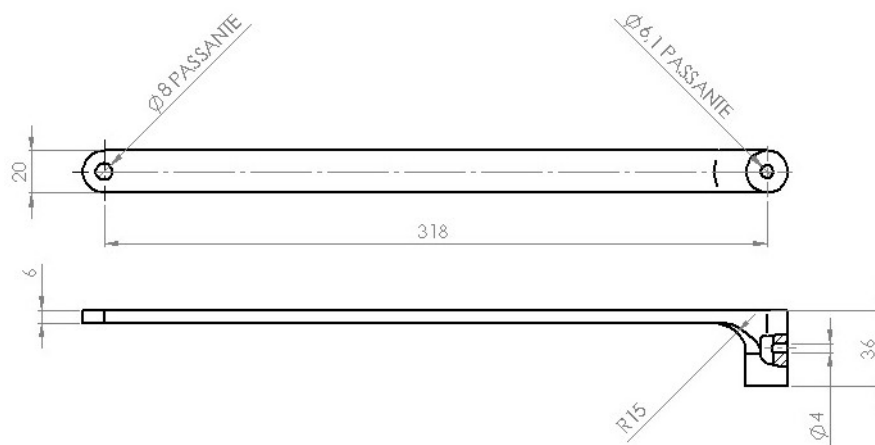
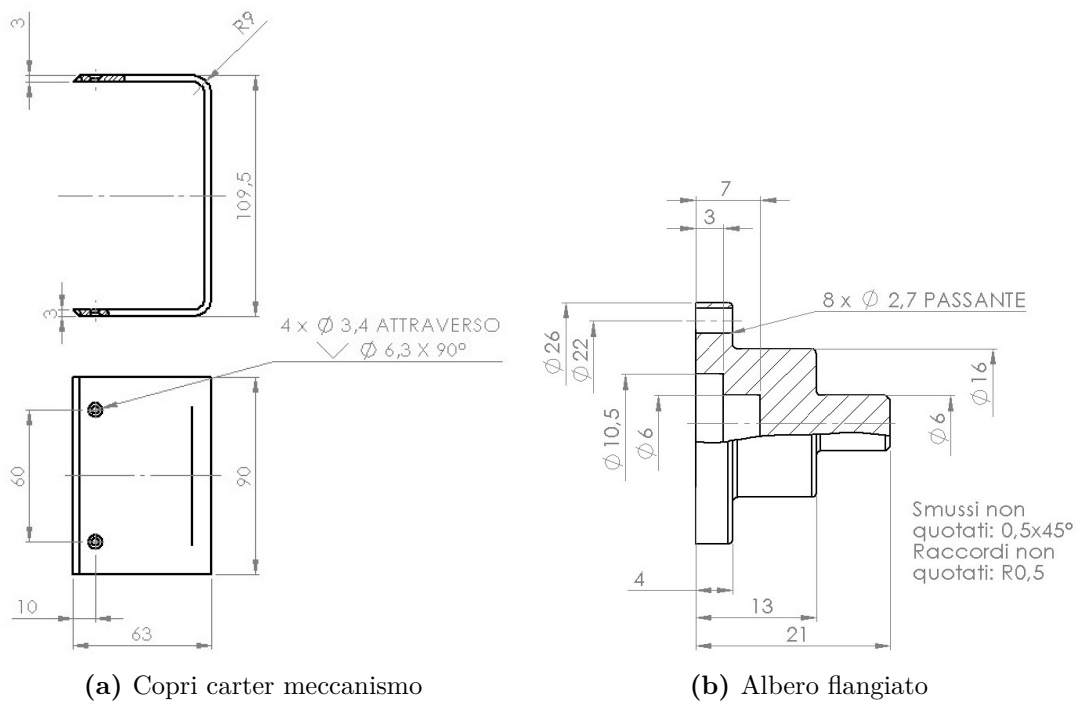


