



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Collegio di Ingegneria Meccanica, Aerospaziale, dell'Autoveicolo e della Produzione

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Anno accademico 2021/2022

Studio di un rover elettrico a guida autonoma per applicazioni off-road

Relatore:

Prof. Aurelio Somà

Correlatori:

Ing. Francesco Mocera

Salvatore Martelli

Candidata:

Anna Acampora

Ottobre 2022

Indice

1	Introduzione	10
2	Stato dell'arte	12
2.1	Meccanizzazione agricola	12
2.2	Robot agricoli.....	13
2.3	Le sfide dei robot agricoli	14
2.3.1	La navigazione dei robot agricoli.....	15
2.3.2	L'Agricoltura di Precisione.....	17
2.3.3	L'elettificazione dei robot agricoli	18
2.4	Esempi.....	20
2.4.1	Bakus.....	20
2.4.2	Trektor.....	21
2.4.3	Ted	21
2.4.4	Icaro x4	22
2.4.5	VineScout.....	23
2.4.6	YV01	23
2.4.7	Thorvald.....	24
2.4.8	Dood.....	25
3	Obiettivi di progetto.....	27
3.1	4WD vs 2WD.....	29
3.1.1	Forza di trazione.....	29
3.1.2	Slittamento	30
3.1.3	Forza di trazione e grandezze associate	31
3.1.4	4WD.....	33
3.1.5	2WD.....	33
3.2	4WS vs 2WS.....	35
3.3	Ruote vs cingoli	36
3.3.1	Funzionamento dei cingoli.....	36
3.4	Ibrido vs elettrico	37
3.5	Architettura	38
3.6	Navigazione	38
3.7	Le scelte	39
4	Design del drone	40
4.1	Stima della potenza necessaria al moto.....	40

4.2	Progettazione della trazione	44
4.3	Scelta delle batterie	45
4.4	Sistema di sterzo	47
4.4.1	Le tipologie di sistemi di sterzo	47
4.4.2	Calcolo della coppia necessaria a sterzare	57
4.4.3	Dimensionamento motore di sterzo	60
4.4.4	Calcolo del raggio di curvatura	61
4.5	Sensori.....	69
4.6	Pneumatici.....	70
4.7	Modello completo	71
5	Modellazione multibody	76
5.1	Il concetto di multibody	76
5.2	Il modello multibody.....	76
5.2.1	Telaio	77
5.2.2	Pacco batterie	78
5.2.3	Ruote	79
5.2.4	Massa restante	80
5.2.5	Modello complessivo	80
5.3	Modellazione del sistema di sterzo	82
5.4	Inseguimento di una traiettoria	84
5.4.1	Influenza della velocità	90
5.4.2	Influenza della tipologia del sistema di sterzo	91
5.5	Controllo coppia.....	91
5.6	Pendenza longitudinale massima	94
5.7	Moto tra filari	95
6	Design review e sviluppi futuri.....	98
6.1	Versione futura.....	99
7	Bibliografia e sitografia	103

Indice delle figure

Figura 1: Trattrice agricola Froelich ⁵	12
Figura 2: Sistema di navigazione GPS RTK	15
Figura 3: Sensore LiDAR	16
Figura 4: Ciclo di coltivazione realizzato con agricoltura di precisione ¹⁶	18
Figura 5: Bakus by VitiBot ²¹	20
Figura 6: Trektor by Sita ²²	21
Figura 7: Ted by Naio Technologies ²³	22
Figura 8: Icaro x4 by Free Green Nature ²⁴	22
Figura 9: VineScout ²⁵	23
Figura 10: YV01 by Yanmar ²⁶	24
Figura 11: Moduli del Thorvald II ²⁷	24
Figura 12: Esempi di robot assemblati con moduli Thorvald	25
Figura 13: Dood by Earth Automation ²⁸	25
Figura 14: Diagramma di corpo libero di una ruota in trazione	29
Figura 15: Ruota cedevole su suolo rigido ³²	30
Figura 16: Andamento della forza di trazione in funzione dello scorrimento ³²	31
Figura 17: Influenza del coefficiente di attrito sulla forza di trazione ³²	32
Figura 18: Influenza del carico verticale F_z [N] sulla forza di trazione ³²	32
Figura 19: Trazione integrale From Wikipedia	33
Figura 20: Trazione anteriore	34
Figura 21: Trazione posteriore con motore posteriore (raro)	34
Figura 22: Trazione posteriore con motore anteriore	34
Figura 23: Cingolo	36
Figura 24: Road map seguita per la progettazione del drone	40
Figura 25: Diagramma di corpo libero di un veicolo in moto a velocità costante su un terreno in pendenza	41
Figura 26: Diagramma di corpo libero di una ruota trascinata a velocità costante	42
Figura 27: Configurazione della trazione e dei motori per la propulsione	44
Figura 28: Collegamento motore ruota	44
Figura 29: Schema del principio della sterzata di Ackermann ³⁷	47
Figura 30: Ruota con motore integrato e modulo di sterzo a sbalzo ³⁹	49
Figura 31: Tipologie di sistemi di sterzo: a) Slip, b) Articolato, c) Ackermann, d) 4WS ³⁸	49
Figura 32: Modello CAD del sistema di sterzo anteriore	50
Figura 33: Modello CAD del sistema di sterzo posteriore	50
Figura 34: Sistema di attuazione per lo sterzo	51
Figura 35: Modellizzazione del collegamento delle aste oblique con software GIM – Soluzione 2	51
Figura 36: Calcolo dei gradi di libertà del sistema effettuato dal software GIM	52
Figura 37: Sterzata a sinistra del sistema di sterzo anteriore	53
Figura 38: Sterzata a destra del sistema di sterzo anteriore	53
Figura 39: Sterzata a destra del sistema di sterzo posteriore	54
Figura 40: Sterzata a sinistra del sistema di sterzo posteriore	54
Figura 41: Manovra di sterzo a sinistra del rover	55
Figura 42: Manovra di sterzo a destra del rover	56
Figura 43: Coppie agenti su una ruota sterzante	57
Figura 44: Dimensione r	58
Figura 45: Forma ottimizzata del telaio	59

Figura 46: Forza laterale esercitata dal sistema di sterzo	60
Figura 47: Raggio di curvatura di un veicolo	61
Figura 48: Modello a bicicletta di un veicolo 4WS ⁴⁰	63
Figura 49: Modello a bicicletta dinamico di un veicolo 4WS	64
Figura 50: Modello Simulink per approccio dinamico	67
Figura 51: Traiettoria del centro di massa con angoli di sterzo dell'approccio grafico	68
Figura 52: Traiettoria del centro di massa	69
Figura 53: Schema collegamento alimentazione sensori	70
Figura 54: Tecnologia pneumatici Trelleborg	71
Figura 55: Alloggio per batterie ed elettronica di controllo – 1	71
Figura 56: Alloggio per batterie ed elettronica di controllo - 2	72
Figura 57: Vista posteriore della copertura del drone	72
Figura 58: Vista frontale della copertura del drone	73
Figura 59: Vista frontale del rover	74
Figura 60: Vista posteriore del rover	74
Figura 61: Vista anteriore destra del rover	75
Figura 62: Vista posteriore sinistra del rover	75
Figura 63: Telaio in ADAMS View	78
Figura 64: Pacco batterie in ADAMS View	79
Figura 65: Ruota su ADAMS View	79
Figura 66: Massa restante in ADAMS View	80
Figura 67: Modello multibody completo – Vista isometrica	81
Figura 68: Modello multibody completo - Vista laterale	81
Figura 69: Drone su suolo inclinato di 5°	82
Figura 70: proprietà contatto ruota-terreno	82
Figura 71: Vista superiore del sistema di sterzo anteriore in ADAMS View	83
Figura 72: Collegamento tra ruota e sistema di sterzo in ADAMS View	83
Figura 73: Collegamenti del sistema di sterzo in ADAMS View	84
Figura 74: Esempio di matrice contenente 28 punti appartenenti ad una generica traiettoria	85
Figura 75: Traiettoria riferita alla matrice	86
Figura 76: Marker per la posizione attuale del veicolo	86
Figura 77: Dummy body	87
Figura 78: Posizione del dummy body	87
Figura 79: Passaggio grafico da una lunghezza ad un angolo	88
Figura 80: Traiettoria seguita dal trattore al variare di K	89
Figura 81: Traiettoria seguita dal trattore al variare di L	89
Figura 82: Traiettoria seguita a velocità minore	90
Figura 83: Traiettoria seguita a velocità maggiore	90
Figura 84: Confronto traiettorie sistema di sterzo 4WS vs 2WS	91
Figura 85: Coppie motrici applicate agli assi delle ruote	92
Figura 86: Controllo coppia proporzionale	92
Figura 87: Controllo coppia proporzionale con suolo in pendenza	93
Figura 88: Rover in moto su un suolo inclinato di 10°	93
Figura 89: Velocità di traslazione desiderata imposta come funzione a gradino	94
Figura 90: Confronto tra la velocità di traslazione attuale e velocità di traslazione desiderata	94
Figura 91: Particolare del confronto	94
Figura 92: Terreno con angolo di inclinazione laterale pari a 6°	95
Figura 93: Geometria dei filari	96

Figura 94: Moto tra i filari	97
Figura 95: Angolo di sterzo anteriore	97
Figura 96: Angolo di sterzo posteriore	97
Figura 97: Versione futura del rover	99
Figura 98: Versione futura del rover	99
Figura 99: Modulo batterie	100
Figura 100: Modulo di sterzo	100
Figura 101: Modulo per la propulsione	101
Figura 102: Modulo di sterzo e modulo di propulsione	102

Indice delle tabelle

Tabella 1: Parametri per generiche operazioni agricole ⁹	14
Tabella 2: Sintesi caratteristiche robot agricoli.....	26
Tabella 3: Matrice decisionale	28
Tabella 4: Valori del coefficiente di attrito per diverse superfici ³¹	30
Tabella 5: Scelte progettuali	39
Tabella 6: Potenza richiesta dai sensori	70
Tabella 7: Caratteristiche del rover.....	73
Tabella 8: Dati dimensionali del drone	76
Tabella 9: Masse del drone	76
Tabella 10: Proprietà inerziali del telaio	78
Tabella 11: Proprietà inerziali del pacco batterie.....	79
Tabella 12: Proprietà inerziali della ruota.....	80
Tabella 13: Proprietà inerziali massa restante.....	80
Tabella 14: Sintesi degli obiettivi raggiunti.....	98

1 Introduzione

Nel nostro Paese l'agricoltura svolge da sempre un ruolo di fondamentale importanza per la crescita economica: le aziende agricole, infatti, rappresentano un punto di forza per lo sviluppo, prime tra tutte le aziende produttrici di vino.

Uno dei principali responsabili di questa continua crescita è sicuramente il netto aumento della richiesta di alimenti da parte del crescente numero della popolazione mondiale: per riuscire a soddisfare i bisogni alimentari di tutti, infatti, è stato, da sempre, necessario rendere il settore agricolo il più tecnologico e moderno possibile.

La più grande innovazione in tale campo risale, ormai, a qualche secolo fa (fine '800) e riguarda la meccanizzazione del settore agricolo, la quale è stata sicuramente facilitata dall'introduzione del motore a scoppio e dalla buona reperibilità dei combustibili fossili. La più recente, invece, riguarda la quasi completa automazione delle principali attività agricole, grazie all'introduzione di moderne tecnologie di controllo e programmazione.

Tutto ciò ha condotto ad una riduzione della manodopera necessaria e ad una specializzazione delle colture in modo tale da ottimizzarne le rese e facilitarne lo sviluppo.

Al giorno d'oggi le macchine agricole (autonome e non) hanno un ruolo fondamentale in ogni ambito del settore agricolo; tuttavia i combustibili fossili emettono un'ingente quantità di gas serra, motivo per cui il settore agricolo, è responsabile della produzione di sostanze nocive per l'ambiente, almeno tanto quanto lo è il settore dei trasporti.¹

Da qui nasce l'esigenza di elettrificare o ibridizzare i trattori, i veicoli utilitari, le coltivatrici, le seminatrici e tutti i macchinari ed i processi agricoli che utilizzano combustibili fossili. Si è stimato, infatti, che l'elettrificazione di tutti questi sistemi riuscirebbe a ridurre l'impatto ambientale del settore agricolo del 20%.²

La sostituzione dei normali sistemi di propulsione con dei sistemi elettrici o ibridi nell'ambito agricolo, ha avuto inizio con un certo ritardo rispetto all'ambito dei trasporti e dei veicoli terrestri tradizionali, a causa delle masse notevolmente maggiori che richiedono, quindi, maggiore energia. Tuttavia negli ultimi anni grossi passi avanti sono stati fatti nello sviluppo di tecnologie nel campo delle batterie ed il mondo dell'elettrico/ibrido sembra ormai sempre più accessibile, a causa anche del maggior interesse pubblico verso un'agricoltura più sostenibile e delle normative più stringenti riguardo le emissioni di gas nocivi.

Nel panorama ancor più recente, come anticipato prima, ai progressi nel campo dell'elettrificazione, si sono affiancati quelli nel campo dell'automazione: si comincia, infatti, a parlare di trattori a guida autonoma che non richiedono più la presenza di un operatore a bordo. Complice di questo sviluppo è la cosiddetta "agricoltura di precisione" che combina le macchine operatrici con sistemi GPS, sensori per rilevamento da remoto e sul campo e con l'elaborazione avanzata delle informazioni raccolte, al fine di ottimizzare la produzione, tenendo conto della variabilità e delle incertezze all'interno dei sistemi agricoli.

³ Carte nutrizionali per la concimazione, per esempio, possono essere integrate ai vari sistemi di informazione; in questo modo i fertilizzanti potranno essere erogati in modo preciso, solo nei punti, visualizzati tramite mappe, che effettivamente ne richiedono determinate quantità. In questo modo si otterrà una resa uniforme e sicuramente maggiore di quella ottenibile con metodologie tradizionali.

È proprio in questo contesto in cui è sempre più necessaria una meccanizzazione autonoma e sostenibile, che nasce il presente lavoro di tesi; il quale ha come obiettivo la schematizzazione e la progettazione di un rover terrestre a guida autonoma che svolge funzioni di monitoraggio all'interno di vigneti.

Il lavoro nasce in seguito all'attività di tirocinio svolta presso l'azienda Ecothea Srl; una startup che si occupa di elettrificazione ed ibridizzazione di veicoli agricoli semoventi.

Il rover è stato pensato per essere adatto al moto tra filari di viti, esso è infatti compatto e risulta essere in grado di compiere manovre di sterzo caratterizzate da piccoli raggi di curvatura, grazie alle sue quattro ruote sterzanti. Il veicolo è, inoltre, 100% elettrico e completamente autonomo.

L'elaborato segue tre fasi principali:

- Attività di benchmarking: in cui vengono analizzate e confrontate le tecnologie esistenti;
- Progettazione teorica: in cui vengono selezionate le tecnologie più consone al progetto (sensori, pneumatici, trazione, ecc..) ed, in seguito, si stimano le forze e le coppie in gioco utili al conseguente dimensionamento dei motori e delle batterie;
- Progettazione e simulazione tramite utilizzo di software: in cui viene sviluppato il modello CAD del rover tramite software Solidworks, nel rispetto degli ingombri e delle specifiche richieste. Successivamente, viene sviluppato un modello multibody del rover e, in particolar modo, del sistema di sterzo tramite software MSC Adams View. Vengono, quindi, analizzati e testati il suo comportamento dinamico e la sua capacità di seguire traiettorie curve pre impostate o di percorrere tratti in pendenza.

2 Stato dell'arte

Prima di addentarsi nel cuore di questa trattazione, è importante chiarire qual è il contesto da cui nasce l'idea del rover in studio: è fondamentale, infatti, descrivere quali sono i progressi fatti nel settore agricolo in termini di innovazione tecnologica e, di conseguenza, mostrare quali sono le sfide future che questo settore dovrà affrontare per giungere ad un tipo di agricoltura sempre più efficiente e sostenibile.

2.1 Meccanizzazione agricola

Nella storia più antica, l'agricoltura ha sempre rappresentato la principale fonte di sostentamento per tutta la popolazione: grazie all'agricoltura l'uomo ha cambiato la sua condizione da nomade a sedentario ed il conseguente aumento della popolazione all'interno dei primi villaggi, ha reso necessario l'inizio del lungo processo di meccanizzazione agricola.

L'avvento della meccanizzazione agricola coincide con la prima Rivoluzione Industriale (fine '800), momento in cui la trebbiatura e la mietitura cominciavano ad essere svolte con macchine a vapore.

Le macchine agricole a vapore, pesanti, lente e poco maneggevoli, sono state le macchine di transizione che hanno anticipato l'era dei trattori.⁴

Qualche anno dopo, infatti, con l'avvento del motore endotermico a benzina, nascono i primi trattori: risale al 1892 il primo macchinario semovente a benzina, la trattrice agricola Froelich capace di spostarsi sia avanti che indietro.

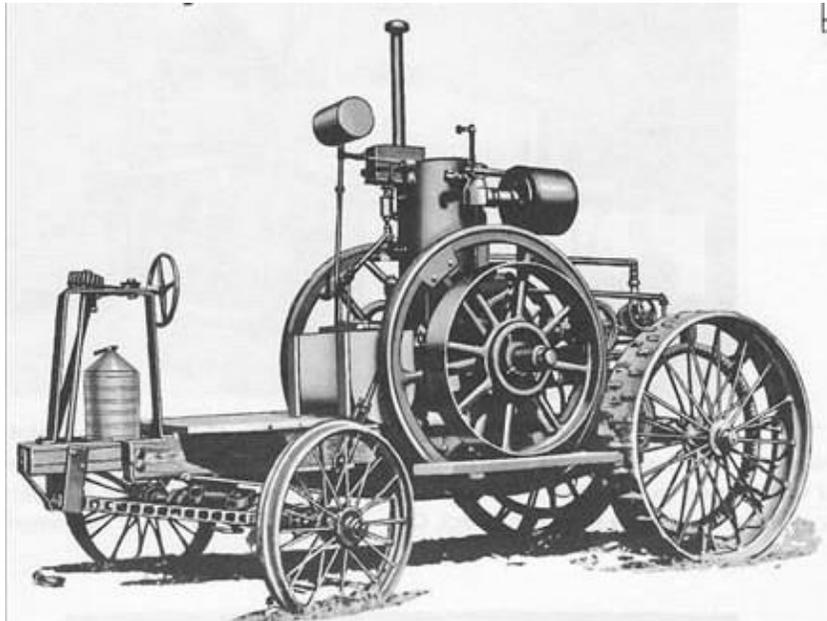


Figura 1: Trattrice agricola Froelich⁵

Da quel momento in poi, numerose sono state le tipologie di trattori realizzate con il compito di fornire potenza a tutta quella serie di attrezzi ed accessori utili per svolgere le più disparate operazioni agricole.

Si può, quindi, affermare che l'intensa meccanizzazione agraria è stata la prima grande innovazione del settore agricolo avvenuta nei tempi moderni: si è riusciti a rendere il lavoro agricolo più efficiente e meno faticoso per l'uomo.

Al giorno d'oggi le macchine agricole sono sicuramente presenti in ogni ambito dell'agricoltura e

possono fedelmente sostituire il lavoro umano in tutti i processi che vanno dalla preparazione del terreno alla raccolta.

2.2 Robot agricoli

In ogni ambito, ciò che da sempre accompagna il progresso è sicuramente la continua ricerca di innovazione: oggi a livello mondiale ed in qualsiasi categoria industriale, si cerca di rendere le macchine e gli accessori realizzati sempre più produttivi grazie alla possibilità di renderli “intelligenti”. Le tecnologie digitali, informatiche, di sensoristica e di algoritmi per la pianificazione ed il controllo sono sempre più accessibili e risulta, ormai, semplice riuscire ad immaginare una macchina agricola che riesca ad adattare i normali processi agricoli ad una serie di parametri che possono essere rilevati in tempo reale direttamente sul campo.

La spinta finale verso lo sviluppo dei robot agricoli, è stata data anche da un'altra importante serie di fattori di tipo sociale. Prima tra tutte, vi è l'incredibile crescita della popolazione mondiale ed il conseguente aumento della richiesta di alimenti: si stima, infatti, che la popolazione mondiale raggiunga i 10 miliardi di persone entro il 2050 (analisi ONU 2022) e per soddisfare i bisogni di tutti, la produzione mondiale di cibo dovrà aumentare più del 40%.⁶

Il secondo problema riguarda il tipo di lavoro che un agricoltore è costretto a svolgere: durante i periodi di raccolta, di semina e di preparazione per l'anno successivo, il lavoratore si trova a dover spendere un gran numero di ore seduto su un trattore, svolgendo un ruolo che potrebbe tranquillamente essere sostituito da un robot. Il proprietario di un'azienda di piccole o medie dimensioni, probabilmente non può sostenere le spese per assumere un operatore che possa operare su un trattore al suo posto ed è quindi costretto a togliere molto tempo ad altre operazioni altrettanto importanti. Se tutto ciò viene unito ad una classica vita familiare in cui ogni membro lavora a tempo pieno, risulta evidente come questo tipo di professione non sia così appetibile, portando inevitabilmente ad una mancanza generale di manodopera, in particolar modo quella giovane.

Sostanzialmente in un tempo relativamente breve si dovrà cominciare a produrre di più, ma bisognerà farlo al meglio, ottimizzando il lavoro, sprecando di meno, preservando l'ambiente e soprattutto cercando di fornire supporto al lavoro umano che per tutti i motivi sopraelencati, ormai, non basta più.

È proprio questo il terreno che favorisce la nascita della robotizzazione agricola: da anni molte aziende sono al lavoro per realizzare robot che non solo agiscono in modo intelligente ma che possano farlo anche autonomamente, andando a sopperire alla mancanza di manodopera e rendendo più semplice e sicuro il lavoro di un agricoltore.

I vantaggi dell'automazione dei macchinari agricoli sono molteplici: essa, infatti, facilita le lavorazioni agricole, aumentandone la precisione e riducendo al minimo gli interventi umani; vengono ridotti i tempi di inattività e, di conseguenza, si ha un netto aumento della produttività complessiva. Una ridotta presenza “attiva” comporta una riduzione della presenza di operatori all'interno del campo ed, in questo modo, i rischi ed i problemi dovuti all'interazione uomo-macchina vengono minimizzati.

Un'attività più precisa porta senza dubbio ad un notevole vantaggio economico ed ambientale: basti pensare, per esempio, al trattamento necessario nel caso in cui sia in atto un'infestazione all'interno del campo. Con un sistema di irrorazione intelligente, grazie ad un'opportuna sensoristica, è possibile riconoscere solo le piante effettivamente infette e trattare in modo opportuno soltanto una piccola parte dell'intera coltura, andando così a risparmiare tempo, carburante, materiale necessario al diserbo e inquinando di meno la coltura stessa, il suolo e le risorse idriche.

Altro esempio che va a sostegno degli innumerevoli benefici sopraelencati riguarda l'utilizzo di macchine equipaggiate di sensori particolari in grado di controllare la quantità di clorofilla in una foglia o il livello

di nutrienti in un frutto. In questo modo le operazioni di fertilizzazione saranno sicuramente più mirate e personalizzate per ogni pianta presente all'interno della coltura, ottenendo, anche in questo caso, una riduzione degli sprechi ed un'ottimizzazione del processo.

Tutti questi esempi vanno in accordo con una delle più comuni definizioni di robot: “un robot è qualcosa che reagisce in modo intelligente ad una situazione ambientale che rileva attraverso un sistema di sensori e questa sua reazione serve a raggiungere un determinato scopo”.⁷

Si può, quindi, parlare di robot agricoli a tutti gli effetti; al giorno d'oggi questi robot vengono ampiamente utilizzati per svolgere le più svariate operazioni: esistono robot per aratura, robot per il diserbo e per la fertilizzazione, robot per la spruzzatura, per innesto ed anche robot per la raccolta.

In questo contesto si è addirittura giunti a parlare di “Agricoltura 4.0”, termine usato per raggruppare le applicazioni dell'automazione e della digitalizzazione nel settore agricolo. Essa, infatti, è definita come l'unione di tecnologie quali intelligenza artificiale, robotica, Internet of Things (IoT), sistemi di visione artificiale e sensoristica, che hanno come unico fine quello di ottenere una gestione proficua e sostenibile delle colture.⁸

Nonostante tutti i progressi ed i numerosi vantaggi sopra elencati, l'integrazione dei robot in agricoltura presenta, al giorno d'oggi, il potenziale rischio di accrescere il divario già presente tra i piccoli e medi produttori. Grazie al loro utilizzo si andrebbero, infatti, a sbilanciare ancor di più competenze, tecnologie, efficienza e produttività a favore delle imprese più grandi, le quali possono permettersi grandi investimenti in innovazioni tecnologiche.

In uno scenario così promettente, quindi, la più grande barriera da superare è quella di rendere più accessibili le nuove tecnologie estendendo, così, i benefici della robotica agricola anche ai piccoli produttori, con conseguente aumento dei guadagni, riduzione degli sprechi e dell'impatto ambientale.

2.3 Le sfide dei robot agricoli

Le sfide che un robot agricolo si trova ad affrontare sono molteplici e certamente dipendono dal tipo di attività che sono destinati a svolgere; tuttavia ad ogni robot sono sicuramente richieste elevata precisione, notevole intelligenza per compiere le operazioni per le quali è stato progettato e sufficiente autonomia.

In letteratura sono presenti numerose tabelle che sintetizzano il livello di precisione e di sensoristica necessari allo svolgimento delle classiche attività agricole. Se ne riporta una con lo scopo di mostrare come il processo di progettazione di un robot agricolo sia tutt'altro che semplice:

Operazione	Tempo impiegato	Potenza richiesta	Precisione richiesta
Aratura	Elevato	Elevata	Bassa
Fertilizzazione	Basso	Elevata	Elevata
Erpicatura	Medio	Elevata	Bassa
Semina	Elevato	Bassa	Media
Compattazione	Medio	Media	Bassa
Irrorazione	Basso	Bassa	Elevata
Raccolta	Elevato	Elevata	Elevata
Diserbo	Elevato	Bassa	Elevata

Tabella 1: Parametri per generiche operazioni agricole ⁹

È evidente che sono molteplici le attività, tutt'altro che semplici, che richiedono molta precisione. Ciascun robot deve, quindi, essere dotato di una sensoristica consona ad ogni tipo di operazione, che gli permetta di muoversi adeguatamente e di operare con estrema accuratezza.

2.3.1 La navigazione dei robot agricoli

La sfida principale che ogni robot agricolo si trova ad affrontare, sta nel fatto che esso si muove in uno spazio aperto di grandi dimensioni, in cui parte dell'ambiente e degli eventuali ostacoli, sono sconosciuti. Ad esso è richiesto di svolgere ogni operazione in modo efficiente e sicuro, senza rovinare le coltivazioni, per cui deve essere abile sia ad evitare ogni tipo di intralcio che a tenersi a determinate distanze dalle colture per svolgere le dovute operazioni. All'interno dei vigneti, per esempio, ogni robot deve saper navigare tra un filare e l'altro, tenendosi ad una distanza ben precisa dalle viti anche in presenza di un eventuale ostacolo. Inoltre, anche se l'aspetto generale di un campo è fissato entro certi confini, la sua configurazione può variare ogni anno durante le varie stagioni, è necessario, quindi, disporre di tecnologie avanzate che rendano il robot capace di adattarsi ad eventuali cambiamenti.

Durante il proprio tragitto i robot riescono a raggiungere precisioni dell'ordine del centimetro, grazie al sistema di posizionamento GPS RTK (Real-Time Kinematic) che è in grado di realizzare correzioni in tempo reale della posizione del robot in azione rilevata tramite GPS. La tecnica di correzione RTK è di tipo differenziale e si ottiene attraverso l'utilizzo di due ricevitori GPS: uno fisso di riferimento (base) ed uno mobile (rover). Entrambi ricevono il segnale dagli stessi satelliti; il rover confronta le informazioni provenienti dalla base fissa con i dati satellitari ricevuti ed in questo modo è in grado di riconoscere la sua posizione rispetto alla base con una precisione centimetrica. Il rover può, infine, risalire alla sua posizione nel sistema di riferimento assoluto, una volta note le coordinate assolute della base.

La correzione avviene in tempo reale, quindi base e rover sono in continuo contatto tramite un canale di comunicazione costantemente aperto attraverso il quale si scambiano informazioni.¹⁰

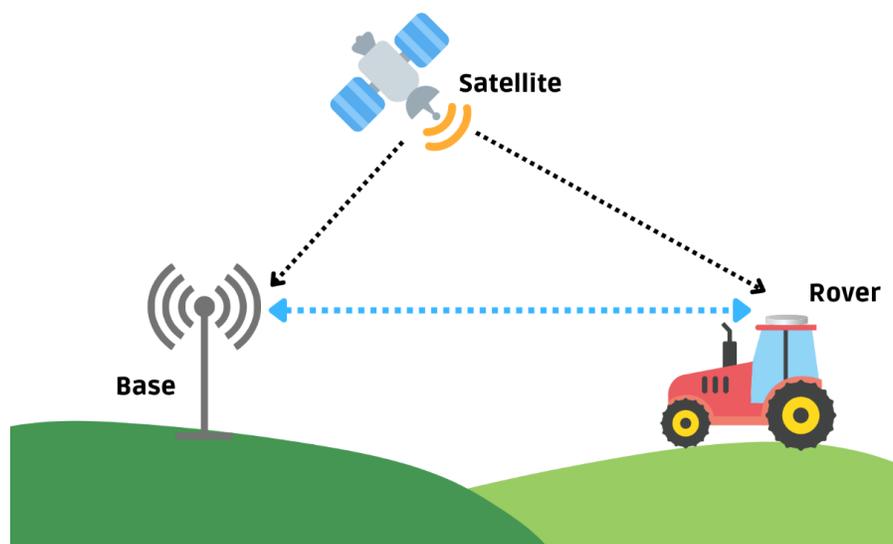


Figura 2: Sistema di navigazione GPS RTK

Un ulteriore supporto alla navigazione è il sensore LiDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) che determina la distanza da un oggetto o da una superficie tramite un impulso laser. L'impulso, che è un fascio coerente di luce con una precisa lunghezza d'onda, viene inviato verso il sistema da osservare e, successivamente, si misura il tempo che intercorre tra l'emissione del segnale laser di partenza e la

ricezione del segnale retrodiffuso. Dalla misura del tempo, attraverso l'equazione della lunghezza d'onda, si giunge facilmente alla misura della distanza dell'oggetto osservato.

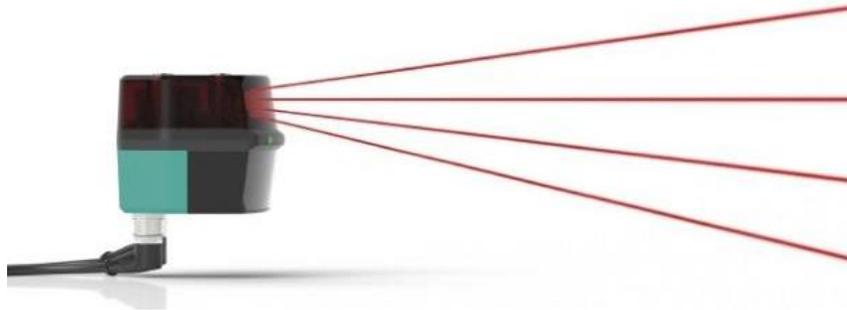


Figura 3: Sensore LiDAR

Ravanakar et al., hanno dimostrato come un reale robot agricolo sia in grado di muoversi correttamente e con estrema precisione all'interno di un vigneto, utilizzando esclusivamente un sensore LiDAR 3D montato sulla parte superiore del robot.¹¹

Nel medesimo studio, anche l'estrazione delle caratteristiche del campo viene svolta attraverso l'utilizzo del LiDAR: viene sfruttato un algoritmo utile a rilevare i pilastri del vigneto che sostengono le viti, i quali sono poi usati come tracce per la navigazione tra i filari. Dopo aver rilevato tutti i pilastri, il robot comincia a navigare in ogni linea composta da una serie di pilastri sul lato destro e su quello sinistro, mantenendosi ad una determinata distanza da entrambi i lati; la mancanza di uno o più pilastri indica il termine di un filare e quindi il robot potrà iniziare la sua manovra di sterzo.

Lo stesso LiDAR è utilizzato per percepire la presenza di ostacoli statici o dinamici: tramite un preciso algoritmo, infatti, il robot è capace di mantenere una distanza sicura sia dall'ostacolo che dai filari.¹¹

Che sia una navigazione svolta con tecnologia RTK, con sensori laser o mista, c'è sempre bisogno di definire una traiettoria che il robot, a meno di ostacoli, deve essere in grado di seguire autonomamente all'interno del suo ambiente di lavoro.

Il problema della pianificazione del percorso, detto anche path planning, interessa gli studiosi già dagli anni '70 e può essere descritto nel seguente modo: dato un robot ed il suo ambiente di lavoro, il robot cerca un percorso continuo ottimale o subottimale dal punto iniziale a quello finale in base a determinati criteri di prestazione.¹² La complessità del problema cresce, ovviamente, con l'aumentare del numero di gradi di libertà del sistema.

Il percorso ottimale viene deciso basandosi sul rispetto di condizioni e vincoli che variano per ogni problema. Per esempio si può scegliere il percorso più breve tra i punti iniziali e finali, oppure quello che richieda il tempo minimo per spostarsi senza alcun tipo di impatti. Altre volte, invece, gli obiettivi da raggiungere ed i vincoli da rispettare possono unirsi in un'unica condizione di spostamento, ad esempio cercando di ridurre al minimo il consumo energetico, senza impiegare, però, più di un determinato tempo per raggiungere il punto finale.¹³

Negli anni il path planning è stato utilizzato prima per la semplice pianificazione degli itinerari territoriali e poi anche per ricercare una sequenza di azioni appropriate, necessarie per raggiungere un determinato obiettivo. Al giorno d'oggi può essere adoperato sia in ambienti noti che in quelli noti solo parzialmente o, addirittura, in ambienti totalmente sconosciuti in cui le informazioni ricevute da appositi sensori montati sul sistema vengono usate per aggiornare volta per volta le mappe ambientali al fine di scegliere in tempo reale i movimenti più adatti per il robot.

Sono numerosissimi gli algoritmi usati per la pianificazione del percorso, i quali dipendono per lo più

dalle conoscenze disponibili dell'ambiente circostante; tuttavia la trattazione di essi prescinde dall'argomento di questo elaborato.

In questo nuovo modo di praticare l'agricoltura, ormai quasi completamente autonomo, non è importante solo il rilevamento delle dimensioni del campo e più nel dettaglio del percorso da seguire ma anche il rilevamento di tutte le condizioni di interesse delle varie culture.

Per il rilevamento delle condizioni del suolo o delle foglie e quindi della pianta in generale, sono disponibili differenti classi di sensori¹⁴:

- sensori elettrici o elettromagnetici che misurano la resistività o la conduttività elettrica del suolo che variano a seconda della sua composizione;
- sensori ottici e radiometrici utilizzano onde elettromagnetiche per rilevare il livello di energia assorbita dalle particelle del terreno;
- sensori elettrochimici che utilizzano membrane ione-selettive per rilevare l'attività di ioni come idrogeno, potassio o nitrato a seconda della risposta in tensione ottenuta.

Il più semplice esempio di applicazione è quello dei sensori radiometrici: essi si basano sul fatto che ogni corpo che ha una temperatura maggiore di 0 K, emette radiazioni la cui intensità e distribuzione spettrale sono determinate dalla temperatura. Poiché l'evaporazione dell'acqua è un processo che richiede energia, l'aumento dei tassi di evapotraspirazione, ovvero della quantità di acqua che evaporando passa in atmosfera, fa diminuire la temperatura superficiale di foglie e piante. Sulla base di questo principio, il telerilevamento termico a terra è diventato uno dei metodi più importanti per stimare il livello di siccità e di conseguenza avviare correttamente ed in maniera "intelligente" il processo di irrigazione.¹⁵

2.3.2 L'Agricoltura di Precisione

L'introduzione di tutte le tecnologie sopra elencate nell'ambito agricolo, ha portato alla nascita della cosiddetta "Agricoltura di precisione" (PA): essa riguarda, infatti, l'utilizzo di tecnologie di monitoraggio ed intervento, al fine di migliorare l'efficienza di tutte le principali attività agricole.

Una definizione più chiara ed esaustiva è fornita da Gebbers et al., secondo i quali l'agricoltura di precisione è un concetto di gestione delle coltivazioni, sulla base dell'osservazione, della misurazione e della risposta alla variabilità spazio-temporale del meteo, del suolo e della produzione agricola. Questa, ovviamente, richiede l'impiego di tecnologie appropriate che lavorino in modo preciso e tempestivo con il fine di migliorare la produzione riducendo al minimo gli impatti ambientali.¹⁶

Questa nuova idea di concepire l'agricoltura nasce già nella prima metà degli anni '80 come quella metodologia che consiste nell'applicare il trattamento giusto nel posto giusto al momento giusto. Inizialmente, l'agricoltura di precisione veniva utilizzata per adattare la distribuzione dei fertilizzanti alle diverse condizioni del suolo. Successivamente si sono evolute numerose pratiche aggiuntive come l'automazione dei veicoli e degli attrezzi agricoli, la tracciabilità dei prodotti e software per la gestione complessiva dei sistemi di produzione agricola, fino a giungere ai giorni nostri in cui è possibile svolgere in maniera intelligente e pensata tutte le attività agricole.