Figura 3.39: Manovella

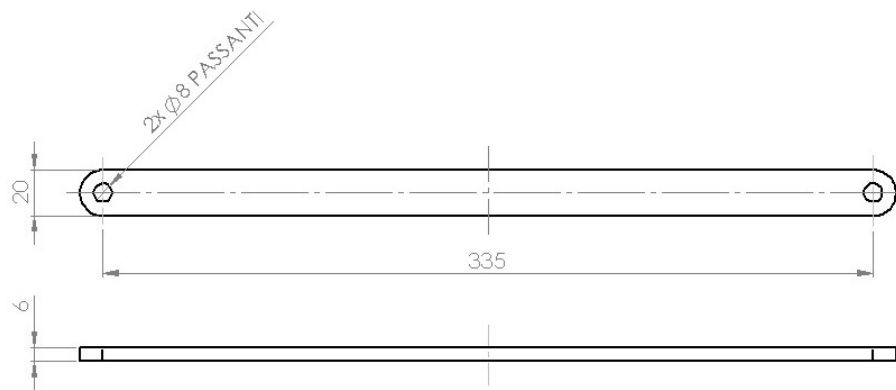


Figura 3.40: Biella

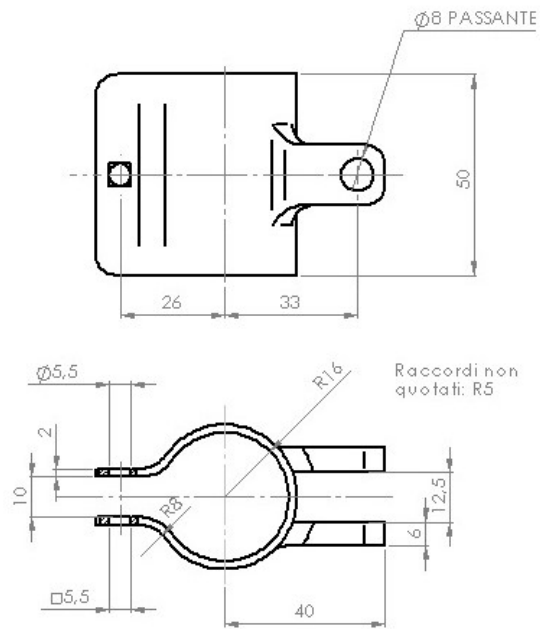


Figura 3.41: Morsetto tubi flessibili

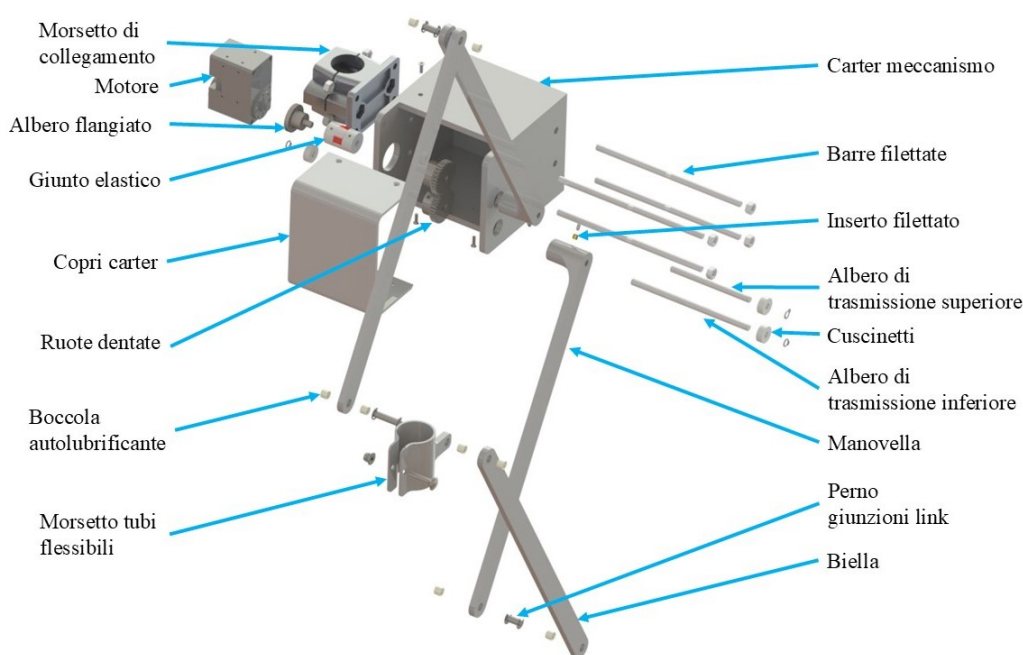


Figura 3.42: Esploso complessivo meccanismo

Nome	Codice	N°	Prezzo unità [€]
Mors. con base	GN 147-B30-1-BL	1	-
Barre filettate	LBRSM6-150	4	6.08
Motore	XH540-W150-T	1	-
Cuscinetti	BC6-16AZZ	3	5.06
Giunto el.	CPJ20-RD-6-6	1	33.53
Albero tr. sup.	FSFJAF-D6-L80-U2	1	10.27
Albero tr. inf.	FSFJFF-D6-L118-H2-U2	1	16.72
Ruota dentata	GEABG1.0-30-6-B-6	2	22.02
Ins. filettati	UD-43040	2	0.33
Boccola autol.	J3SM-0608-06	8	-
Perno link	PCCG6-12	2	8.81
Perno morsetto	PCCG6-24.5	1	8.81

Tabella 3.13: Caratteristiche componenti commerciali per meccanismo

Si specifica che i componenti per cui non è stato indicato il prezzo, sono già presenti in laboratorio. Nel caso del morsetto di collegamento alla gamba, invece,

dal sito è disponibile il prezzo solo previa richiesta al produttore.

Nome	Materiale	N°
Carter	Plastica	1
Copri carter	Plastica	1
Albero flangiato	C45	1
Manovella	Plastica	2
Biella	Plastica	2
Morsetto tubi flessibili	Plastica	1

Tabella 3.14: Caratteristiche componenti customizzati per meccanismo

Si specifica che, in entrambe le tabelle, le quantità di componenti indicate sono necessarie solamente per realizzare un'unità di distribuzione. In totale queste ultime sono tre, al fine di poter trattare tre filari contemporaneamente in una sola passata. Per quanto riguarda i tubi flessibili, essi presentano una taglia stimata dal CAD di 1,25 pollici come diametro esterno. Proprio a causa dell'insicurezza su questo dato, ci si limita a fornirne una rappresentazione di massima, visibile in figura 3.24.

Capitolo 4

Primi test e preparazione alle prove sperimentali

La parte conclusiva di questo lavoro di tesi è dedicata alla messa in opera del robot ed ai primi test di movimento della macchina. Per arrivare a svolgere questa attività è, però, necessario predisporre la struttura per essere alimentata e controllata, seguendo le indicazioni e gli schemi di base presenti nella sezione di alimentazione e controllo, descritta in precedenza. A causa della mancanza del materiale necessario per la costruzione dell'alloggiamento per le parti elettriche ed elettroniche, i cablaggi verranno realizzati in maniera provvisoria ed essenzialmente funzionale all'esecuzione dei primi movimenti e percorsi di test.

4.1 Setup della macchina

Il robot deve essere necessariamente predisposto per poter alloggiare la componentistica utile a fornire il movimento ed il controllo logico. A tal proposito, sono stati creati alcuni supporti per permettere la connessione dei componenti elettronici al

telaio della macchina.

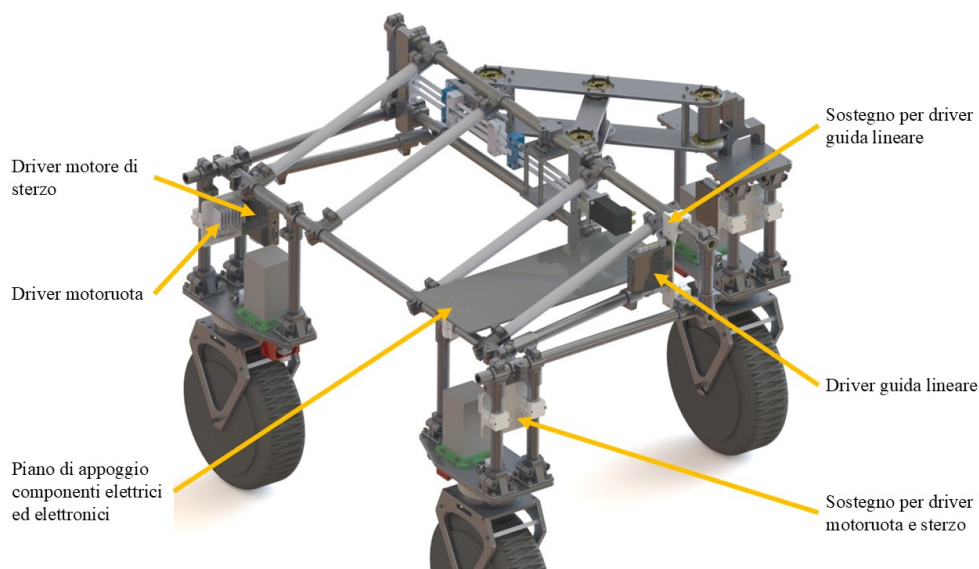


Figura 4.1: Supporti per i componenti elettrici ed elettronici

Come si può notare dall'immagine 4.1, sono stati creati tre supporti per il sostegno dei driver delle motoruote e dei motori di sterzo. Inoltre, è stato inserito un piano, connesso tramite due morsetti al telaio, sul quale poter montare i componenti di alimentazione e controllo. Nel caso dei morsetti e dei supporti, la tecnica utilizzata per la loro creazione è quella della stampa 3D con materiale plastico; il piano è invece realizzato con una piastra in legno. La stampa 3D ha permesso di rendere molto rapida la fase di creazione dei componenti, accelerando l'intero processo di prototipazione.

4.2 Cablaggi e componentistica elettronica

Di seguito viene riportata una breve descrizione della componentistica utilizzata, seguendo una logica a blocchi funzionali e riportando le immagini dei componenti

costituenti l'impianto elettrico, seguendo lo schema di figura 2.19.