Nella figura successiva viene mostrato un tipico ciclo di coltivazione che coinvolge l'agricoltura di precisione:

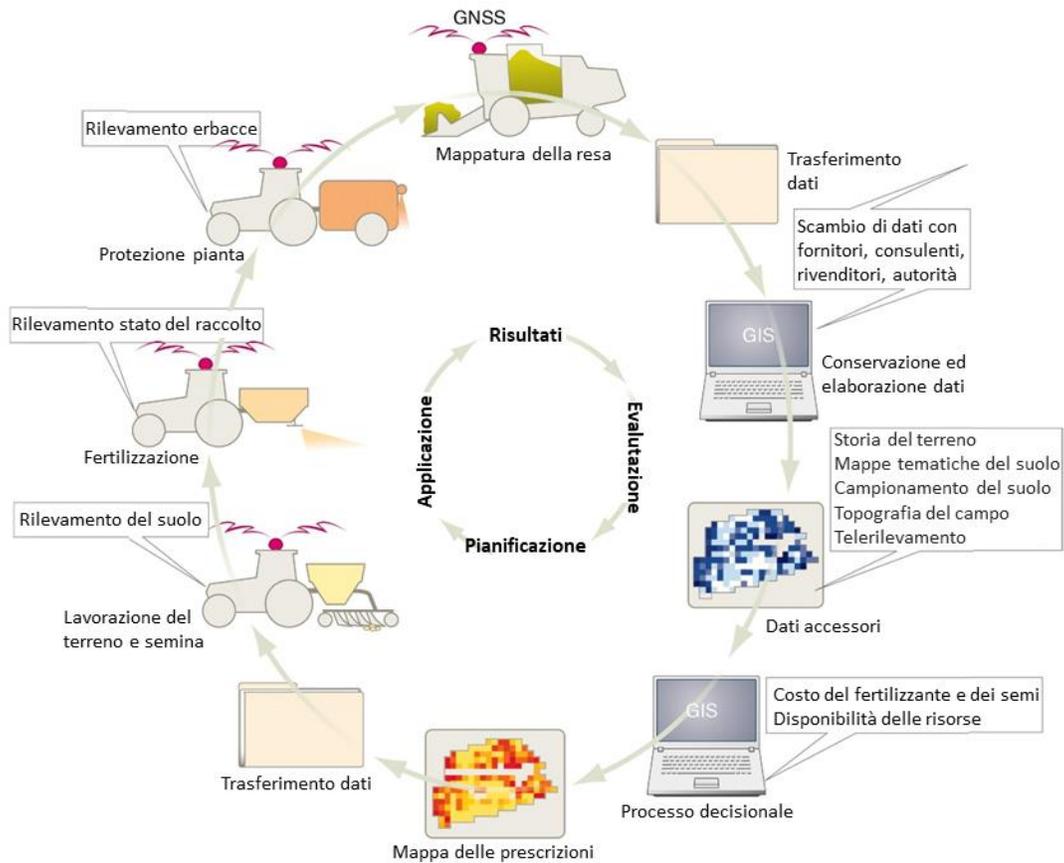


Figura 4: Ciclo di coltivazione realizzato con agricoltura di precisione ¹⁶

Due sono gli approcci con i quali è possibile eseguire trattamenti delle colture in un campo agricolo: un approccio di tipo predittivo ed uno di tipo reattivo.

Nel predittivo vengono utilizzate informazioni riguardanti la storia del terreno, mappe tematiche del suolo, topografie del campo e molti altri dati spaziali già esistenti per stimare il tipo di trattamento necessario.

Nell'approccio reattivo, invece, le quantità dei prodotti chimici da utilizzare variano a seconda dello stato della coltura in una determinata posizione ed in un determinato momento. Ciò, ovviamente, richiede il costante rilevamento in tempo reale di tutte le condizioni utili per identificare lo stato di ogni pianta, come, ad esempio, il contenuto di clorofilla.¹⁷

2.3.3 L'elettrificazione dei robot agricoli

La seconda importante sfida riguarda l'inquinamento: ai nuovi robot agricoli è richiesto di svolgere ogni attività non solo in maniera efficiente e precisa ma anche e soprattutto in modo sostenibile, riducendo al minimo gli sprechi e soprattutto le emissioni di gas responsabili dell'effetto serra (GHG), o, più semplicemente, gas serra.

Per svolgere le varie operazioni del mondo agroalimentare, che vanno da attività primarie quali la semina, l'aratura, il diserbo e la raccolta, ad attività secondarie come lo stoccaggio o l'imballaggio; vengono generalmente usate grosse macchine alimentate a combustibili fossili che rappresentano una fonte di energia garantita e facilmente accessibile. Tutto ciò contribuisce, senza dubbio, all'ingente aumento di emissione di gas serra nell'ambiente.

Il gruppo CGIAR (Consultative Group on International Agricultural Research) ha, infatti, dichiarato che le catene agroalimentari consumano circa il 30% dell'energia globale totale e contribuiscono per un terzo alle emissioni di gas serra a causa dell'elevato consumo di combustibili fossili.¹⁸

In un contesto in cui è in aumento l'interesse globale verso politiche di riduzione degli impatti ambientali dovuti ai combustibili fossili, è sempre più necessario l'utilizzo dei cosiddetti "veicoli verdi" (green vehicle) anche e soprattutto nel settore agricolo. Sono considerati "veicoli verdi" i veicoli elettrici a batteria (Battery Electric Vehicles), veicoli elettrici a celle a combustibile (Fuel Cell Electric Vehicles), veicoli elettrici ibridi plug-in (Plug-in Hybrid Electric Vehicles) e veicoli elettrici ibridi. L'obiettivo finale è, ovviamente, quello di sostituirli presto ai normali veicoli a combustione interna, riducendo drasticamente le emissioni di gas serra del settore agricolo.

Il processo di elettrificazione di un veicolo agricolo, però, è sicuramente diverso e senza dubbio più complicato di quello che riguarda un'automobile.

I veicoli utilizzati in agricoltura sono caratterizzati da masse ed ingombri importanti, inoltre, come ogni veicolo di tipo off-road, si muovono su percorsi impervi, spesso scivolosi ed in pendenza. Sono richieste, quindi, elevate capacità di trazione e di tenuta di strada e, di conseguenza, le potenze richieste saranno sicuramente diverse da quelle necessarie a muovere una classica automobile. Nonostante ciò, al giorno d'oggi, l'elettrificazione dei trattori e dei robot agricoli di piccole e medie dimensioni sembra essere, ormai, una realtà.

La transizione verso l'elettrico vede i primi tentativi già all'inizio degli anni '60, quando l'azienda statunitense Allis Chalmers produce un trattore dotato di 1008 celle alcaline individuali da 1V per cella, unite in 4 pacchi batterie, in modo tale da ottenere sufficiente potenza per alimentare il motore DC utile alla propulsione.¹⁹ Tuttavia fattori quali l'elevato costo della produzione di batterie e la facile reperibilità dei combustibili fossili, hanno sicuramente ritardato il processo di elettrificazione che, al giorno d'oggi, è diventato una necessità.

I vantaggi legati all'elettrificazione dei veicoli agricoli sono molteplici e non riguardano soltanto la riduzione della quantità di gas serra emessi: per Ghobadpour et al., attraverso l'elettrificazione si avrà una crescita dell'efficienza, della flessibilità, della produttività e delle prestazioni.

Numerose parti azionate meccanicamente verranno disaccoppiate dal motore nel momento in cui verranno sostituite con accessori elettrici, quali pompa dell'acqua, le ventole di raffreddamento o il compressore dell'aria condizionata; in questo modo si avrà sicuramente una diminuzione delle perdite per attriti e del consumo di carburante con conseguente aumento dell'efficienza.

I nuovi componenti elettrici saranno sicuramente caratterizzati da una maggiore flessibilità nella disposizione, essi, infatti, potranno essere disposti in modo tale da migliorare la risposta al carico della PTO (Power Take-Off), ovvero l'innesto al quale vengono agganciati gli attrezzi e gli accessori. Tutto ciò porta ad un incremento di produttività perché può essere aumentata l'accelerazione durante il trasporto di accessori e attrezzi.²⁰

Ulteriori benefici si trovano anche nell'elettrificazione degli accessori e degli attrezzi agricoli: sui trattori è previsto, di solito, l'albero per la presa di potenza (PTO Power Take-Off) ed il suo relativo sistema idraulico; insieme costituiscono un sistema meccanico scoperto che trasmette, appunto, potenza ai vari attrezzi e che, spesso, è fonte di usura ed infortuni. Lo sviluppo di nuovi attrezzi ed accessori elettrici e facilmente installabili porterebbe sicuramente alla riduzione di tali incidenti.

2.4 Esempi

In questo vasto panorama si può, ormai, dire che i robot agricoli sono una realtà: numerosi, infatti, sono i modelli già esistenti sul mercato; ognuno dotato di una sua particolare tecnologia per la navigazione, per la propulsione e per la trazione ed altrettanto numerose sono le aziende che a livello internazionale hanno deciso di automatizzare con successo tutta una serie di operazioni agronomiche.

Nel settore agricolo è proprio la viticoltura che rappresenta un ambito che si presta bene all'introduzione dell'automazione: l'impiego di robot, infatti, può essere particolarmente interessante in questo campo che è caratterizzato da picchi di lavoro stagionali, da zone di lavoro collinari con elevata pendenza e forte necessità di trattamenti fitosanitari. Sono diverse le soluzioni già presenti sul mercato o in via di commercializzazione, tutte provenienti da zone Europee e non in cui il settore vitivinicolo è di fondamentale importanza, tra le quali vi è anche l'Italia.

2.4.1 Bakus

Bakus è un robot scavallante elettrico che nasce come piattaforma destinata ad ospitare vari strumenti: gli utensili sono intercambiabili ad azionamento elettrico, oppure passivi per effettuare operazioni quali il diserbo meccanico, la spollonatura, la cimatura e l'irrorazione. Per quest'ultima operazione è previsto anche un sistema di recupero che evita la dispersione del prodotto utilizzato in natura riducendo ulteriormente gli sprechi.

Il portattrezzi è opera dell'azienda francese VitiBot che produce robot scavallanti per vigneti e che opera, quindi, nel campo della viticoltura sostenibile.

Sono disponibili due diverse versioni S ed L che differiscono per dimensioni in modo tale da adattarsi a filari di diversa altezza; entrambe pesano 2 tonnellate e raggiungono velocità di circa 5 km/h grazie ad un motore elettrico brushless alimentato da un pacco batterie a Litio.

La corretta navigazione è assicurata da un sistema GPS con doppia antenna RTK con il quale si ottengono precisioni dell'ordine del centimetro.²¹



Figura 5: Bakus by VitiBot ²¹

2.4.2 Trektor

Trektor è un robot scavallante ibrido che nasce con l'obiettivo di svolgere in modo autonomo varie attività ripetitive: coltivazione, irrorazione e zappatura. Esso può variare il suo interasse e la sua altezza da terra, in questo modo può lavorare su vigneti con filari stretti e larghi ma anche in orticoltura o arboricoltura.

Il robot è nato presso la società di ingegneria francese Sitia che progetta e produce macchinari per il settore dell'automazione e che possiede un proprio dipartimento di innovazione robotica all'interno del quale vengono realizzate macchine con speciali competenze robotiche, proprio come Trektor.

È un robot altamente configurabile, non solo in termini di dimensioni ma anche in termini di operazioni: esso, infatti, può trasportare numerosi attrezzi grazie agli attacchi posti sia nella parte anteriore che in quella posteriore e può svolgere, quindi, le più disparate operazioni. Il motore è un ibrido diesel-elettrico e la corretta navigazione è assicurata da un sistema GPS RTK con il quale si ottengono precisioni dell'ordine del centimetro.²²



Figura 6: Trektor by Sita ²²

2.4.3 Ted

Ted è un robot scavallante elettrico prodotto in Francia dalla Naïo Technologies per il diserbo meccanico dei vigneti. Le operazioni svolte sono sostenibili e precise: l'azienda, infatti, propone un diserbo meccanico efficace ed accurato, senza l'uso di erbicidi, in modo tale da rispettare le colture ed il suolo. È, inoltre, possibile azionare diversi utensili per le lavorazioni del terreno che vengono installati su un porta utensili che si trova nella parte posteriore del robot.

Pesa circa 1 tonnellata e dispone di 4 ruote motrici, in questo modo riesce ad adattarsi anche a pendenze superiori al 30%. Ted è in grado di lavorare autonomamente quasi 5 ettari al giorno: esso esegue la mappatura del vigneto e poi stabilisce il percorso da compiere in funzione delle coordinate GPS; la precisione della navigazione è ottenuta tramite una serie di sensori laser di tipo Lidar, ultrasuoni e fotocamere che riescono a ricostruire l'intero vigneto in 3D.²³



Figura 7: Ted by Nao Technologies ²³

2.4.4 Icaro x4

Icaro è un robot ibrido italiano nato dalla start up di Treviso Free Green Nature che svolge trattamenti dei vigneti con raggi UV-C.

I trattamenti sono sostenibili e vengono svolti per evitare attacchi da funghi e microorganismi vari, quali Oidio, Peronospora e Borite, riducendo o eliminando del tutto l'impiego di fitofarmaci. Il robot è dotato di due braccia motorizzate sulle quali sono posizionati 8 emettitori di raggi UV-C: le foglie di ogni vite vengono irradiate ed in questo modo viene danneggiato il DNA dei microorganismi che causano le malattie.

Il vigneto in cui opererà il robot è provvisto di un insieme di sensori posti al centro di esso che raccolgono i dati climatici che inviano segnali di inizio trattamento nel momento in cui vengono identificate condizioni favorevoli alla proliferazione dei microorganismi.²⁴



Figura 8: Icaro x4 by Free Green Nature²⁴

2.4.5 VineScout

VineScout è un robot autonomo nato in Spagna in occasione del progetto Europeo Horizon2020 in collaborazione con l'università Politecnica di Valencia. Il compito principale del robot è quello di valutare lo stato nutrizionale della vite ed il relativo fabbisogno di acqua.

Numerosi sono i sensori presenti a bordo: per la navigazione vengono usati un Lidar multi-fascio per facilitare la rilevazione 3D realizzata da una stereo camera e due sensori ad ultrasuoni per migliorare la percezione del termine dei filari per permettere la manovra di sterzo; per valutare lo stato delle colture sono invece utilizzati un radiometro ad infrarossi ed una camera multispettrale in modo tale da valutare il vigore della vite.²⁵

Il robot è completamente elettrico ed è alimentato da due pacchi batterie al Litio da 12V e da due pannelli solari che sono in grado di fornire l'alimentazione ai sensori.



Figura 9: VineScout²⁵

2.4.6 YV01

YV01 è un robot scavallante a benzina, nato presso l'azienda giapponese Yanmar che attraverso un meccanismo di spruzzatura elettrostatica è in grado di irrorare i vigneti.

Le gocce spray vengono caricate elettricamente, in questo modo tutte le superfici delle foglie, anche quelle nascoste, sono in grado di attrarre le goccioline rendendo, così, il processo di irrorazione preciso ed efficiente. Il robot è provvisto di cingoli in gomma, in questo modo riesce ad operare su pendenze longitudinali del 45% e su pendenze laterali del 19%.²⁶



Figura 10: YV01 by Yanmar²⁶

2.4.7 Thorvald

Thorvald è un robot autonomo modulare completamente elettrico nato presso l'omonima azienda norvegese. In quanto robot modulare, esso è composto da una serie di moduli che possono essere combinati insieme in modi diversi per creare diverse tipologie di robot finali. I moduli sono progettati in modo tale da essere rapidamente adattati per una data applicazione in un determinato ambiente, come una serra, un tunnel, un campo aperto e un vigneto.²⁷

Proprio a causa della sua grande flessibilità, Thorvald può eseguire attività come il trattamento della luce con raggi UV-C, la raccolta di frutta e verdura, la fenotipizzazione, il trasporto sul campo, il taglio dell'erba per il foraggio, la spruzzatura e la raccolta dati delle colture.

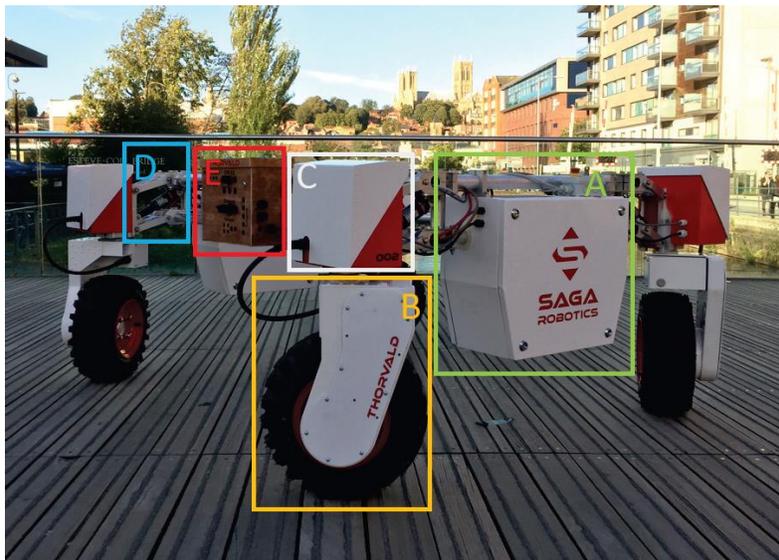


Figura 11: Moduli del Thorvald II²⁷

Nella Figura 11 è riportato uno dei robot della famiglia Thorvald: il Thorvald II. Sono visibili i moduli

principali: il modulo batteria *A*, il modulo di azionamento *B*, il modulo di sterzo *C*, il modulo di sospensioni *D* e quello di interfaccia per i vari sensori *E*.

Questi vengono ricombinati insieme per ottenere diverse configurazioni, alcuni esempi sono visibili nella figura successiva²⁷:



Figura 12: Esempi di robot assemblati con moduli Thorvald

2.4.8 Dood

Dood è un rover autonomo cingolato che nasce come porta attrezzi presso la startup italiana Earth Automation. Il robot supporta tutti gli attrezzi con attacco a tre punti di tipo Cat2 compatibili a livello di potenza e di peso ed è capace di lavorare sia in automatico che tramite il controllo di un telecomando wireless.²⁸

La macchina è azionata da un motore diesel e contempla la doppia predisposizione per il cingolo metallico e per quello gommato.

La particolarità di questo rover è nel sistema di navigazione: viene sfruttata la cosiddetta “visual navigation” che consiste nella ricostruzione in tempo reale dell’ambiente circostante, attraverso quattro moduli per la visione panoramica del veicolo e due moduli (uno anteriore ed uno posteriore) per la percezione della profondità. Tuttavia è possibile trovare a bordo anche un’antenna GPS che serve per guidare il rover durante il suo primo percorso ed in caso di guasto ai sensori esso sarà in grado di ritornare a velocità ridotta in zona sicura.²⁹



Figura 13: Dood by Earth Automation ²⁸

Per facilitare il confronto e l'analisi delle tecnologie esistenti al giorno d'oggi, si riporta una tabella che sintetizza le caratteristiche principali dei modelli analizzati in precedenza:

	Bakus S	Trektor	Ted	Icarox4	VineScout	YV01	Thorvald	Dood
Stato ed anno	2016, Fr	2020, Fr	Fr	2021, It	2016, Es	Giappone	Norvegia	Italia
Utilizzo	Porta attrezzi	Porta attrezzi	Diserbo	Prevenzione	Monitoraggi	Diserbo	UV	Porta attrezzi
Tipo di progetto	Commerciale	Commerciale	Commerciale	Commerciale	Ricerca	Commerciale	Commerciale	Commerciale
Peso	2000 kg	2900 kg	1700 kg	980 kg	300 kg	1000 kg	-	-
Velocità	5 km/h	7 km/h	6 km/h	-	4 km/h	4 km/h	5 km/h	6 km/h
Propulsione	Elettrico	Ibrido elett.	Elettrico	Ibrido elett.	Elettrico	Benzina	Elettrico	Elettrico
Trazione	4WD	4WD	4WD	4WD	2WD	Cingoli	4WS	Cingoli
Sistema di sterzo	4WS	4WS	4WS	4WS	2WS	-	4WD	-
Architettura	Scavallante	Scavallante	Scavallante	A terra	A terra	A terra	Scavallante	A terra
Autonomia	10 h	24h/24	8 h	10/15 ettari	6 h	-	10 h	-
Navigazione	GPS RTK	GPS RTK	GPS	GPS RTK	GPS	GPS RTK	GPS RTK	Visual/GPS

Tabella 2: Sintesi caratteristiche robot agricoli

3 Obiettivi di progetto

L'argomento centrale di questa tesi è il progetto di un drone a guida autonoma che si in grado di svolgere autonomamente operazioni di monitoraggio all'interno dei vigneti.