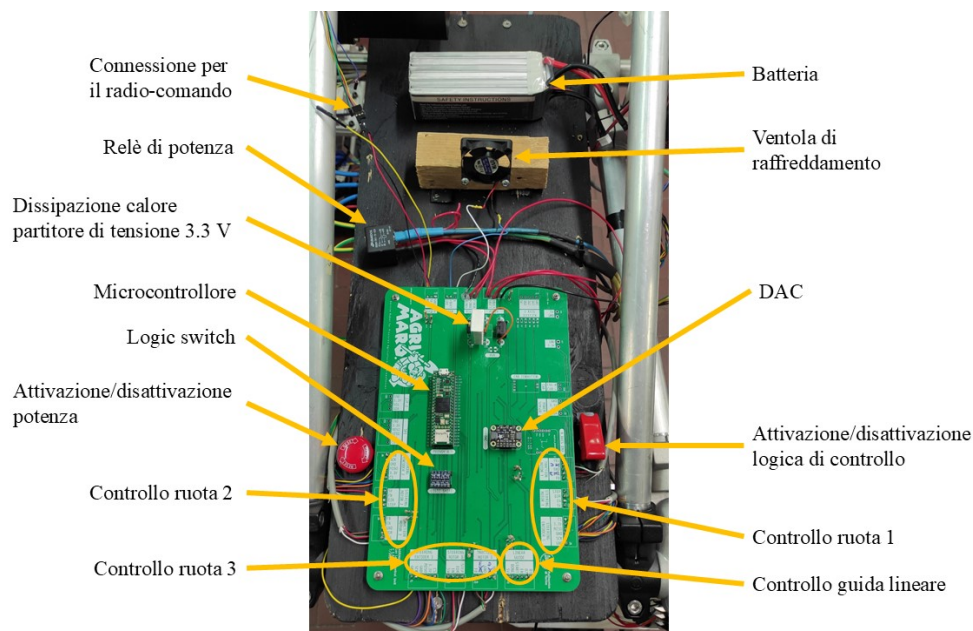


Figura 4.2: Piattaforma di alimentazione e controllo

Osservando la figura 4.2 è possibile capire quali parti sono state assemblate per poter fornire il movimento all'intero robot. Come è indicato nel flow-chart, l'origine di tutto il sistema è la batteria. In questa versione di test ne è stata utilizzata una già presente in laboratorio di tipo Lipo, con 4000 mAh di capacità. La tecnologia di questa batteria permette di alimentare i sistemi con un valore di corrente molto elevato, pur mantenendo dimensioni contenute. Nello specifico, il modello utilizzato per i test su AgriMaRo è il 4000mAh 60C di HRB [40]. A valle della batteria, la potenza elettrica si suddivide in due rami: la logica di controllo e la potenza. Nel caso della logica di controllo, è previsto un interruttore bistabile che permette di attivarla o disattivarla. In maniera indipendente, è collegato il ramo di potenza, attraverso un fungo di emergenza ed un relè. Se il fungo di emergenza non è premuto, i contatti del relè sono chiusi e permettono di far passare la corrente

dalla batteria ai driver dei motori, alimentandoli. La scelta di mantenere questi due rami separati è giustificata da motivi di sicurezza, in quanto si tratta di due circuiti con potenze di ordini di grandezza diversi e, pertanto, sottoposti a rischi differenti. Il ramo di logica viene connesso al PCB, anch'esso presente sullo stesso piano di appoggio della batteria. In questo modo, il microcontrollore può fornire i comandi ai driver per il movimento dei motori. Inoltre è presente una ventola di raffreddamento per migliorare il flusso d'aria che permette di dissipare il calore proveniente dal partitore di tensione necessario per il raggiungimento dei 3.3 V. A valle del relè di potenza, invece, è interposta una morsettiera, che agevola la distribuzione della potenza elettrica ai sottosistemi presenti. Infatti, è necessario fornire alimentazione in quattro principali posizioni diverse: le tre strutture portanti delle motoruote e dei sistemi di sterzo ed il driver della guida lineare. La particolarità risiede in uno dei tratti da connettere, cioè quello del gruppo moto-sterzante mobile. Infatti, in tal caso, i cavi di collegamento tra questo sistema e l'alimentazione si spostano insieme al meccanismo di variazione della carreggiata. Per ovviare a questo inconveniente, è stata sfruttata la geometria del meccanismo a croce. Seguendo lo schema di figura 2.4 si può notare che, considerando le cerniere A_0 , A , C ed il triangolo che ne consegue collegandole, è possibile utilizzare i segmenti $\overline{A_0A}$ e \overline{AC} . In questo modo, la lunghezza dei cavi rimane fissa per tutta la corsa del meccanismo, senza la necessità di creare connessioni estensibili. Se, infatti, il collegamento avvenisse in maniera diretta tra le cerniere A_0 e C , risulterebbe indispensabile questa caratteristica. I cavi di alimentazione realizzano il collegamento tra la morsettiera ed i driver, mentre gli output di questi ultimi vengono cablati con gli input dei motori. I feedback dei motori di sterzo, provenienti dagli encoder assoluti, vengono mandati direttamente al PCB. Invece, per quanto riguarda i finecorsa della guida lineare, il loro segnale viene mandato al driver della guida stessa, il quale poi comunica con il microcontrollore presente sul PCB.

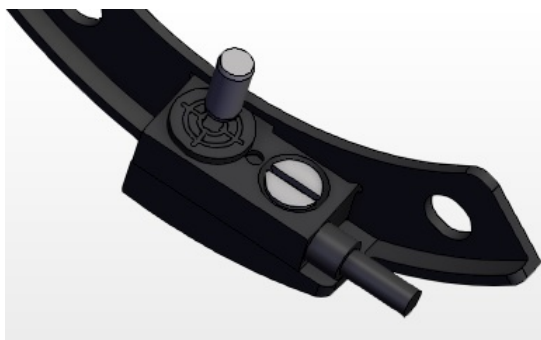
Di seguito si riportano alcuni dettagli dei componenti selezionati per l'elettronica di controllo e di potenza e i codici dei componenti commerciali riassunti in una tabella.



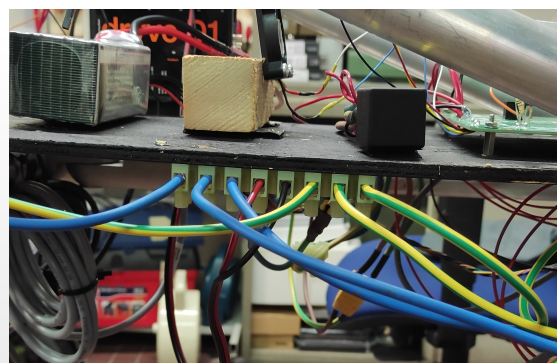
(a) Driver motoruota Uumotor [24]



(b) Driver sterzo e guida IGUS [21]



(c) Finecorsa guida lineare IGUS [21]



(d) Morsettiera di derivazione per la potenza

Nome	Codice commerciale
Driver motoruota	Uumotor MX650
Driver sterzo e guida	IGUS Drylin D1
Finecorsa guida	IGUS RL-D-50-IK-001

Tabella 4.1: Codici commerciali componenti elettronici

4.3 Test iniziali

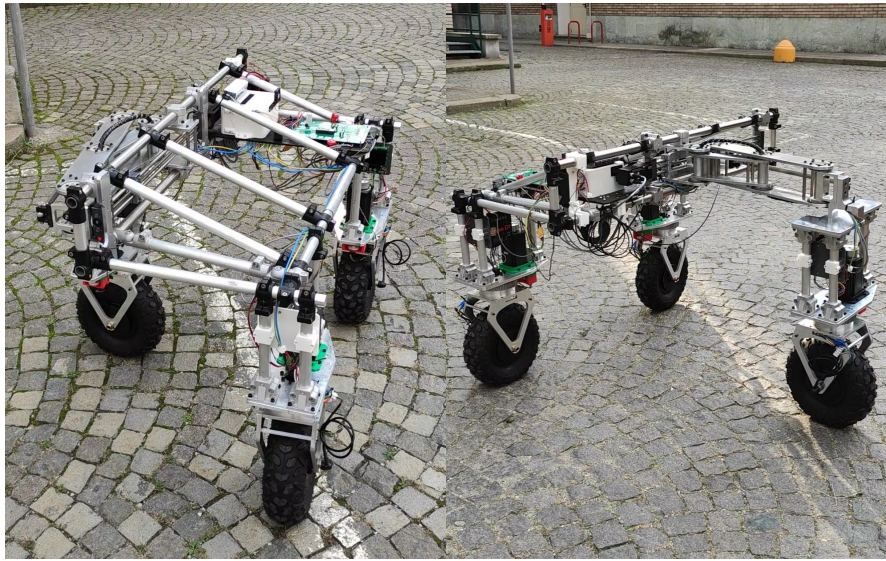
Dopo aver preparato la piattaforma, allestendola con tutti i componenti descritti in precedenza, sono stati svolti alcuni test iniziali, al fine di osservare i primi movimenti del robot e capire gli aspetti positivi e negativi del progetto. Innanzitutto, è opportuno riportare alcune immagini rappresentative della macchina costruita, prima e dopo i cablaggi dell'elettronica di bordo, visibili nella figura seguente.



(e) Pre cablaggi elettronici

(f) Post cablaggi elettronici

In una prima parte sono stati provati i sottosistemi singolarmente, quali le motoruote, i motori di sterzo e la guida lineare collegata al meccanismo di variazione della carreggiata. Successivamente, il robot è stato fatto muovere sia in ambienti interni, che esterni, in entrambi le configurazioni previste per questa prima versione prototipale, cioè con meccanismo compatto ed esteso completamente. Di seguito si riportano alcune immagini rappresentative dei test svolti.



(g) Posizione compatta

(h) Posizione estesa

A conclusione di questa sezione, si riporta la massa totale effettiva del prototipo, corrispondente a 97 kg. La stima della massa del modello, calcolata grazie al software di disegno Solidworks [32], risulta abbastanza fedele alla realtà.

Capitolo 5

Conclusioni e lavori futuri

La fase di prototipazione del robot è stata conclusa con successo, riuscendo a movimentare la piattaforma e tutti i sottosistemi presenti. La costruzione è iniziata dalla parte meccanica, per poi proseguire con il cablaggio per la messa in opera del prototipo. A causa della mancanza di alcuni componenti elettronici e del loro alloggiamento, non è stato possibile rendere definitiva questa versione. Infatti, dopo l'arrivo delle parti mancanti, occorrerà procedere ad un nuovo assemblaggio dell'impianto elettrico, migliorando i percorsi dei cavi e rendendo il tutto più protetto dall'ambiente esterno. Si sottolinea, infatti, che l'attuale versione dei cablaggi è provvisoria e non conforme al design finale progettato per AgriMaRo.

I risultati dell'analisi delle possibilità di impiego del veicolo in ambito agricolo all'interno delle serre hanno portato all'esclusione di lavorazioni pesanti del terreno. La struttura del robot, infatti, si adatta solamente allo svolgimento di attività di monitoraggio, diserbo, fertilizzazione e, a seconda della profondità di lavoro, alla lavorazione superficiale del terreno o la semina. Il limite prevalente, in questo caso, risulta essere il peso della struttura, insufficiente a permettere l'aderenza in condizioni gravose.