I vincoli di progetto sono riportati in seguito:

- Il drone deve essere compatto: non deve, quindi, avere una larghezza superiore al metro ed una lunghezza superiore al metro e mezzo;
- Il drone deve essere il più sostenibile possibile: è preferibile, quindi, che sia ibrido o elettrico a patto che abbia sufficiente autonomia;
- Il drone è usato per attività di monitoraggio, quindi non sono previste prese di potenza (PTO) ed altri eventuali attacchi per accessori ed attrezzi;
- Il drone è a guida autonoma, deve, quindi, essere equipaggiato di tutte le tecnologie ed i sensori necessari al movimento autonomo, preciso e sicuro;
- Il drone verrà usato all'interno di vigneti: i suoi ingombri e le sue capacità di trazione devono essere consone all'ambiente in cui andrà ad operare che è caratterizzato da ridotti spazi di manovra e terreni scoscesi.

Il numero dei vincoli progettuali da rispettare non è contenuto, tuttavia nella fase di progettazione è stata concessa completa libertà per la scelta delle specifiche più consone all'applicazione in studio. Per ogni possibilità di progettazione sono stati valutati i vantaggi e gli svantaggi, i costi, il livello di sostenibilità e di semplicità di installazione; ognuna di esse è stata selezionata con il fine di trovare il giusto equilibrio tra tutte le caratteristiche sopra elencate ed i vincoli progettuali.

Per la scelta delle specifiche del drone in studio, è stato utile confrontare le peculiarità dei vari robot riportati nel capitolo precedente, tramite l'utilizzo di una matrice decisionale.

La matrice in questione è la Matrice Decisionale della Media Ponderata (Weighted Average Decision Matrix) che rappresenta un metodo semplice e soprattutto razionale per adottare la soluzione più appropriata in un contesto ricco di alternative e di criteri di varia importanza da tenere in considerazione. Ogni colonna della matrice rappresenterà uno dei modelli visti precedentemente (Bakus, Trektor, ecc..) ad eccezione della prima colonna in cui saranno contenuti i vari criteri decisionali, ovvero le possibili configurazioni e tecnologie implementate su ogni modello, che sono:

- Tipologia di trazione (4WD o 2WD);
- Tipologia di strumento di locomozione (ruote o cingoli);
- Tipologia di alimentazione;
- Tipologia di architettura;
- Sistema di navigazione.

Ad ognuno di questi criteri viene assegnato un peso relativo alla sua importanza che va 1 a 10, la cui scelta è soggettiva e che verrà riportato nella seconda.

A questo punto si assegna un punteggio ad ogni tecnologia adottata da ciascun robot nel seguente modo:

- 1 : tecnologia non consona in termini di costo, sostenibilità e livello di avanguardia;
- 3 : tecnologia mediamente consona in termini di costo, sostenibilità e livello di avanguardia;
- 5 : tecnologia completamente consona in termini di costo, sostenibilità e livello di avanguardia.

Per ogni modello viene calcolato un punteggio totale, dato dalla somma di tutti i criteri moltiplicati per il loro peso.

CRITERI	PESO	Bakus	Trektor	Ted	Icarus	VineScout	YV01	ThorvaldII	Dood
Trazione	8	5	5	5	5	3	3	5	3
Locomozione	6	5	5	5	5	5	3	5	3
Alimentazione	10	5	3	5	3	5	1	5	1
Architettura	3	5	5	5	5	5	5	5	5
Navigazione	9	5	5	3	5	3	5	5	3
TOTALE		175	155	157	155	141	107	175	89

Tabella 3: Matrice decisionale

La matrice decisionale ha indicato, tramite punteggio più alto espresso secondo preferenze soggettive, quale tra quelli analizzati è il robot che possiede le tecnologie più adatte al nostro scopo: Bakus e Thorvald II saranno i robot le cui tecnologie e specifiche saranno d'aiuto per a progettazione del drone oggetto di questo studio.

Di seguito vengono brevemente illustrate le scelte in termini di peso e di punteggio assegnati ai cinque criteri in studio, ogni tecnologia o specifica verrà, poi, ampiamente discussa nei paragrafi successivi.

- Tipologia di trazione: il peso assegnato è pari ad 8 in quanto è fondamentale avere adeguate capacità di trazione su suoli di tipo off-road; sono stati, quindi, attribuiti i seguenti punteggi:
 - 5 per la trazione 4WD;
 - 3 per la trazione 2WD.
- Tipologie di strumento di locomozione: il peso assegnato è pari a 6 in quanto anche gli pneumatici più moderni riescono ad assicurare un buon livello di aderenza, paragonabile a quello dei cingoli; ciò che discrimina la scelta sono i costi, il peso e gli ingombri. Sono stati, quindi, attribuiti i seguenti punteggi:
 - 5 per le ruote;
 - 3 per i cingoli.
- Tipologie di alimentazione: il peso assegnato è pari ad 10 in quanto è fondamentale realizzare tecnologie che siano il più possibile sostenibili e limitino le emissioni di gas ad effetto serra; sono stati, quindi, attribuiti i seguenti punteggi:
 - 5 per robot 100% elettrici;
 - 3 per robot ibridi;
 - 1 per robot con motore diesel.
- Tipologie di architettura: il peso assegnato è pari ad 3 in quanto tutti i tipi di architettura sono ugualmente validi e ciò che è influente nella scelta sono soltanto eventuali vincoli di dimensioni e peso tipici di ogni progetto; sono stati, quindi, attribuiti i seguenti punteggi:
 - 5 per i robot con struttura scavallante;
 - 5 per i robot con struttura compatta.
- Sistemi di navigazione: il peso assegnato è pari ad 9 in quanto è fondamentale che ogni robot si muova con accuratezza e precisione; sono stati, quindi, attribuiti i seguenti punteggi:
 - 5 per la navigazione con GPS RTK;
 - 3 per la navigazione con GPS;
 - 3 per la navigazione con altre tipologie di sensori.

3.1 4WD vs 2WD

Per muoversi e trascinare con sé gli attrezzi in modo efficiente all'interno di un campo, un trattore deve essere capace di generare sufficiente trazione su qualsiasi tipologia di suolo.

La trazione è il risultato dell'azione reciproca delle forze di tensione e deformazione tra le ruote e la superficie del terreno e soltanto grazie a questa forza, il trattore è in grado di trascinare i carichi e di muoversi in avanti.

La capacità di trazione è una delle caratteristiche fondamentali di qualsiasi veicolo, che sia esso un'automobile, un autocarro o un trattore; essa è, infatti, uno dei principali indici di efficienza energetica dei veicoli e dipende da numerosi fattori quali: la massa del trattore, l'area di contatto tra gli pneumatici di trazione ed il suolo, dal tipo di attrezzi montati e dalla resistenza del suolo.

Numerose ricerche³⁰ mostrano che nel processo di interazione tra le ruote ed il suolo, può essere dissipato circa il 20-55% della potenza di un trattore, a causa dello slittamento e della resistenza che l'aria ed il suolo oppongono al rotolamento; è opportuno, quindi, capire come tutti questi fattori influenzino le specifiche di un trattore e valutare quali sono le configurazioni che possono portare alla massimizzazione della capacità di trazione.

Sono numerose le grandezze ed i fenomeni da analizzare per capire a fondo come si genera e come varia la forza di trazione.

3.1.1 Forza di trazione

Per meglio capire cos'è la forza di trazione e come agisce, è importante considerare quali sono le forze scambiate tra uno pneumatico che si muove a velocità costante su una superficie rigida.

Uno pneumatico di trazione ha due funzioni fondamentali:

- Supportare il carico verticale (F_z) agente sull'asse della ruota;
- Generare sufficiente forza di trazione (F).

In figura è rappresentato il diagramma di corpo libero di una singola ruota:

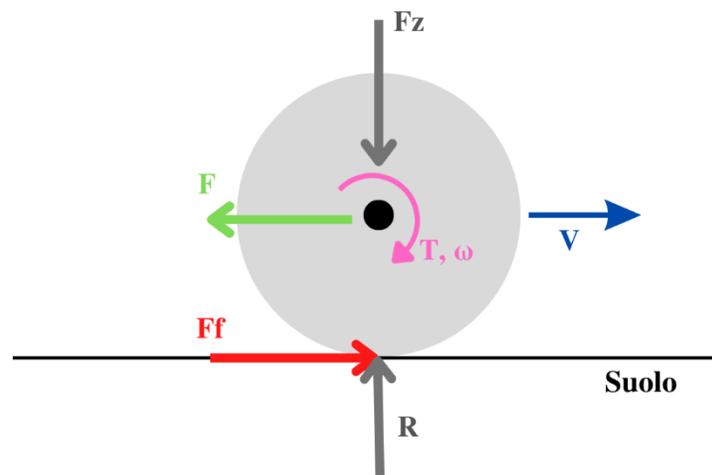


Figura 14: Diagramma di corpo libero di una ruota in trazione

Il carico F_z è un carico dinamico che agisce su ogni ruota e dipende da come il peso dell'intero veicolo è distribuito in quel momento su ogni ruota. Quando il sistema è in equilibrio, in prossimità della superficie di contatto si generano due forze di reazione:

- R : forza verticale di reazione al carico F_z ;
- F_f : forza di attrito che si oppone al moto della ruota generato dalla forza di trazione F .

Applicando una coppia T all'asse della ruota, si è in grado di generare la forza di trazione F necessaria al moto del veicolo. La coppia T è, ovviamente, proporzionale alla coppia generata dal motore del trattore in funzione del rapporto di trasmissione.

La forza di attrito F_f si genera a causa dell'interazione tra la superficie del terreno e lo pneumatico e vale:

$$F_f = R \cdot \mu$$

Dove μ è il coefficiente di attrito che dipende dal tipo di superficie su cui lo pneumatico si muove:

Tipo di superficie	Coefficiente di attrito μ [-]
Suolo morbido	0.26-0.31
Suolo medio	0.40-0.46
Suolo solido	0.43-0.53
Asfalto	0.91-0.98

Tabella 4: Valori del coefficiente di attrito per diverse superfici ³¹

3.1.2 Slittamento

Considerando una ruota pneumatica cedevole in rotazione su un suolo rigido, è possibile determinare una serie di grandezze che portano alla definizione di slittamento:

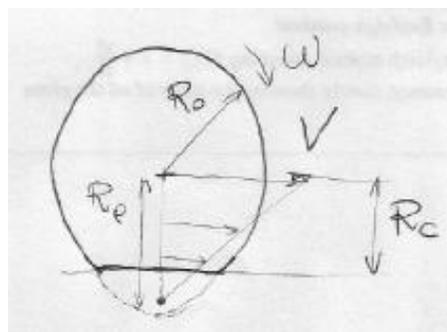


Figura 15: Ruota cedevole su suolo rigido ³²

Innanzitutto è importante evidenziare il fatto che nel momento in cui una ruota cedevole entra in contatto con un suolo rigido o cedevole, lo pneumatico ed il terreno saranno in contatto non in un unico punto, come accade per una ruota rigida su un suolo rigido, ma in un insieme di punti che vanno ad individuare la cosiddetta zona di contatto.

In figura 15 sono visibili tre differenti raggi:

- Il raggio R_0 che è il raggio della ruota indeformata;
- Il raggio sotto carico R_c che è la distanza del centro della ruota dalla superficie del terreno sotto l'azione di un carico verticale (forza peso) applicato all'asse;
- Il raggio di rotolamento effettivo R_e che di solito vale 97-98% del raggio indeformato R_0 .

Sono, inoltre, definite:

- V : velocità di traslazione dell'asse della ruota;
- ω : velocità di rotazione della ruota;

e vale la relazione:

$$V = \omega \cdot R_e.$$

Viene, così, definito lo scorrimento longitudinale o slip come:

$$\sigma = \frac{V - \omega R_0}{V}$$

che dipende dalle condizioni della ruota e del suolo e può assumere tutti i valori compresi tra 0 ed 1. Quando lo scorrimento è nullo, non esiste moto relativo tra lo pneumatico ed il terreno; tuttavia, studi, esperimenti e formulazioni empiriche, mostrano che uno pneumatico è in grado di generare una forza di trazione solo nel momento in cui esiste scorrimento e quindi moto relativo, tra la ruota e la superficie del suolo.

Di conseguenza una ruota che è in grado di sviluppare trazione, ha un valore di scorrimento maggiore di 0 e si può notare che al crescere della forza di trazione generata, lo scorrimento aumenta e contemporaneamente diminuisce la velocità di traslazione V . Un valore di scorrimento pari ad 1, inoltre, indica che lo pneumatico è bloccato: ruota su se stesso senza spostarsi.

3.1.3 Forza di trazione e grandezze associate

Esiste una relazione lineare tra forza di trazione e slittamento, la quale è influenzata dai seguenti fattori: carico verticale Fz , coefficiente di attrito μ e pressione di gonfiaggio delle ruote.

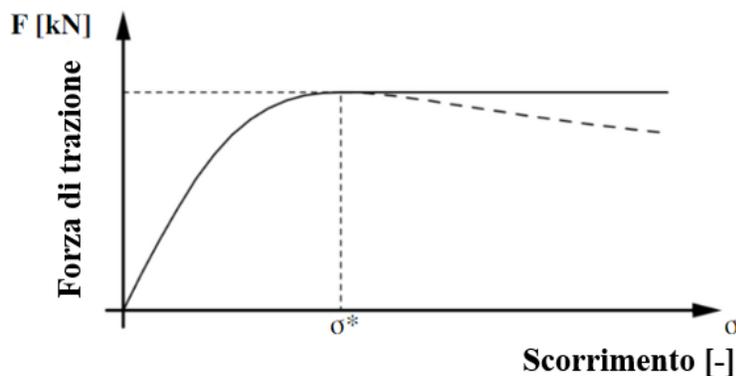


Figura 16: Andamento della forza di trazione in funzione dello scorrimento³²

Come visibile dalla figura riportata sopra, non tutti i valori di scorrimento portano ad una condizione di miglior trazione: solitamente le ruote motrici devono avere uno scorrimento che non superi il 15-16%. Valori più grandi si traducono in prestazioni sul campo inferiori, meno autonomia e maggiore distruzione della struttura del suolo. Allo stesso tempo non è accettabile nemmeno uno scorrimento minore del 5-7% che si ottiene quando le ruote motrici sono sotto eccessiva forza di gravità. In questo caso la potenza motrice viene utilizzata per portare il peso in eccesso compattando inutilmente il terreno, con conseguente aumento del consumo di carburante.³⁰

Numerosi studi ³³ indicano che il valore ottimale di scorrimento per un trattore deve essere compreso tra l'8% ed il 12%.

Tutto ciò evidenzia come lo scorrimento sia un parametro determinante per una trazione ed un consumo efficienti.

- Influenza del coefficiente di attrito μ sulla forza di trazione:
diversi coefficienti di attrito determinano minime variazioni nel tratto lineare della curva F - σ ma modificano proporzionalmente il valore massimo.
All'aumentare del coefficiente di attrito, quindi, la forza massima di trazione cresce.

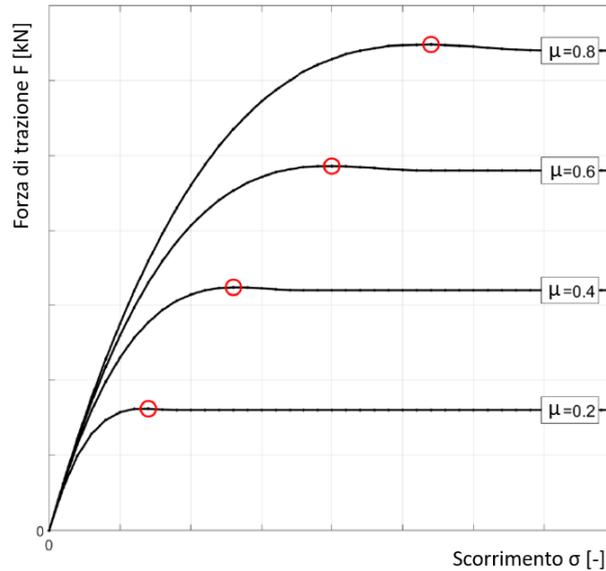


Figura 17: Influenza del coefficiente di attrito sulla forza di trazione ³²

- Influenza del carico verticale sulla forza di trazione:
l'incremento del carico verticale determina un aumento della pendenza della curva di trazione, mentre i valori di scorrimento che corrispondono al massimo della forza di trazione rimangono circa costanti.

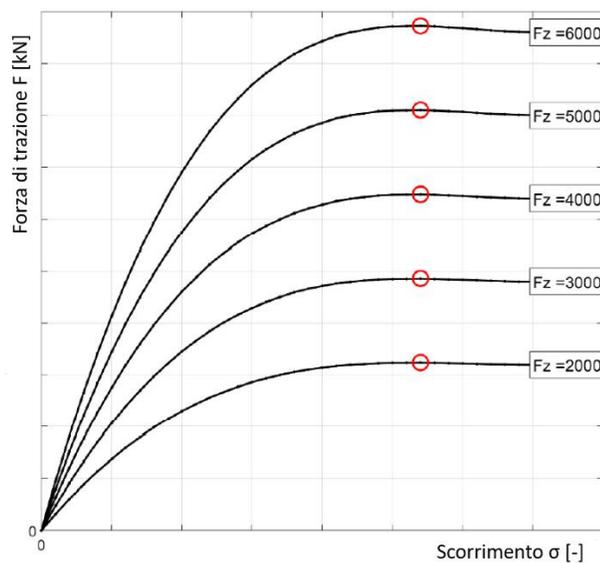


Figura 18: Influenza del carico verticale F_z [N] sulla forza di trazione ³²

Per valutare correttamente la capacità di trazione di un trattore, non è importante soltanto la sua massa totale, ma lo è anche la distribuzione del peso sugli assi: per un veicolo a trazione anteriore (2WD) l'asse frontale deve sostenere la maggior parte della massa totale per fornire stabilità e controllo nella sterzata; per un veicolo a trazione integrale (4WD), invece, l'asse posteriore sostiene circa il 60% della massa totale.³⁰

- Influenza della pressione di gonfiaggio sulla forza di trazione:
una diminuzione della pressione di gonfiaggio degli pneumatici motrici, porta ad un aumento dell'area di contatto tra la ruota ed il terreno. Questo si traduce sia in un aumento dello slittamento che in una minor compressione del terreno, in quanto la massa del trattore è distribuita su un'area maggiore.

Dal momento in cui si conoscono le principali grandezze che influenzano la capacità di trazione di un veicolo, è possibile capire come queste variano nei sistemi 2WD e 4WD e, di conseguenza, scegliere la tecnologia più adatta all'applicazione in questione.

3.1.4 4WD

La sigla 4WD (four-wheels drive) indica tutti quei veicoli a quattro ruote in cui la coppia motrice fornita dal motore è ripartita su ognuna di esse.