Conseguentemente a tali osservazioni, sono state sviluppate due soluzioni applicative, riguardanti il diserbo meccanico e la fertilizzazione localizzata di colture all'interno delle serre. La progettazione si è conclusa con la creazione delle strutture di sostegno e di movimentazione di queste due soluzioni. Nello specifico, è stato progettato un meccanismo di centraggio dell'attrezzatura connesso ad una piattaforma adattabile anche ad altri tipi di attrezzature. Un'altra tipologia di meccanismo è stata creata per la seconda applicazione citata in precedenza, cioè per la distribuzione del fertilizzante. La criticità maggiore, in entrambi i casi, è stata la reperibilità delle quote dei componenti commerciali adottati nel complessivo di montaggio dell'attrezzatura e l'adattamento alla struttura particolare del robot, considerando gli spazi ristretti e la presenza di diversi sottosistemi in movimento. Riguardo al progetto e creazione di queste applicazioni, possibili lavori futuri comprendono sicuramente l'ottimizzazione dei componenti meccanici che compongono i meccanismi e le strutture di sostegno con strumenti specifici, come l'analisi FEM. Un altro aspetto da tenere in considerazione è il costo dei componenti utilizzati. A tal proposito, sarà opportuno cercare eventuali soluzioni alternative per migliorare il rapporto qualità- prezzo e colloquiare con i fornitori per eventuali preventivi della merce. Per ciò che concerne l'impianto elettrico, come già accennato, andrà migliorato e ricablato una volta arrivati i componenti adeguati. Conseguentemente, andrà svolta una campagna di prove sperimentali per la rilevazione dei consumi durante il lavoro del robot, al fine di stimare la durata effettiva della batteria dimensionata preliminarmente. Inoltre, andranno ottimizzati i parametri dei controlli dei motori di sterzo e della guida lineare, al fine di migliorarne la cinematica e, altresì, permettere una guida più agevole del prototipo.

La principale criticità della struttura di questo prototipo, evidenziata durante i primi test, è costituita dalla scarsa rigidità della connessione tra la gamba mobile

ed il telaio nella condizione di carreggiata minima. Infatti, questa situazione rappresenta la peggiore in cui si può trovare il robot, a causa della concentrazione di peso in una zona limitata del robot. Durante le prime prove, infatti, l'attrito della ruota mobile con il terreno ha causato l'inflessione dei link del meccanismo e la conseguente inclinazione del sistema moto-sterzante rispetto all'asse di sterzo. Questo aspetto rappresenta il principale limite attuale della struttura. Nella condizione di carreggiata massima, invece, la migliore distribuzione dei pesi e l'accentramento del baricentro del veicolo rende la piattaforma più rigida e stabile. In questo caso, infatti, il gruppo moto-sterzante mobile non presenta una particolare inclinazione lungo l'asse di sterzo, come invece evidenziato in precedenza.

Bibliografia

- [1] Carlo Molinengo. «Progettazione di un nuovo robot per l'agricoltura di precisione in serre». Tesi di laurea mag. Torino: Politecnico di Torino, 2023 (cit. alle pp. 1, 87, 98).
- [2] Francesco Amodio. «Design of the locomotion system for a new robot for precision agriculture in greenhouses». Tesi di laurea mag. Torino: Politecnico di Torino, 2024 (cit. a p. 1).
- [3] Chao Cheng, Jun Fu, Hang Su e Luquan Ren. «Recent Advancements in Agriculture Robots: Benefits and Challenges». In: *Machines* 11.1 (2023). ISSN: 2075-1702. DOI: 10.3390/machines11010048. URL: <https://www.mdpi.com/2075-1702/11/1/48> (cit. a p. 1).
- [4] E. M. B. M. Karunathilake, Anh Tuan Le, Seong Heo, Yong Suk Chung e Sheikh Mansoor. «The Path to Smart Farming: Innovations and Opportunities in Precision Agriculture». In: *Agriculture* 13.8 (2023). ISSN: 2077-0472. DOI: 10.3390/agriculture13081593. URL: <https://www.mdpi.com/2077-0472/13/8/1593> (cit. a p. 2).
- [5] Baohua Zhang, Yuanxin Xie, Jun Zhou, Kai Wang e Zhen Zhang. «State-of-the-art robotic grippers, grasping and control strategies, as well as their applications in agricultural robots: A review». In: *Computers and Electronics in Agriculture* 177 (2020), p. 105694. ISSN: 0168-1699. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105694>

- org/10.1016/j.compag.2020.105694. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169920311030> (cit. alle pp. 3, 5).
- [6] Giorgia Bagagiolo, Giovanni Matranga, Eugenio Cavallo e Niccolò Pampuro. «Greenhouse Robots: Ultimate Solutions to Improve Automation in Protected Cropping Systems—A Review». In: *Sustainability* 14.11 (2022). ISSN: 2071-1050. DOI: 10.3390/su14116436. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/11/6436> (cit. a p. 5).
- [7] Dongbo Xie, Liang Chen, Lichao Liu, Liqing Chen e Hai Wang. «Actuators and sensors for application in agricultural robots: A review». In: *Machines* 10.10 (2022), p. 913 (cit. alle pp. 5–7).
- [8] LUIZ FP Oliveira, MANUEL F Silva e ANTÓNIO P Moreira. «Agricultural robotics: A state of the art survey». In: *23rd international conference series on climbing and walking robots and the support technologies for mobile MachinesAt: Moscow, Russian federation*. 2020, pp. 279–286 (cit. a p. 6).
- [9] Longzhe Quan, Wei Jiang, Hailong Li, Hengda Li, Qi Wang e Liqing Chen. «Intelligent intra-row robotic weeding system combining deep learning technology with a targeted weeding mode». In: *Biosystems Engineering* 216 (2022), pp. 13–31. ISSN: 1537-5110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.01.019>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511022000265> (cit. a p. 6).
- [10] Yong Li, Zhiqiang Guo, Feng Shuang, Man Zhang e Xiuhua Li. «Key technologies of machine vision for weeding robots: A review and benchmark». In: *Computers and Electronics in Agriculture* 196 (2022), p. 106880. ISSN: 0168-1699. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106880>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169922001971> (cit. a p. 7).