Con questo tipo di tecnologia il veicolo è più capace di affrontare fondi stradali sconnessi, con elevata pendenza ed a bassa aderenza; di norma, quindi, la trazione integrale è preferibile nelle applicazioni di tipo off-road. La trazione integrale è sicuramente più costosa rispetto alle altre e richiede un grado maggiore di "difficoltà di progettazione".

In figura è riportata la configurazione più classica di un sistema a trazione integrale:

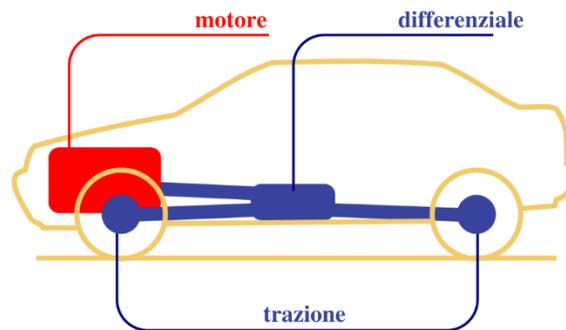


Figura 19: Trazione integrale
From Wikipedia

3.1.5 2WD

La sigla 2WD (two-wheels drive) indica tutti quei veicoli in cui la coppia motrice fornita dal motore è completamente ripartita o sull'asse anteriore o su quello posteriore.

La trazione posteriore, a differenza di quella anteriore, fornisce maggior aderenza sia in salita che in fase di accelerazione perché in queste condizioni una buona parte del carico si sposta sulle ruote posteriori. In condizioni di scarsa aderenza o di forti accelerazioni laterali, però, la trazione posteriore può portare ad una deriva del retrotreno o, nel peggiore dei casi, ad una completa perdita di aderenza con conseguente rotazione del veicolo intorno al proprio asse e possibilità dei cosiddetti "testacoda".

La trazione anteriore, invece è più leggera e meno costosa rispetto a quella posteriore in quanto non sono

necessari alberi per trasmettere il moto al retrotreno.
Vengono riportate le possibili configurazioni:

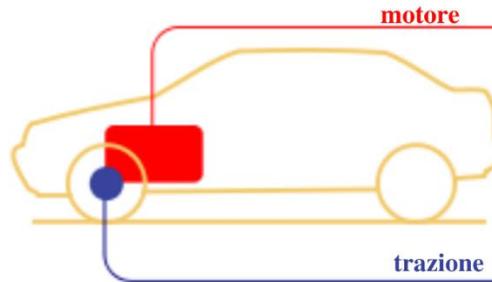


Figura 20: Trazione anteriore

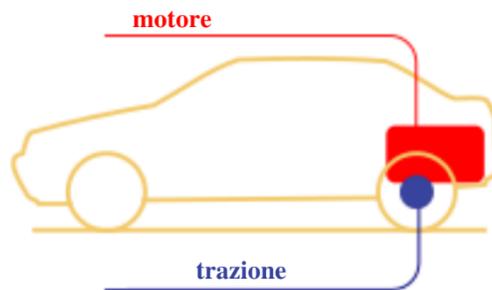


Figura 21: Trazione posteriore con motore posteriore (raro)

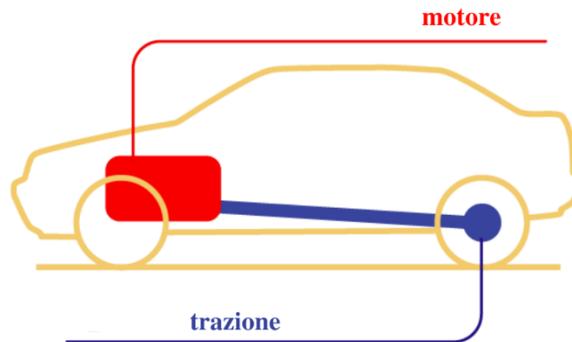


Figura 22: Trazione posteriore con motore anteriore

Per la scelta del tipo di trazione adottata sul drone in questione, si è fatto riferimento ad articoli presenti in letteratura che raccolgono test condotti in campo su trattori per valutare e comparare la loro capacità di trazione sia in configurazione 2WD che 4WD.

Jenane et al., hanno condotto prove su cinque diverse superfici con uno stesso trattore e le conclusioni finali sono state tratte confrontando le due tipologie di configurazione (4WD e 2WD) in termini di slittamento, efficienza di trazione TE e rapporto di trazione dinamico DTR.

Le ultime due grandezze sono state definite nel seguente modo:

- L'efficienza di trazione è la percentuale della potenza totale di trazione che è effettivamente disponibile agli assi motori

$$TE = \frac{\text{Forza di trazione} \cdot \text{velocità di avanzamento}}{\text{Coppia all'asse} \cdot \text{velocità di rotazione dell'asse}}$$

- Il rapporto di trazione dinamico è definito come il rapporto tra la forza di trazione e il carico verticale che agisce sulle ruote motrici

$$DTR = \frac{\text{Forza di trazione}}{F_{z,TOT}}$$

Il trattore utilizzato per le prove è il Massey-Ferguson 3080 alimentato da un motore diesel ed avente massa totale di circa 4,5 tonnellate. Le ruote posteriori hanno un diametro leggermente maggiore di quelle anteriori e la distribuzione della massa totale prevede il 40% di essa sulle ruote anteriori ed il 60% su quelle posteriori. In tutte le prove il trattore in questione ha trascinato un secondo trattore, più piccolo, per fornire i diversi carichi di trazione.

Sono state ottenute numerose curve che relazionano i coefficienti in questione con lo slittamento: per tutte le superfici, sia quelle più aderenti che quelle meno aderenti, la configurazione a trazione integrale ha mostrato maggior efficienza di trazione, con valori maggiorati anche del 25%. Un andamento simile si è ottenuto anche per il rapporto di trazione dinamico.³⁴

Si può, quindi, concludere che la trazione integrale fornisce ai trattori una maggiore capacità di trazione.

Risultati simili sono stati ottenuti anche da Damanauskas et al., che in test simili a quelli riportati in precedenza hanno ottenuto importanti conclusioni non solo sull'efficienza di trazione ma anche sui consumi di carburante per le diverse configurazioni: gli andamenti dell'efficienza di trazione sono gli stessi, tuttavia è evidente come, al variare dello slittamento, i consumi di carburante siano minori per la configurazione 2WD.³⁰

I risultati ottenuti in tali studi sono in linea con le nozioni teoriche riportate in precedenza, tuttavia, nonostante il costo ed i consumi siano minori, per il drone in questione è stata scelta una trazione di tipo integrale. I terreni di un vigneto sono, spesso, caratterizzati da elevate pendenze e bassi attriti per cui è importante prediligere una migliore capacità di trazione a discapito dei costi.

3.2 4WS vs 2WS

Come per la trazione, anche per la manovra di sterzo sono disponibili due diverse configurazioni:

- 2WS ("two-wheels steering) in cui solo le due ruote di uno degli assi sono in grado di sterzare;
- 4WS ("four-wheels steering) in cui tutte le ruote del veicolo possono sterzare.

L'idea che accompagna un sistema di sterzo a quattro ruote sterzanti è che il veicolo richiede un minor contributo del guidatore per ogni manovra: tutto il veicolo, infatti, si muove nella stessa direzione a differenza della configurazione con due ruote sterzanti, in cui la metà del veicolo non sterzante segue la metà sterzante. Con l'eliminazione di questo ritardo presente tra le due metà del veicolo, il sistema risponde in maniera più pronta e più veloce a qualsiasi comando di sterzo.

Il vantaggio più importante dei sistemi di sterzo con quattro ruote sterzanti è da ricercare nelle dimensioni del raggio di curvatura ottenuto: in tutte le manovre di sterzo, infatti, il raggio di curvatura di un veicolo con quattro ruote sterzanti ha un valore nettamente minore di quello ottenibile con un veicolo a due ruote sterzanti.

Anche in questo caso la realizzazione di un sistema a quattro ruote sterzanti risulta più complessa e più costosa rispetto al caso di un sistema a due ruote sterzanti; i moderni sistemi 4WS, inoltre, richiedono spesso l'installazione su ognuna delle ruote sterzanti di un motore adibito alle manovre di ed il conseguente utilizzo di sistema elettronico di controllo che contribuisca alla manovra di sterzo.

I filari posti all'interno dei vigneti sono molto ravvicinati tra di loro, per spostarsi da un filare all'altro è, quindi, necessario portare a termine una manovra di sterzo in uno spazio davvero ristretto. Risulta essenziale mantenere piccoli i valori del raggio di curvatura, in particolar modo, per questo tipo di manovre sono accettabili raggi non superiori ai 6 m.

Un sistema di sterzo con tutte e quattro le ruote sterzanti è la scelta più opportuna per questo tipo di progetto; come verrà descritto meglio nel capitolo successivo, il sistema che è stato progettato permette alle ruote dei due assali di sterzare in direzioni opposte in modo tale da ottenere la massima riduzione del raggio di curvatura.

3.3 Ruote vs cingoli

Le caratteristiche di un cingolo, gommato o metallico che sia, sono completamente diverse da quelle di uno pneumatico. Per comprendere al meglio la scelta effettuata è necessario conoscere la struttura dei cingoli ed il loro funzionamento.

3.3.1 Funzionamento dei cingoli

Nei cingoli, una ruota motrice di piccole dimensioni (pignone M) riceve il moto dagli organi meccanici connessi al motore del veicolo e lo trasmette al cingolo. La trasmissione pignone-cingolo avviene in seguito all'ingranamento dei denti del pignone con i fori presenti tra le maglie del cingolo.

All'interno del sistema cingolo, come visibile nella figura successiva, sono presenti altre tre tipologie di ruote:

- Una ruota di rinvio, indicata con R, sulla quale non agisce l'azione del motore, la quale consente al cingolo di avere un'adeguata inclinazione nel punto di contatto con il suolo e, quindi, permette al veicolo di superare gli ostacoli;
- Eventuali rullini di ritorno posti nella parte superiore che sostengono il cingolo per evitare che tocchi terra;
- Due o più ruote di appoggio A che consentono al cingolo di avere un valore di tensione appropriato.

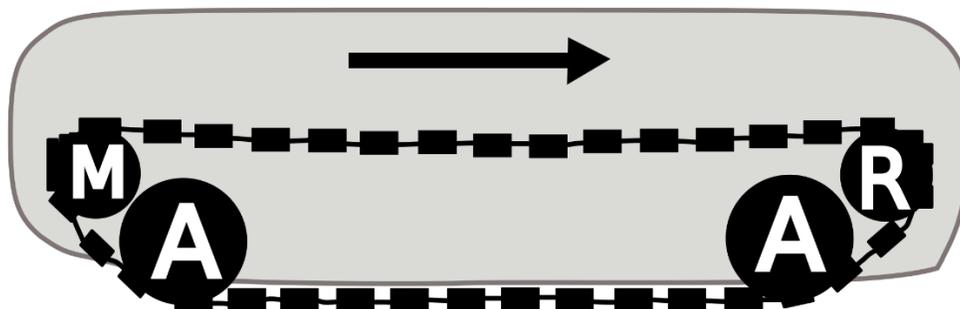


Figura 23: Cingolo

La tensione di ogni cingolo, infatti, non può essere troppo eccessiva, in quanto si genererebbe un sovraccarico nei perni del cingolo e non può nemmeno essere troppo bassa altrimenti il cingolo uscirebbe dalla propria sede presente sulle ruote di appoggio.

La scolpitura presente sulla parte esterna dei cingoli è fondamentale per assicurare la corretta aderenza del veicolo al suolo; è possibile distinguere due casi:

- La scolpitura affonda nel suolo: l'aderenza è fornita dai tasselli di terreno presenti tra una scolpitura e l'altra e varia con il numero ed il distanziamento delle scolpiture;
- La scolpitura non affonda nel suolo: il meccanismo di aderenza funziona come una normale ruota.

Nel primo caso si ottiene l'aderenza maggiore.

L'adozione di un cingolo piuttosto che una ruota porta ai seguenti vantaggi:

- Un aumento dell'aderenza dato dall'area di contatto cingolo-terreno che è più grande di quella ruota-terreno anche a parità di carico verticale e di materiali nel caso di cingolo gommato; ciò permette ai cingoli di operare su qualsiasi tipologia di terreno deformabile e poco coerente;
- Una minore pressione sul terreno con conseguente riduzione della compattazione del suolo, a causa della minore forza peso per unità di superficie.

Sebbene queste caratteristiche sono fondamentali per la realizzazione di un sistema efficiente, ci sono numerosi svantaggi che rendono questa tecnologia non consona a questo progetto:

- Il cingolo ha una massa maggiore rispetto a quella di una ruota: al motore è richiesta una coppia maggiore e un maggior consumo di carburante;
- I veicoli con cingoli metallici non possono circolare su strade civili;
- I cingoli sono molto più sollecitati delle ruote, sono meccanicamente più complicati e i perni e le maglie possono spesso arrivare a rottura: un eventuale danno richiede costi di sostituzione e di manutenzione alti.

L'applicazione in studio richiede una tecnologia che sia leggera e poco ingombrante, motivi per cui, durante la fase di progettazione, si è scelto di equipaggiare il veicolo con ruote.

3.4 Ibrido vs elettrico

Nel capitolo precedente sono stati ampiamente discussi tutti i vantaggi legati all'elettrificazione dei veicoli agricoli e, data la massa non eccessiva del drone in progetto, risulta possibile e conveniente un'alimentazione 100% elettrica.

Tuttavia, è stata analizzata anche la fattibilità di un eventuale piccolo impianto fotovoltaico da installare direttamente sul robot.

In letteratura ed in commercio non ci sono molte informazioni riguardanti robot agricoli alimentati esclusivamente con pannelli fotovoltaici, probabilmente perché l'energia che un pannello dalle dimensioni di un robot per vigneti riesce a sviluppare, non assicura abbastanza autonomia. Viste le tecnologie presenti al giorno d'oggi, la soluzione migliore è quella adottata per il VineScout riportato in figura 9 in cui due piccoli pannelli vengono usati per fornire energia ai sensori utili al monitoraggio delle viti.

Come si vedrà meglio nel capitolo successivo, per il drone oggetto dello studio, sono stati scelti determinati pacchi batteria a Litio per la propulsione ed un pannello fotovoltaico accessorio per l'alimentazione della sensoristica.

3.5 Architettura

Le tipologie di architettura analizzate nel capitolo precedente sono due:

- Scavallante: il robot si muove a cavallo di un filare;
- Compatta: il robot si muove tra un filare e l'altro.

Entrambe le tipologie sono, ovviamente, valide e consentono di svolgere le stesse operazioni. Di forte esempio sono i due robot per trattamenti con raggi UV-C: quello scavallante Thorvald e quello, invece, compatto Icaro x4. Entrambi svolgono la stessa operazione ma con diverse tecnologie meccaniche: il robot Icaro x4 riesce ad irradiare tutte le foglie tramite due braccia mobili, Thorvald, invece, irradia muovendosi semplicemente a cavallo del filare.

La scelta di una architettura piuttosto che l'altra dipende esclusivamente dai limiti di progetto imposti: per un'applicazione in cui sono richiesti ingombri e carichi contenuti, come quella del drone in studio, è quasi scontato che la scelta ricada su un tipo di struttura compatto.

3.6 Navigazione

Le tecnologie esistenti che assicurano una navigazione precisa e corretta sono state già ampiamente discusse nel capitolo precedente e possono essere sintetizzate come segue:

- Navigazione con GPS: il ricevitore GPS posto sul robot mobile, riceve il segnale da tre o più satelliti e coordinando le informazioni sulla posizione di ogni satellite e sull'ora precisa in cui è avvenuta la trasmissione, riesce a trovare la sua posizione;
- Navigazione con GPS RTK (Real-Time Kinematics): la posizione rilevata tramite segnale GPS viene costantemente corretta in tempo reale tramite il confronto tra due diverse posizioni di interesse. In questo modo vengono evitati tutti gli errori di fase presenti nel segnale modulato inviato dal satellite;
- Navigazione che sfrutta il contributo di più sensori (come il LiDAR) usati per il rilevamento di oggetti ed un determinato algoritmo che è in grado di risalire alla posizione all'interno di un ambiente noto;
- Una combinazione dei tre.

Tra tutte, la navigazione che sfrutta la tecnologia GPS con correzione in tempo reale RTK è quella che assicura maggiore integrità, continuità ed accuratezza: gli errori di posizionamento sono, infatti, dell'ordine del centimetro ed il sistema è in grado di riconoscere in tempo reale quali sono le misure affette da errore e quindi non utilizzabili. Come tutte le tecnologie all'avanguardia, questa è anche la più costosa fra tutte perché sono necessari almeno due ricevitori che abbiano le abilità e le competenze specifiche per effettuare correzioni davvero precise in tempo reale.

Sebbene le alternative low-cost alla tecnologia GPS RTK siano molteplici, richiedono tutto lo sviluppo di un algoritmo necessario all'elaborazione dei dati ottenuti dai vari sensori e, soprattutto, non assicurano lo stesso livello di accuratezza del sistema con RTK.

Come già spiegato precedentemente, le operazioni di monitoraggio all'interno dei vigneti richiedono estrema precisione, per questo motivo risulta corretto equipaggiare il drone oggetto dello studio con la tecnologia più accurata tra tutte, nonostante il costo elevato.

3.7 Le scelte

La tabella successiva sintetizza quali sono le tecnologie e le specifiche selezionate per il drone in progetto: come si è visto, ogni scelta è stata fatta nel rispetto dei vincoli imposti dal progetto cercando di trovare un giusto compromesso tra costi e benefici di tutte le alternative analizzate.

	SCELTA
Trazione	Integrale (4WD)
Movimentazione	Ruote
Alimentazione	100% elettrico + pannello fotovoltaico accessorio
Architettura	Compatto
Navigazione	GPS RTK

Tabella 5: Scelte progettuali

4 Design del drone

Il lungo e complicato processo di progettazione del drone ha seguito i passi riportati di seguito:

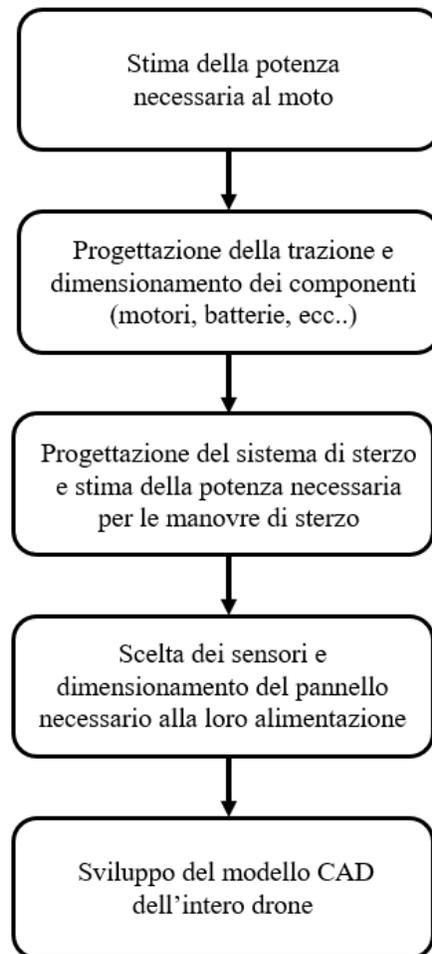


Figura 24: Road map seguita per la progettazione del drone

4.1 Stima della potenza necessaria al moto

Il calcolo della potenza necessaria al moto richiede il calcolo della forza resistente totale che si oppone al moto: gli pneumatici, a contatto con il terreno, devono essere in grado di generare una forza di trazione che sia almeno pari alla forza resistente totale.