- [11] Carbon robotics. *Autonomous LaserWeeder Demo Unit*. [Online; in data 29-settembre-2024]. 2024. URL: <https://carbonrobotics.com/autonomous-weeder> (cit. a p. 7).
- [12] Juan Bravo Trinidad e José Luis Bravo Trinidad. *Machine for automatically harvesting fruit cultivated in rows*. US Patent App. 13/124,577. Ott. 2011 (cit. a p. 7).
- [13] Naoshi Kondo, Koki Yata, Michihisa Iida, Tomoo Shiigi, Mitsuji Monta, Mitsutaka Kurita e Hiromi Omori. «Development of an End-Effector for a Tomato Cluster Harvesting Robot». In: *Engineering in Agriculture, Environment and Food* 3.1 (2010), pp. 20–24. ISSN: 1881-8366. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1881-8366\(10\)80007-2](https://doi.org/10.1016/S1881-8366(10)80007-2). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1881836610800072> (cit. a p. 8).
- [14] Earthsense. *Terrasentia*. [Online; in data 29-settembre-2024]. 2024. URL: <https://www.earthsense.co/terrasentia> (cit. alle pp. 8, 9).
- [15] Spyros Fountas, Nikos Mylonas, Ioannis Malounas, Efthymios Rodias, Christoph Hellmann Santos e Erik Pekkeriet. «Agricultural robotics for field operations». In: *Sensors* 20.9 (2020), p. 2672 (cit. alle pp. 8, 9).
- [16] Sergio Cubero, Ester Marco-Noales, Nuria Aleixos, Silvia Barbé e Jose Blasco. «RobHortic: A Field Robot to Detect Pests and Diseases in Horticultural Crops by Proximal Sensing». In: *Agriculture* 10.7 (2020). ISSN: 2077-0472. DOI: [10.3390/agriculture10070276](https://doi.org/10.3390/agriculture10070276). URL: <https://www.mdpi.com/2077-0472/10/7/276> (cit. a p. 9).
- [17] Abdelkrim Abanay, Lhoussaine Masmoudi, Mohamed El Ansari, Javier Gonzalez-Jimenez e Francisco-Angel Moreno. «LIDAR-based autonomous navigation method for an agricultural mobile robot in strawberry greenhouse:

- AgriEco Robot». In: *AIMS Electron. Electr. Eng* 6.3 (2022), pp. 317–328 (cit. a p. 10).
- [18] Luciano Cantelli, Filippo Bonaccorso, Domenico Longo, Carmelo Donato Melita, Giampaolo Schillaci e Giovanni Muscato. «A small versatile electrical robot for autonomous spraying in agriculture». In: *AgriEngineering* 1.3 (2019), pp. 391–402 (cit. alle pp. 10, 11).
- [19] Víctor Petuya, Erik Macho, Oscar Altuzarra, Charles Pinto e Alfonso Hernandez. «Educational software tools for the kinematic analysis of mechanisms». In: *Computer Applications in Engineering Education* 22.1 (2014), pp. 72–86. DOI: <https://doi.org/10.1002/cae.20532>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/cae.20532>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cae.20532> (cit. alle pp. 17, 66, 106, 107).
- [20] Giuseppe Quaglia, Giovanni Colucci, Andrea Botta e Luigi Tagaliavini. «Development of a Novel Reconfigurable Omnidirectional Robot for Precision Agriculture in Greenhouses». In: *Robotics and Mechatronics*. A cura di Lotfi Romdhane, Abdelfattah Mlika, Saïd Zeghloul, Abdelbadia Chaker e Med Amine Laribi. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 77–85. ISBN: 978-3-031-59888-3 (cit. alle pp. 17–19).
- [21] IGUS. *IGUS*. [Online; in data 19-agosto-2024]. 2024. URL: <https://www.igus.it/> (cit. alle pp. 17, 20, 110, 122).
- [22] Moflon. *Moflon*. [Online; in data 21-agosto-2024]. 2024. URL: <https://www.moflon.com/> (cit. a p. 24).
- [23] Misumi. *Misumi*. [Online; in data 21-agosto-2024]. 2024. URL: <https://it.misumi-ec.com/> (cit. alle pp. 25, 70, 72, 74, 75, 81, 83, 111–113).