Analizzando il diagramma di corpo libero di un veicolo agricolo in moto su un terreno inclinato a velocità costante, è possibile ottenere l'equazione utile per il calcolo della forza resistente totale:

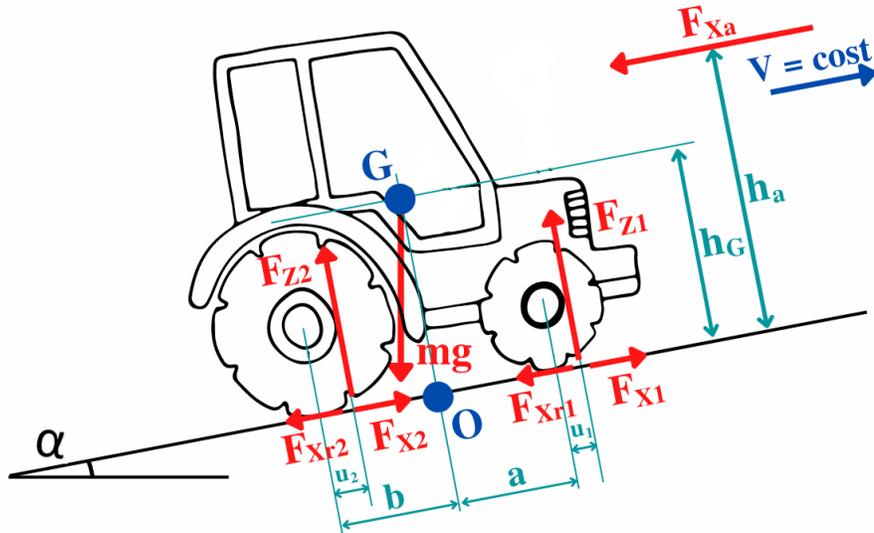


Figura 25: Diagramma di corpo libero di un veicolo in moto a velocità costante su un terreno in pendenza

In cui:

- F_{x1}, F_{x2} : forze di trazione sviluppate al contatto tra ruote posteriori e suolo e tra ruote anteriori e terreno;
- F_{z1}, F_{z2} : forze normali al piano agenti sulle ruote anteriori e posteriori;
- F_{xa} : resistenza aerodinamica;
- F_{xr2}, F_{xr1} : forze di resistenza al rotolamento;
- mg : forza peso totale del veicolo;
- u_1, u_2 : parametri di attrito volvente (di solito trascurabili), dovuti al fatto che la ruota è un corpo deformabile;
- a, b : distanze tra il baricentro e l'asse anteriore e tra il baricentro e l'asse posteriore;
- α : angolo di inclinazione del terreno;
- h_G : distanza del baricentro dal suolo;
- h_a : braccio della resistenza aerodinamica rispetto al punto O appartenente al suolo.

Tutte le forze originate dal contatto ruota-terreno sono il risultato delle azioni totali presenti su ognuno dei due assi.

Imponendo l'equilibrio lungo la direzione del moto, è evidente che la forza di trazione complessiva $F_{x1} + F_{x2}$ che il sistema di propulsione deve sviluppare per consentire l'avanzamento del veicolo su un terreno caratterizzato da una certa pendenza, è data dalla somma di tre contributi di resistenza:

- Resistenza dovuta alla pendenza longitudinale del terreno:

$$R_p = mg \cdot \sin \alpha$$

Questo termine non è altro che la componente longitudinale della forza peso;

- Resistenza al rotolamento:

$$R_R = \sum_i F_{Xri}$$

Questo termine rappresenta l'azione di tutte le perdite energetiche che entrano in gioco durante il rotolamento di uno pneumatico e che assorbono, quindi, parte della potenza meccanica disponibile. Le cause fondamentali sono, ovviamente, l'attrito generato negli slittamenti esistenti tra pneumatico e terreno, resistenze di tipo aerodinamico e l'isteresi dovuta al materiale che costituisce lo pneumatico.

Per meglio comprendere la sua azione ed il modo in cui questa forza di resistenza è calcolata; si riporta ciò che accade su una ruota che si muove a velocità costante su un generico terreno per effetto di una forza di trazione $F_{x,n}$:

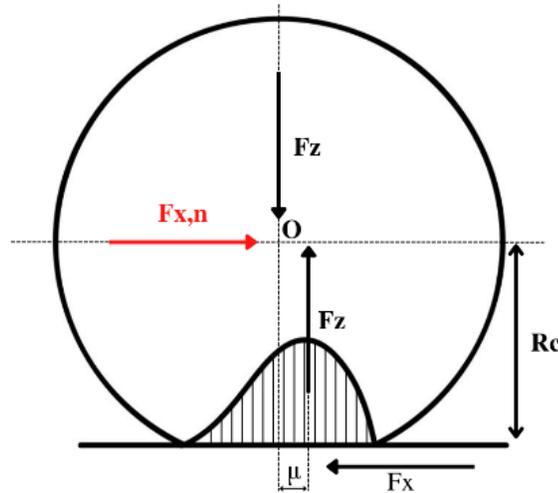


Figura 26: Diagramma di corpo libero di una ruota trascinata a velocità costante

In cui u è il parametro di attrito volvente ed ha le dimensioni di una lunghezza e l'area tratteggiata rappresenta la distribuzione delle pressioni di contatto, il cui picco è spostato della quantità u rispetto all'asse verticale passante per il centro della ruota a causa della deformabilità dello pneumatico.

Dall'equilibrio dei momenti attorno al punto O, si ricava la resistenza al rotolamento:

$$F_x = F_z \frac{u}{R_c}$$

Il parametro $\frac{u}{R_c}$ rappresenta il coefficiente di resistenza al rotolamento che indica l'entità della forza da applicare al mozzo della ruota per unità di carico verticale applicato ad esso e che viene, di solito, indicato tramite l'utilizzo di due coefficienti:

$$F_x = F_z \frac{u}{R_c} = F_z \cdot (f_0 + KV^2)$$

Il termine proporzionale al quadrato della velocità può essere trascurato nell'applicazione in studio in quanto le velocità in gioco non supereranno mai i 10 km/h; la forza resistente al rotolamento può essere, quindi, scritta come segue:

$$R_R = \sum_i F_{Xri} = \sum_i F_{zi} \frac{u_i}{R_i} = \sum_i F_{zi} f_{vi} = mg \cdot \cos \alpha \cdot (f_0 + KV^2) \cong mg \cdot \cos \alpha \cdot (f_0)$$

- Resistenza aerodinamica:

$$F_{xa} = \frac{1}{2} \rho C_x S V^2$$

In cui:

- ρ : densità dell'aria;
- C_x : coefficiente di resistenza aerodinamica determinato sperimentalmente in galleria del volo;
- S : area frontale del veicolo;
- V : velocità relativa del veicolo rispetto all'aria.

La resistenza totale è, quindi, la somma di tutti i termini elencati ed indica la minima forza che il veicolo deve fornire per poter avanzare, per cui:

$$F = F_{x,1} + F_{x,2} = mg \cdot \sin\alpha + mg \cdot \cos\alpha \cdot (f_0) + \frac{1}{2} \rho C_x S V^2$$

Per la stima della forza totale di trazione, sono stati ipotizzati i seguenti dati:

- $m = 200$ kg;
- $\alpha = 20^\circ$;
- $f_0 = 0,02$ (da tabelle);
- $\rho = 1,222$ kg/m³
- $C_x = 0,8$ (da tabelle);
- $S = w \cdot h = 0,6$ m \cdot $1,2$ m = $0,72$ m²
- V = velocità di avanzamento = $1,4$ m/s

Il valore di massa stimato pari a 200 kg, deriva dalla somma di tutte le masse che compongono il sistema, di cui alcune sono note ed altre, invece, sono state stimate; in particolar modo:

- $massa_{telai} \cong 100$ kg (valore stimato) ;
- $massa_{batterie} = 50$ kg;
- $massa_{pneumatici} = 24$ kg;
- $massa_{restante}$ (sensori, elettronica di controllo, pannello fotovoltaico) = 27 kg;

Si ottiene:

$$F \cong 700 \text{ N}$$

Si procede, quindi, con il calcolo della potenza necessaria al moto:

$$P_n = R_{tot} \cdot V = 700 \text{ N} \cdot 1,4 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 980 \text{ W} \cong 1 \text{ kW}$$

È importante precisare che il valore ottenuto rappresenta una sovrastima della potenza totale necessaria al moto, in quanto, il drone, in condizioni normali, non lavorerà mai alla sua velocità massima e nemmeno su un terreno caratterizzato da una pendenza così elevata per la durata totale del suo funzionamento.

Risulta, quindi, ragionevole stimare la potenza necessaria al moto come una percentuale (80%) della P_n :

$$P'_n = 0,8 \cdot P_n \cong 800 \text{ W}$$

La potenza ottenuta è quella necessaria al moto, che differisce da quella che effettivamente eroga il motore: ammesso che il motore eroghi una certa potenza motrice P_m , la potenza disponibile alle ruote motrici P_d è data da:

$$P_d = \eta_t P_m$$

In cui η_t è il rendimento del sistema di trasmissione.

I motori devono, quindi, erogare una potenza sicuramente maggiore di quella disponibile alle ruote motrici che, in prima approssimazione, coincide con quella necessaria al moto.

4.2 Progettazione della trazione

Per ottenere la configurazione 4WD desiderata, si è optato per due diversi motori elettrici, ognuno da 500 W, disposti come nella figura seguente:

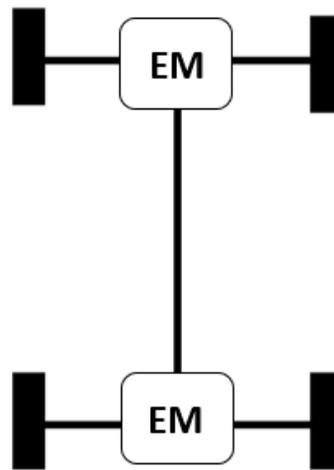


Figura 27: Configurazione della trazione e dei motori per la propulsione

Il collegamento tra motore ed asse è assicurato da due giunti omocinetici che garantiscono alle ruote la possibilità di sterzare e, soprattutto, una trasmissione uniforme ($\omega_{ruota} = \omega_{asse} = \omega_{motore}$).

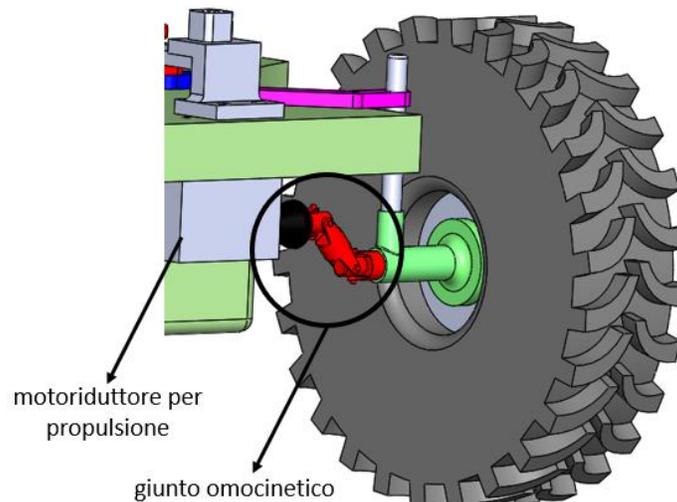


Figura 28: Collegamento motore ruota

In questo modo si ottiene una trazione di tipo integrale (4WD) e si evita l'utilizzo del differenziale: la soluzione adottata risulta, quindi, di semplice realizzazione.

Ogni motore deve garantire non solo una certa potenza in uscita, ma anche una certa coppia ed una certa rotazione del suo albero di uscita che siano sufficienti e consone all'applicazione in studio. Si procede, quindi, con il calcolo della velocità di rotazione di ciascuno dei due assi:

scelta una velocità di avanzamento di $1,4 \frac{m}{s}$ ed un raggio dello pneumatico di circa 150 mm si ottiene:

$$\omega_{asse\ ruota} = \frac{V}{R} = 9.3 \frac{rad}{s} \cong 90 \text{ rpm}$$

Sono, quindi, note la potenza e la velocità di rotazione minime che il motore deve essere in grado di erogare, si procede, quindi, con il calcolo della coppia in queste condizioni:

$$C \cong 60 \text{ Nm}$$

Sono disponibili tutti i dati necessari alla scelta del motore: la scelta migliore ricade su un motoriduttore elettrico DC a magneti permanenti alimentato a 12 V.

4.3 Scelta delle batterie

La fonte di energia selezionata per il progetto è un pacco batterie ricaricabile che permette al robot di ridurre a zero le emissioni di gas serra durante tutto il suo funzionamento.

Al giorno d'oggi le batterie più utilizzate per l'alimentazione di un robot o un veicolo elettrico sono senza dubbio composte da Litio. Il Litio ha innumerevoli vantaggi che gli hanno permesso di diventare la tecnologia più utilizzata nel mondo dell'alimentazione elettrica, arrivando a sostituire le classiche batterie al Piombo.

Il Litio è il più leggero tra tutti i metalli, al punto tale che galleggia sull'acqua. Il vantaggio principale sta nel fatto che esso ha il maggior potenziale elettrochimico il che lo rende uno dei metalli più reattivi trovati. Queste proprietà consentono di ottenere elevate densità di energia e potenza, utili in applicazioni ad elevata potenza come i veicoli elettrici.

Le batterie al Litio non sono tutte uguali, esse, infatti, differiscono non solo in dimensioni, tensione e quantità di Ampere-ora, ma soprattutto sono diverse per la chimica che le costituisce.

Esistono sei principali tipi di batterie al Litio, ognuno dei quali è adatto per delle specifiche applicazioni:

- **Batterie al Litio con chimica LCO:** Litio - Ossido di Cobalto LiCoO_2 .
Sono le batterie al Litio meno recenti, sono composta un catodo in ossido di cobalto ed un anodo in carbonio grafite. Questa tipologia di chimica fornisce elevata energia specifica (quantità di energia accumulata per unità di massa) ma il loro impiego è limitato ad applicazioni di piccola grandezza perché hanno una bassa corrente di scarica, in caso di carico elevato possono surriscaldarsi velocemente ed, inoltre, l'estrazione del cobalto ha numerosi limiti economici ed etici.
Sono impiegate soprattutto per smartphone, macchine fotografiche digitali e computer portatili, anche se la maggior parte dei produttori cercano di limitarne l'utilizzo.
- **Batterie al Litio con chimica LMO:** Litio - Ossido di Manganese LiMn_2O_4 .
Sono composte da un catodo in ossido di manganese ed un anodo in grafite.
Questa tipologia di chimica permette loro di fornire molta energia in poco tempo. Hanno una

stabilità termica superiore alle precedenti ma hanno una capacità minore.
Le applicazioni principali sono le bici elettriche, applicazioni mediche ed utensili elettrici di piccole-medie dimensioni.

- Batterie al Litio con chimica LFP: Litio – Fosfato di Ferro LiFePO_4 .
Sono le batterie più sicure e più stabili presenti ad oggi sul mercato, sono caratterizzate da un numero elevato di cicli di vita e da una curva di scarica piatta. Quest'ultima caratteristica indica il fatto che, nel processo di scarica, la tensione rimane pressoché costante e ciò assicura le stesse performance dall'inizio fino alla fine della scarica. Tutte queste specifiche rendono le batterie con chimica LFP le batterie più usate in tutto il settore industriale: automazione, agricoltura, robotica, veicoli elettrici, mezzi aeroportuali e mezzi speciali.
- Batterie al Litio con chimica NMC: Litio – Nickel Manganese Cobalto $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$.
Le composizioni dei vari elementi sono variabili ed ogni combinazione costituisce un particolare tipo di chimica. Sono caratterizzate da elevata energia specifica il che consente di installare più energia a parità di peso rispetto alle altre tecnologie al Litio.
Sono molto utilizzate nell'ambito automotive, la presenza di cobalto è fondamentale per avere stabilità ed aumentare i cicli vita ma, al tempo stesso, le rende abbastanza costose rispetto alle batterie con altre tipologie di chimica.
- Batterie al Litio con chimica NCA: Litio – Nickel Cobalto Alluminio LiNiCoAlO_2 .
Sono caratterizzate da elevata densità energetica ed una stabilità leggermente inferiore rispetto alle precedenti. Il campo in cui sono maggiormente utilizzate è quello dell'automotive e spesso sono usate in blend con le chimiche NMC in modo tale da ottenere un buon compromesso tra densità energetica, stabilità e sicurezza.
- Batterie al Litio con chimica LTO: Litio - Titanato $\text{Li}_4\text{Ti}_2\text{O}_{12}$.
Queste batterie sono ancora in via di sviluppo, ma tra qualche anno potrebbe essere probabilmente utilizzata per l'elettrificazione di macchine e veicoli con utilizzi molto intensi. Tra i vantaggi si ricorda l'elevato numero di cicli vita e la notevole stabilità termica che le rendono adatte a cicli di carica e scarica ad alta potenza. I punti di debolezza, invece, riguardano i bassi livelli di densità energetica e il loro elevato costo, probabilmente a causa delle minime richieste del mercato.^{35,36,9}

Da questa breve analisi delle varie tipologie di chimica delle batterie al Litio, risulta semplice scegliere le batterie al Litio con chimica LFP, ovvero le Litio – Fosfato di Ferro (LiFePO_4) che, anche se non sono caratterizzate un'elevata densità di energia hanno il l'enorme vantaggio di essere sicure ed assicurare le stesse performance durante tutta la loro autonomia.

Per la scelta delle dimensioni del pacco batteria, sono stati svolti pochi e semplici calcoli: innanzitutto si è ipotizzata un'autonomia di 6 ore che è in linea con i dimensionamenti dei pacchi batteria di altri robot agricoli trovati in letteratura.

Il pacco batteria deve, inoltre, alimentare contemporaneamente due motoriduttori che, nelle condizioni rare di massimo impiego, richiedono una potenza pari ad 1 kW ciascuno.

Per ogni motore sono, quindi, necessari:

$$500 \text{ W} \cdot 6 \text{ h} = 3 \text{ kWh}$$

Scelta una tensione di alimentazione di 12V sono richiesti:

$$\frac{3 kWh}{12 V} = 250 Ah$$

4.4 Sistema di sterzo

La progettazione del sistema di sterzo è sicuramente la parte principale di questo elaborato: essa ha, infatti, richiesto lo studio di diverse soluzioni strutturali e tecnologiche e solo una corretta combinazione di esse ha portato alla realizzazione del sistema di sterzo finale.

4.4.1 Le tipologie di sistemi di sterzo

Un robot agricolo deve sicuramente essere dotato di elevata manovrabilità, ogni manovra deve, inoltre, essere il più accurata e precisa possibile, motivo per il quale la progettazione del sistema di sterzo richiede particolare attenzione e. Esistono numerosissime tipologie e tecnologie, ognuna di esse caratterizzata da una determinata manovrabilità, facilità di realizzazione, accuratezza e costo.