- [24] Uumotor. *Uumotor*. [Online; in data 21-agosto-2024]. 2024. URL: <https://www.uumotor.com/> (cit. alle pp. 25, 61, 122).
- [25] CO.ME.FI. Metalli. *CO.ME.FI. Metalli*. [Online; in data 21-agosto-2024]. 2024. URL: <https://www.comefimetalli.it/> (cit. a p. 29).
- [26] Elesà. *Elesa*. [Online; in data 21-agosto-2024]. 2024. URL: <https://www.elesa.com/it/> (cit. alle pp. 29, 71, 72, 102, 105, 110, 111).
- [27] Punto Metallo. *Punto Metallo*. [Online; in data 21-agosto-2024]. 2024. URL: <https://puntometallo.it/> (cit. alle pp. 29, 70).
- [28] KiCad. *KiCad EDA*. [Online; in data 22-agosto-2024]. 2024. URL: <https://www.kicad.org/> (cit. a p. 41).
- [29] Luigi Tagliavini, Andrea Botta, Giovanni Colucci, Lorenzo Baglieri, Simone Duretto e Giuseppe Quaglia. «Kinematic modelling of swerve-drive-based mobile robots». In: *Proceedings of Jc-IFTToMM International Symposium Vol. 7 (2024)*. Japanese Council of IFTToMM. 2024, pp. 225–231 (cit. a p. 46).
- [30] Frsky. *Taranis X-Lite Pro*. [Online; in data 03-ottobre-2024]. 2024. URL: <https://www.frsky-rc.com/> (cit. a p. 48).
- [31] Fabrizio Mazzetto Massimo Lazzari. *Prontuario di meccanica agraria e meccanizzazione agricola*. REDA, 2009 (cit. alle pp. 52, 54–59, 61–63).
- [32] Dassault Systèmes. *Solidworks*. [Online; in data 21-agosto-2024]. 2024. URL: <https://www.solidworks.com/it> (cit. alle pp. 58, 87, 124).
- [33] Evyatar Asaf, Itai Shulner, Hila Bakshian, Omer Kapiluto, Hanan Eizenberg e Ran Nisim Lati. «The finger weeder cultivator for intra-row mechanical weed control: Effects of uprooting force on selected weed species». In: *Weed Research* (2024) (cit. a p. 86).

- [34] Evyatar Asaf, Gal Rozenberg, Itai Shulner, Hanan Eizenberg e Ran Nisim Lati. «Evaluation of finger weeder safety and efficacy for intra-row weed removal in irrigated field crops». In: *Weed Research* 63.2 (2023), pp. 102–114 (cit. a p. 86).
- [35] Tilmor. *Finger Weeders*. [Online; in data 03-settembre-2024]. 2024. URL: <https://www.tilmor.com/en-us/products/232/finger-weeder> (cit. alle pp. 86–89).
- [36] Arthur Bernardes Cecílio Filho, Camila Seno Nascimento, Breno de Jesus Pereira e Carolina Seno Nascimento. «Nitrogen fertilisation impacts greenhouse gas emissions, carbon footprint, and agronomic responses of beet intercropped with arugula». In: *Journal of Environmental Management* 307 (2022), p. 114568. ISSN: 0301-4797. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114568>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479722001414> (cit. alle pp. 95, 98).
- [37] Wikipedia. *Concimazione* — *Wikipedia, L'enciclopedia libera*. [Online; in data 12-settembre-2024]. 2024. URL: <http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Concimazione&oldid=138316305> (cit. alle pp. 95–97).
- [38] APV. *MDG 40 M1*. [Online; in data 12-settembre-2024]. 2024. URL: <https://en.apv.at/> (cit. alle pp. 98, 100, 103).
- [39] Robotis. *DYNAMIXEL XH540-W150-T*. [Online; in data 18-settembre-2024]. 2024. URL: <https://en.robotis.com/> (cit. alle pp. 108, 112).
- [40] HRB. *4000mAh 60C*. [Online; in data 03-ottobre-2024]. 2024. URL: <https://hrb-power.com/> (cit. a p. 120).

Ringraziamenti

Innanzitutto vorrei ringraziare il mio relatore Giuseppe Quaglia per la disponibilità durante tutto il percorso di tesi. Un sentito grazie va ai membri del gruppo di ricerca del professore: Andrea Botta, Luigi Tagliavini e Giovanni Colucci, che in tutti i modi hanno sempre cercato di aiutarmi nel proseguimento del lavoro, sia teorico che pratico. In particolare Giovanni per il prestito del PC, senza il quale avrei avuto molte difficoltà a portare avanti il lavoro di tesi. Infine Lorenzo e Simone per la compagnia e la collaborazione quotidiana.

Ringrazio particolarmente chi mi ha sostenuto durante tutto il percorso universitario, sia economicamente che nelle scelte importanti per la carriera: i miei genitori e la mia famiglia.

Sono grato a tutti i miei amici e colleghi che ho avuto il piacere di incontrare durante questi 5 anni. Partendo da quelli di Mondovì e provincia, il "Gruppo studio meccanici", "PWT" e gli amici conosciuti al Poli. Le esperienze vissute dentro e fuori dall'aula sono state ricche e fondamentali per vivere veramente questi anni. Grazie agli amici di sempre e alla mia squadra di calcio, mi avete permesso di prendermi i giusti momenti di svago e distrazione dallo stress della settimana.

Infine, un enorme grazie va a Michela, la persona che mi ha accompagnato passo dopo passo dal primo giorno di magistrale, nonostante le difficoltà che la vita universitaria mi ha presentato e che abbiamo affrontato e superato insieme. Grazie anche per la pazienza nel leggere e correggere questo documento, passandoci anche

l'intera giornata.