La progettazione ed il controllo di numerosi veicoli automatici e robot dotati di pneumatici, si basa sul concetto di sterzata cinematica: essa indica il moto del veicolo lungo una curva determinato dal puro rotolamento delle ruote che coincide con la condizione di slittamento nullo tra la ruota ed il terreno.

Quest'ultima è un'ipotesi molto forte, essa, infatti, è valida esclusivamente a bassissime velocità, per esempio nelle manovre di parcheggio in cui si può assumere che le forze laterali sviluppate con il contatto ruota-terreno siano nulle e che esse, quindi, non siano in grado di equilibrare le azioni centrifughe ($\propto V^2$) che in condizioni normali di curvatura agiscono in direzione trasversale rispetto al veicolo.³²

La condizione che rende possibile la sterzata cinematica è la cosiddetta condizione di Ackermann: questa si verifica quando gli assi di tutte le ruote di un veicolo si uniscono in un unico punto attorno al quale ruota l'intero veicolo. Questa condizione si verifica soltanto se gli angoli di sterzo delle ruote dello stesso asse sono differenti, in particolar modo, l'angolo di sterzo della ruota interna alla curva è maggiore di quello esterno.

Nelle condizioni di sterzo cinematiche, quindi, il veicolo ruota attorno ad un unico centro di istantanea rotazione, indicato in figura con la lettera I, il quale è individuato dall'intersezione delle normali ai piani medi delle ruote passanti per i centri di ogni ruota.

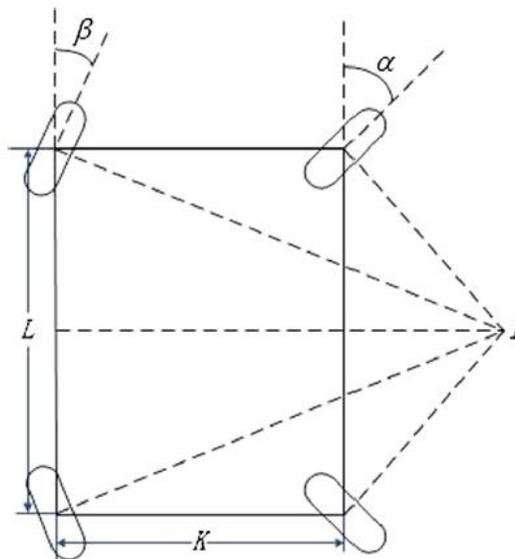


Figura 29: Schema del principio della sterzata di Ackermann³⁷

Ciò che avviene nelle manovre di sterzo, in realtà, si distacca dalle ipotesi fondamentali di sterzata cinematica: il controllo della traiettoria è realizzato grazie alle forze che le ruote applicano sul terreno che sono causate, come già spiegato, dalla deformazione di entrambi i corpi nella zona di contatto. La conseguenza fondamentale è che le ruote di un veicolo lavorano sempre con un certo slittamento e mai in condizioni di puro rotolamento.

Nonostante ciò, la progettazione dei sistemi di sterzo è, spesso, basata sulla condizione di sterzata cinematica.

Le manovre di sterzo possono essere implementate nei seguenti modi:

- Slip steering: sterzata a scorrimento.
Non vi è alcun meccanismo di sterzo: la sterzata avviene quando le ruote o il cingolo di un lato, operano ad una velocità diversa rispetto al lato opposto ed il sistema gira nella direzione del lato più lento, slittando sul terreno. I due lati devono, quindi, essere mossi in maniera indipendente e le ruote o il cingolo dello stesso lato sono di solito bloccati meccanicamente e sincronizzati tra loro.
Con questo sistema di sterzo il veicolo può facilmente cambiare direzione e ciò lo rende, quindi, un meccanismo ad elevata manovrabilità, tuttavia, le capacità di sterzo dipendono dal terreno con cui il veicolo entra in contatto: su superfici poco ruvide, caratterizzate da un basso coefficiente di attrito, la manovra di sterzo diventa poco accurata. La sua semplice realizzazione che si traduce indubbiamente in un costo ristretto, accompagnata da un'elevata mobilità, si scontra, purtroppo, con un'accuratezza veramente bassa che lo rende, quindi, poco consona all'applicazione in studio.
- Articulated steering: sterzata "articolata".
Questo sistema di sterzo si serve di due o più elementi appartenenti al telaio e collegati ad uno dei due assi, che uniti insieme, ruotano grazie all'azione di uno o più attuatori, ottenendo, così, la manovra di sterzo.
Il costo, la complessità del sistema e del controllo sono bassi; tuttavia, la manovrabilità del sistema non è elevata, è possibile, infatti, ottenere traiettorie con raggi di curvatura piuttosto elevati.
- Ackermann steering: due ruote di uno stesso asse ruotano attorno a due diversi assi di sterzo (detti kingpin), ma i loro angoli di sterzo sono comandati da un collegamento meccanico. Il collegamento soddisfa le condizioni di Ackermann: cioè fa sì che le linee perpendicolari ai piani medi delle ruote sterzanti e passanti per il punto di contatto delle ruote con il terreno, convergano entrambe nel centro di istantanea rotazione del veicolo.
È importante, a questo punto, fare una semplice considerazione sul meccanismo di Ackermann: attraverso un collegamento di tipo trapezoidale, come quello riportato nella figura 30, si può solo approssimare la condizione di Ackermann.
- Sterzata di tipo indipendente: 2WD o 4WD.
Le ruote di uno (2WD) o più assi (4WD e superiori) possono ruotare in maniera indipendente, ognuna attorno ad un determinato asse, sotto l'azione di uno o più attuatori. A seconda del tipo di controllo utilizzato è possibile anche soddisfare le condizioni di Ackermann.
A basse velocità (in generale minori di 30 km/h), è possibile orientare le due ruote anteriori e le due ruote posteriori in direzioni opposte ottenendo un raggio di curvatura di gran lunga minore rispetto a tutti gli altri sistemi analizzati precedentemente, in particolar modo la riduzione del

raggio di curvatura ottenuto con un sistema 4WS di questo tipo è minore del 40% circa rispetto a quello ottenuto con un sistema 2WS.

Con questa tipologia di sterzata si ottengono eccellenti manovrabilità ed accuratezza su ogni tipo di terreno, tuttavia i costi e la difficoltà nel controllo sono elevati.³⁸

Numerosi sono i modi in cui è possibile controllare un sistema di sterzo di tipo 4WS, il più utilizzato consiste nel controllare separatamente ogni ruota, controllandola con un motore che può essere inserito direttamente all'interno della ruota oppure in un apposito alloggiamento posto a sbalzo⁹.

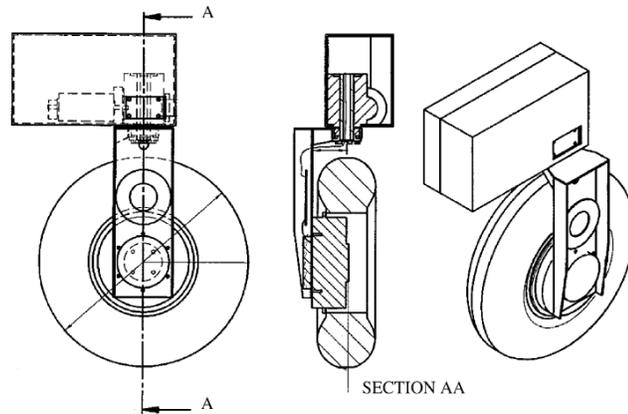


Figura 30: Ruota con motore integrato e modulo di sterzo a sbalzo³⁹

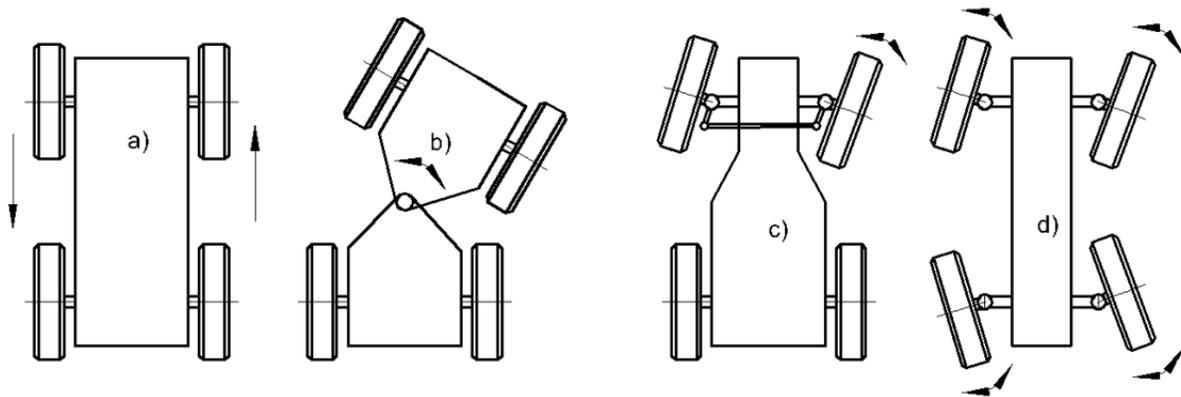


Figura 31: Tipologie di sistemi di sterzo: a) Slip, b) Articolato, c) Ackermann, d) 4WS³⁸

Per l'applicazione in studio, il sistema di sterzo 4WS è la soluzione che meglio soddisfa i requisiti di accuratezza e manovrabilità ed è, inoltre, in grado di ottenere manovre di sterzo con raggi di curvatura piccoli, in modo da poter passare agevolmente tra un filare e l'altro. Il controllo separato di ogni ruota richiede, però, elevati costi e soprattutto diverse strategie di controllo e programmazione.

Si opta, quindi, per una configurazione diversa: vengono realizzati due differenti sistemi di collegamenti meccanici che comandano separatamente le ruote anteriori e le ruote posteriori, in modo tale da assicurare la rotazione dei due gruppi di ruote (anteriori e posteriori) in direzione opposta ed ottenere un sistema con quattro ruote sterzanti e con un meccanismo di sterzo simile a quello riportato in figura 25 c).

L'insieme dei collegamenti che attuano la manovra di sterzo delle due ruote anteriori e posteriori è riportato nelle figure successive:

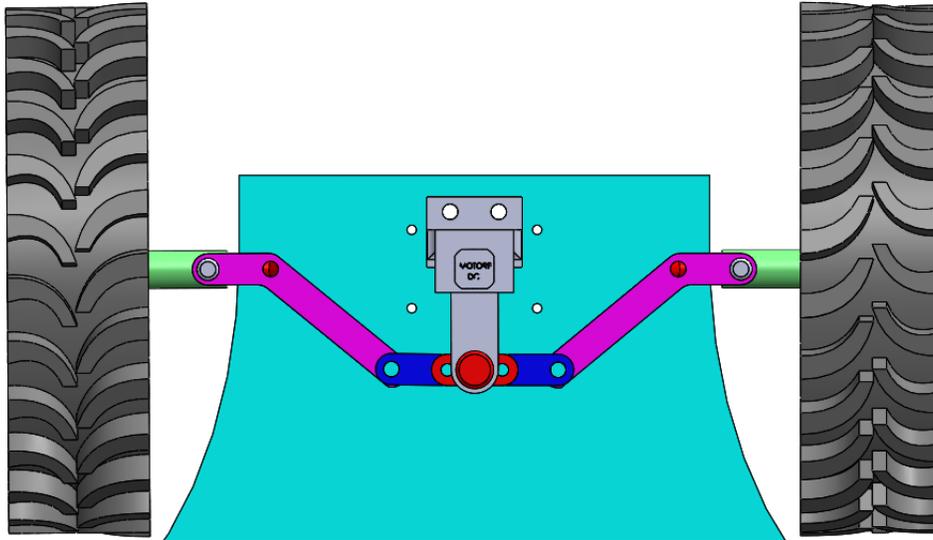


Figura 32: Modello CAD del sistema di sterzo anteriore

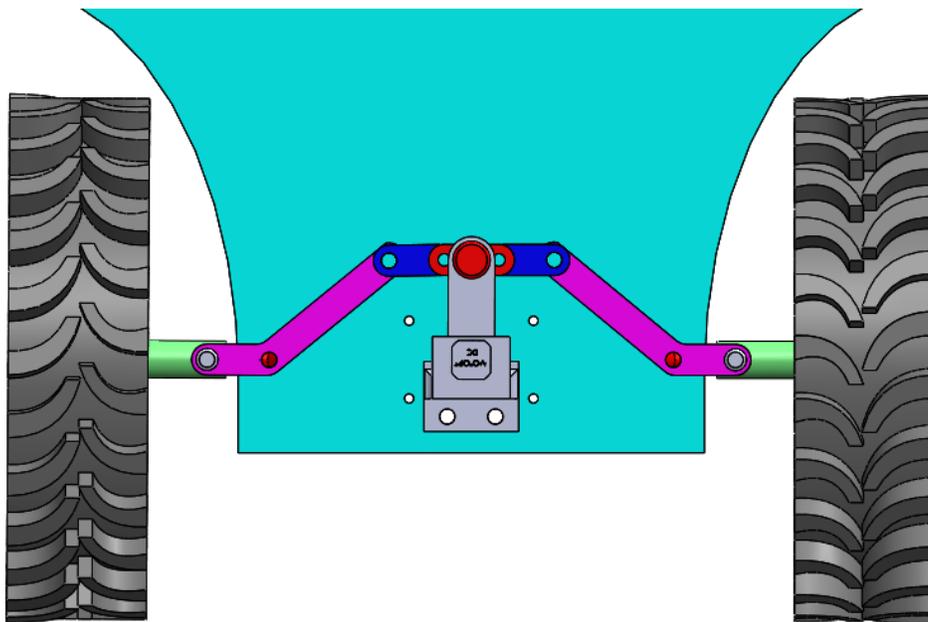


Figura 33: Modello CAD del sistema di sterzo posteriore

Il sistema di attuazione è illustrato nella figura successiva:

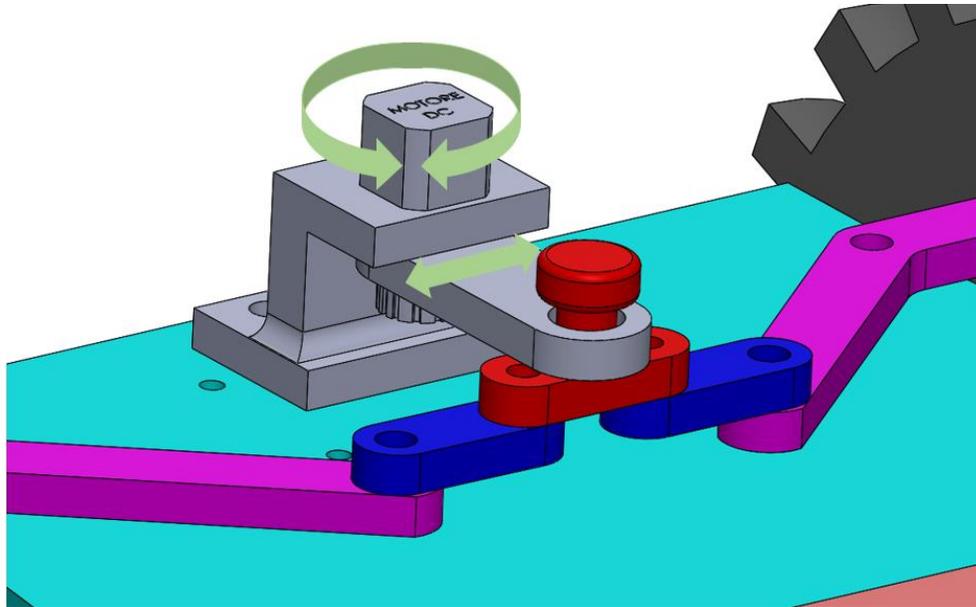


Figura 34: Sistema di attuazione per lo sterzo

Una volta azionato, il motore elettrico DC porta in rotazione il braccio grigio che è collegato con l'asta rossa appartenente al sistema di sterzo; quest'ultima può traslare e ruotare mettendo in moto l'intero sistema di sterzo.

La scelta del numero di aste che compongono ogni sistema di sterzo non è casuale: il sistema di sterzo così realizzato è composto da due differenti aste angolate, unite insieme da altre tre aste (due blu ed una rossa) di uguale lunghezza; queste, unite al braccio motore, formano un sistema articolato ad 1 grado di libertà.

Il collegamento tra le due aste angolate ed il braccio motore ha richiesto particolare attenzione ed è stato utilizzato il software GIM per calcolare correttamente il numero di gradi di libertà delle varie soluzioni proposte.

- La soluzione attuale, propone un collegamento effettuato tramite tre diversi links, in questo modo è assicurato il moto dell'intero sistema che è, quindi, composto da 1 grado di libertà. Il software GIM è anche in grado di tracciare le traiettorie del moto delle varie coppie cinematiche e dei relativi links inseriti nel sistema; come riportato successivamente:

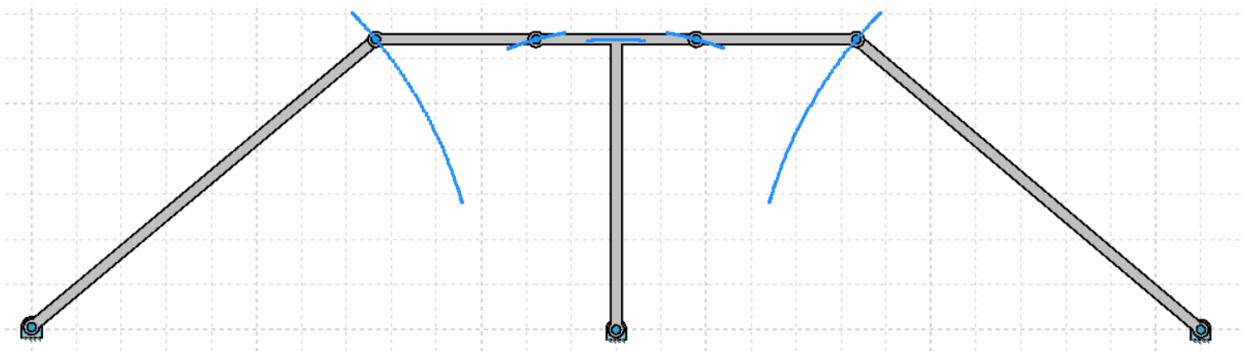


Figura 35: Modellizzazione del collegamento delle aste oblique con software GIM – Soluzione 2

Degrees of Freedom	1
Redundancies	0
Points	8
Elements	7

Figura 36: Calcolo dei gradi di libertà del sistema effettuato dal software GIM

Il collegamento con 3 diversi links risulta, quindi, la soluzione ottimale, sia in termini di fattibilità che in termini di semplicità.

Sono visibili le immagini di una sterzata a sinistra ed una a destra per il sistema di sterzo anteriore:

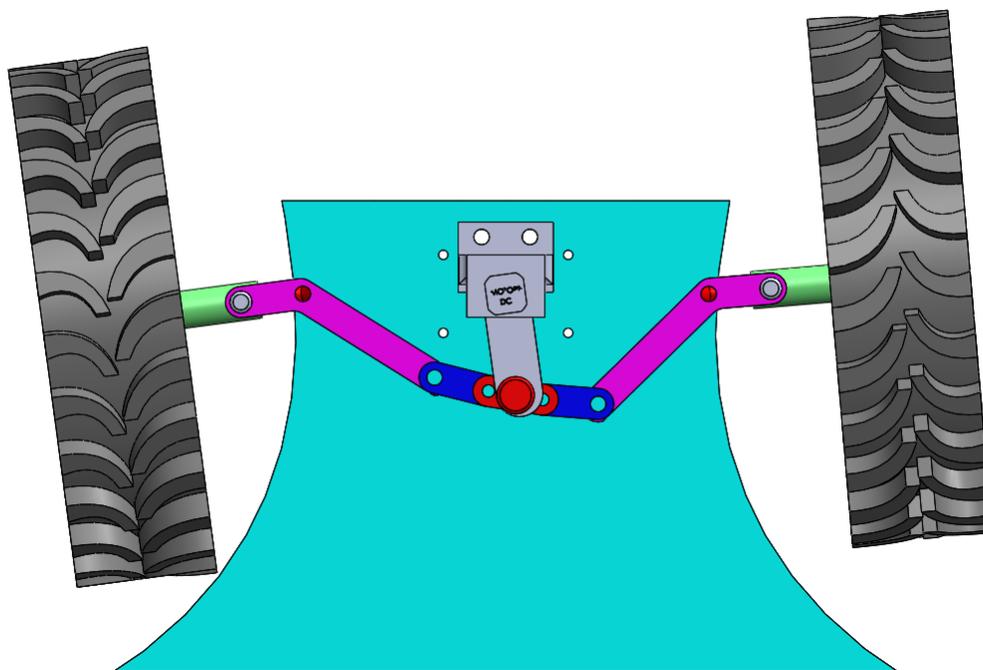


Figura 37: Sterzata a sinistra del sistema di sterzo anteriore

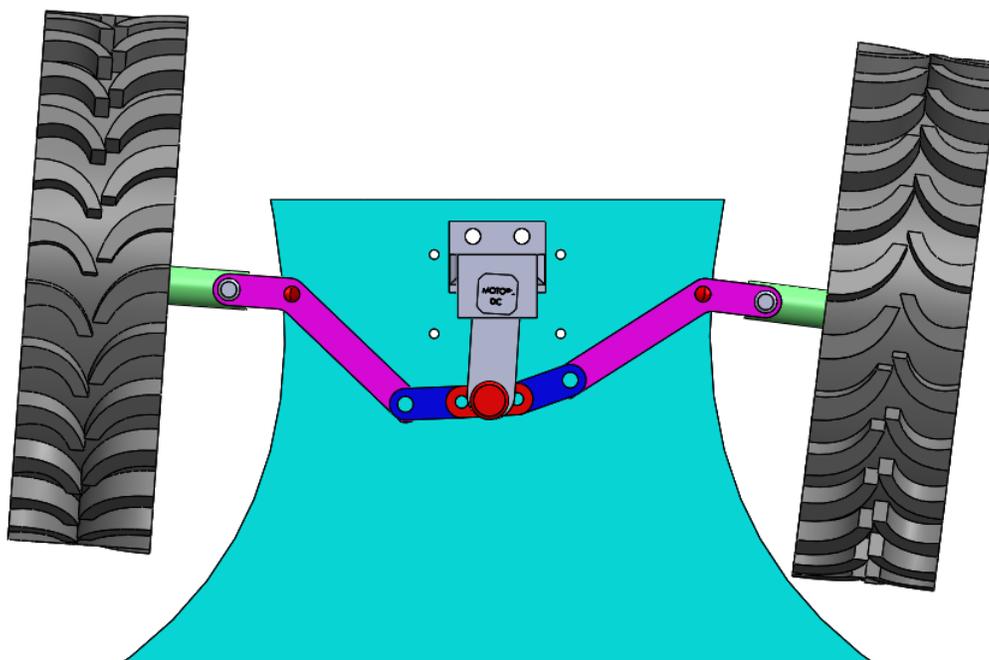


Figura 38: Sterzata a destra del sistema di sterzo anteriore

Stessa cosa per il sistema di sterzo posteriore:

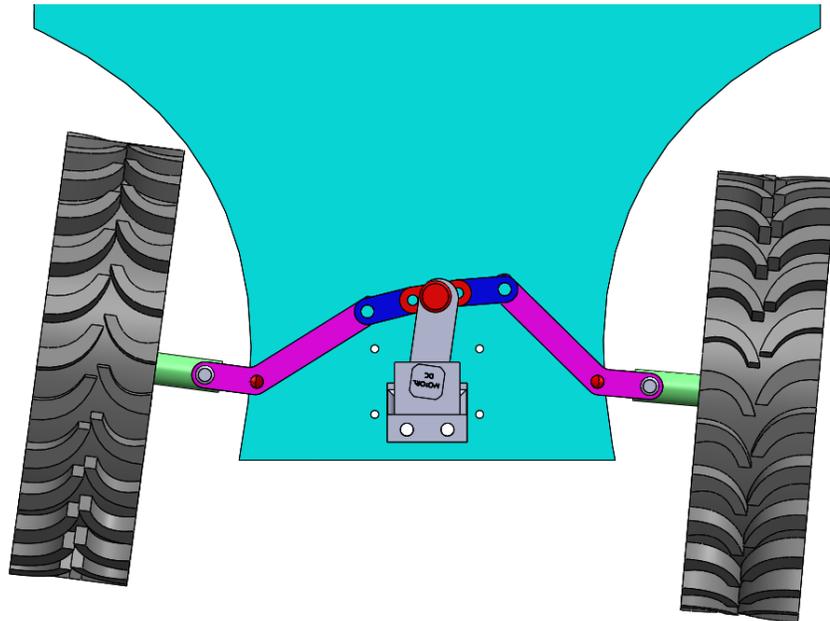


Figura 39: Sterzata a destra del sistema di sterzo posteriore

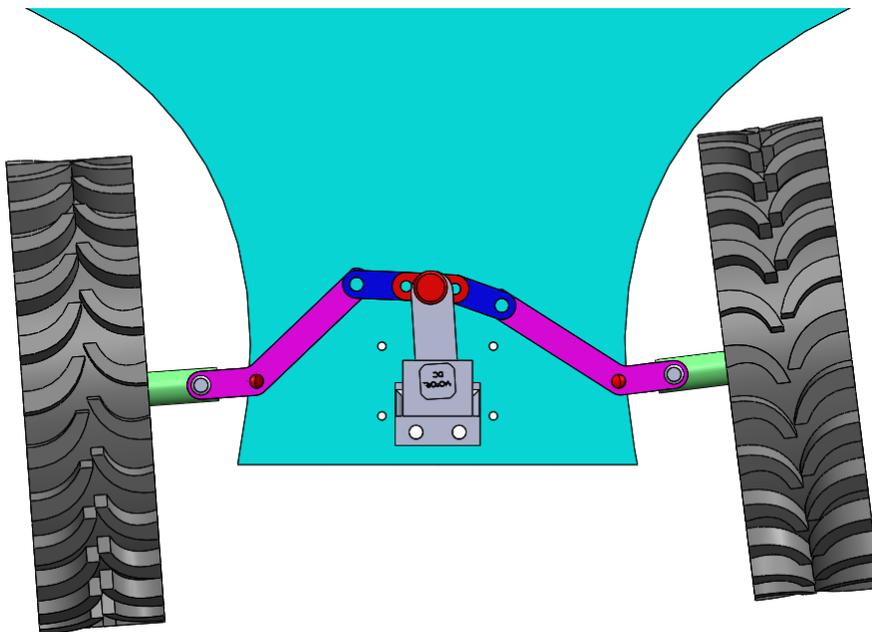


Figura 40: Sterzata a sinistra del sistema di sterzo posteriore

Durante le manovre di sterzo, l'intero sistema 4WS apparirà come segue:

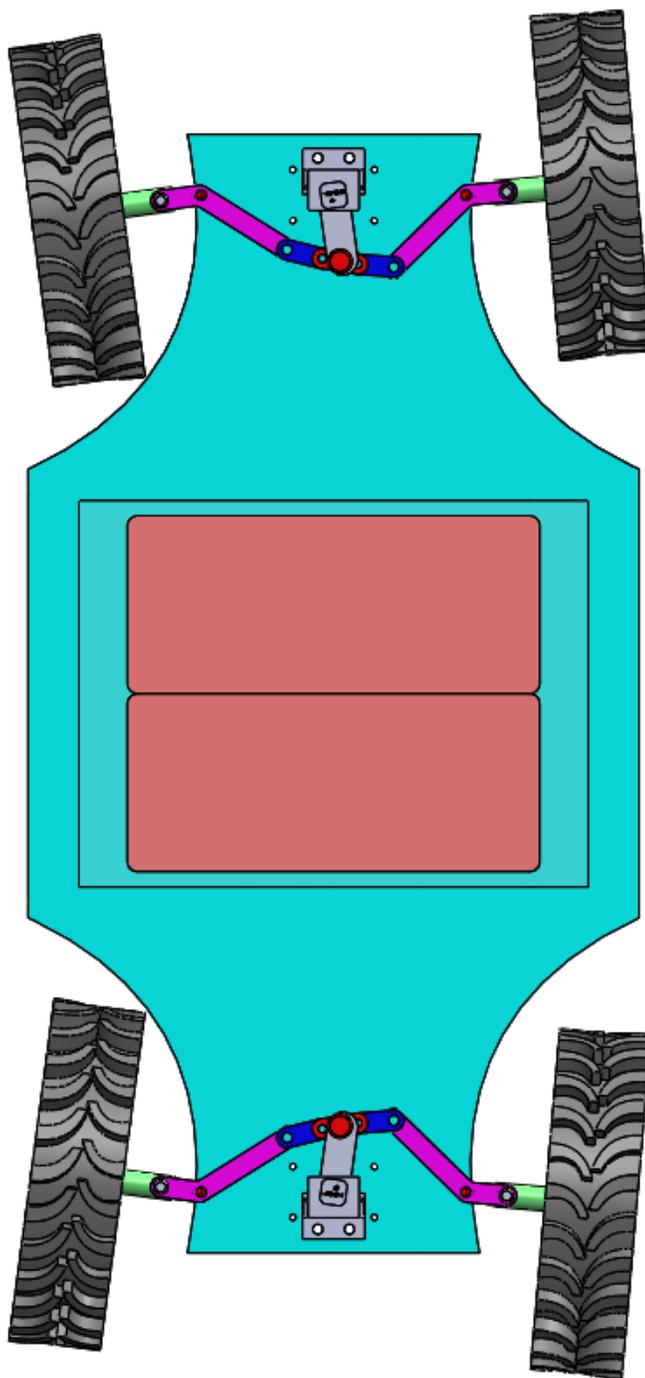


Figura 41: Manovra di sterzo a sinistra del rover

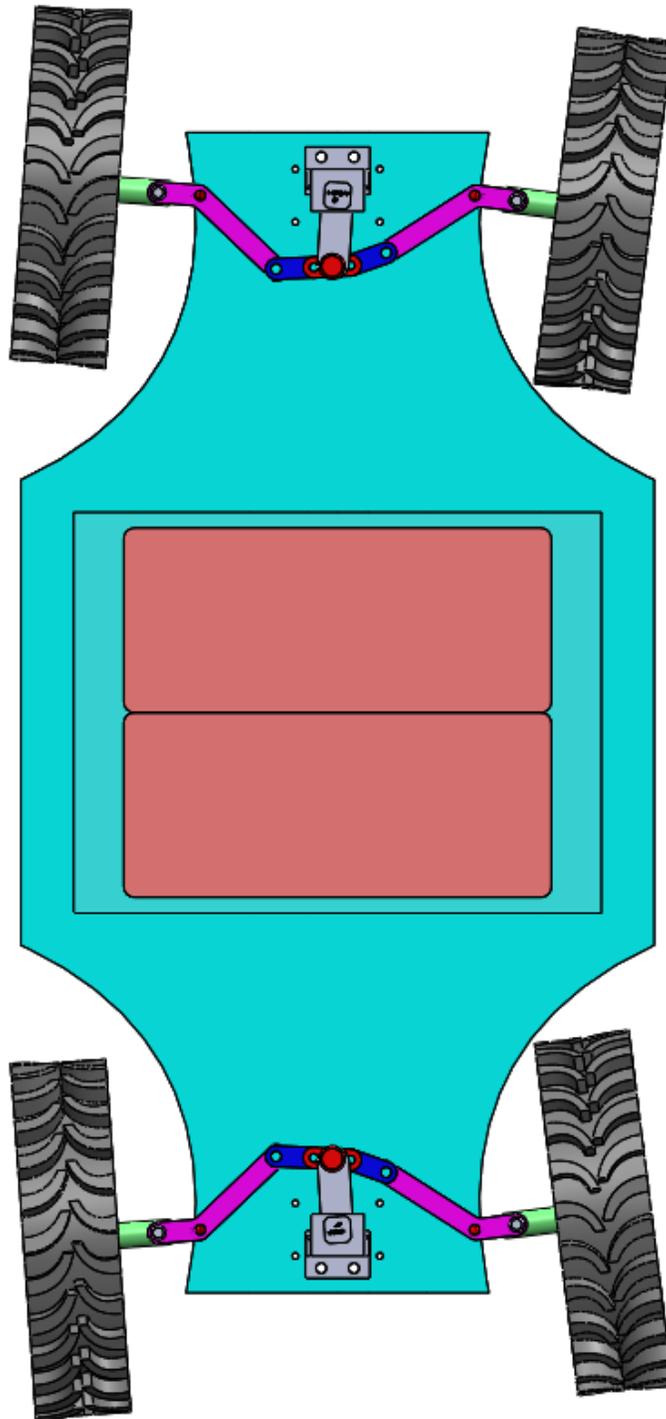


Figura 42: Manovra di sterzo a destra del rover

È importante sottolineare il fatto che, a differenza di quanto accade in un meccanismo di sterzo di Ackermann, le ruote di uno stesso asse ruotano dello stesso angolo, indipendentemente dal fatto che siano interne o esterne alla traiettoria.

Ciò comporta, ovviamente, un distacco da quella che è la teoria di Ackermann, tuttavia la velocità di avanzamento massima del veicolo è sufficientemente piccola da rendere possibile l'applicazione di tutte le teorie semplificative trovate in letteratura che prendono come riferimento la sterzata di tipo cinematico.

4.4.2 Calcolo della coppia necessaria a sterzare

Come visto precedentemente, il sistema di sterzo è un sistema autonomo azionato da due motori elettrici diversi da quelli utilizzati per la propulsione. Uno dei motori verrà fissato sulla parte anteriore del telaio ed azionerà esclusivamente il meccanismo di sterzo anteriore e l'altro, invece, verrà fissato sulla parte posteriore del telaio e verrà utilizzato per azionare il meccanismo di sterzo posteriore.

Prima di procedere con il dimensionamento e la scelta dei motori, è necessario conoscere la coppia necessaria ad azionare il sistema di sterzo che sarà fortemente influenzata dall'entità dell'attrito presente tra pneumatico e suolo ed, ovviamente, dalle dimensioni longitudinali del sistema di sterzo.

Il concetto che sta alla base del calcolo della coppia di sterzo, è che la coppia richiesta per sterzare la ruota del veicolo deve essere maggiore della coppia resistente generata dall'attrito:

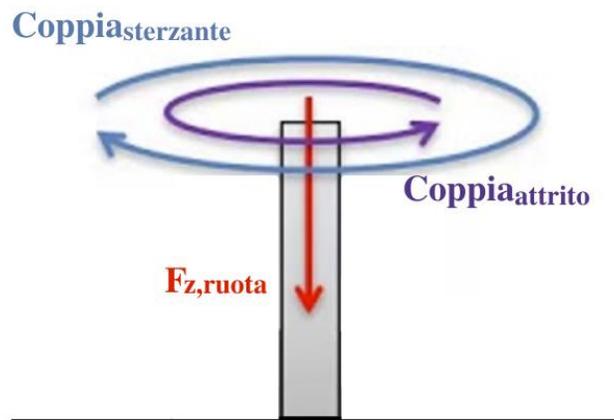


Figura 43: Coppie agenti su una ruota sterzante

In cui:

- $F_{z,ruota} = \mu \cdot g \cdot m_{ruota,F}$, è il carico verticale agente sulla singola ruota;
- $Coppia_{attrito} = F_{z,ruota} \cdot r$, è la coppia dovuta alla forza di aderenza che si oppone alla coppia sterzante.

La dimensione r è un parametro fondamentale per il calcolo della coppia necessaria a sterzare ed è la distanza tra l'asse verticale della ruota e l'asse di sterzo:

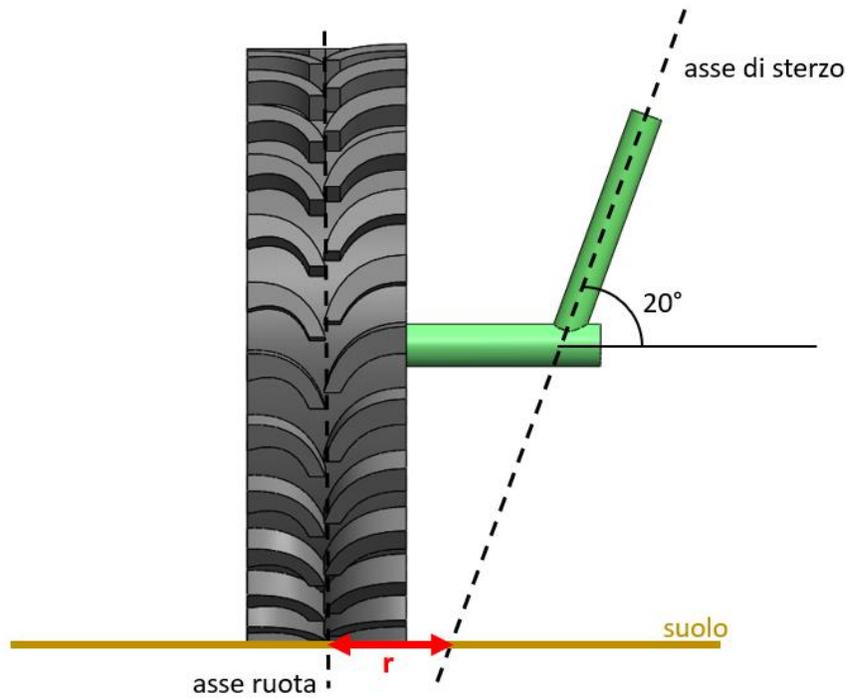


Figura 44: Dimensione r

In una generica manovra di sterzo, la ruota non si muove attorno al proprio asse, ma ruota intorno ad un secondo asse che costituisce l'asse di sterzo; la coppia necessaria a sterzare è, quindi, proporzionale alla distanza tra i due assi: minore è la dimensione r e minore è la coppia di sterzo.

La distanza tra i due assi, però, per una questione di ingombri fisici non può essere troppo piccola: lo pneumatico, infatti, ha bisogno di sufficiente spazio per ruotare senza entrare in contatto con il telaio o altre parti fissate ad esso.

Il compromesso tra una distanza r non troppo elevata ed il rispetto degli ingombri di uno pneumatico in rotazione, viene raggiunto inclinando l'asse di sterzo di un opportuno angolo come riportato nella figura precedente.

Un'ulteriore strategia consiste nell'ottimizzare la forma del telaio in modo tale da ricavare un'apposita zona in cui la ruota può liberamente sterzare, riducendo le dimensioni laterali del sistema di sterzo, come illustrato nella figura successiva:

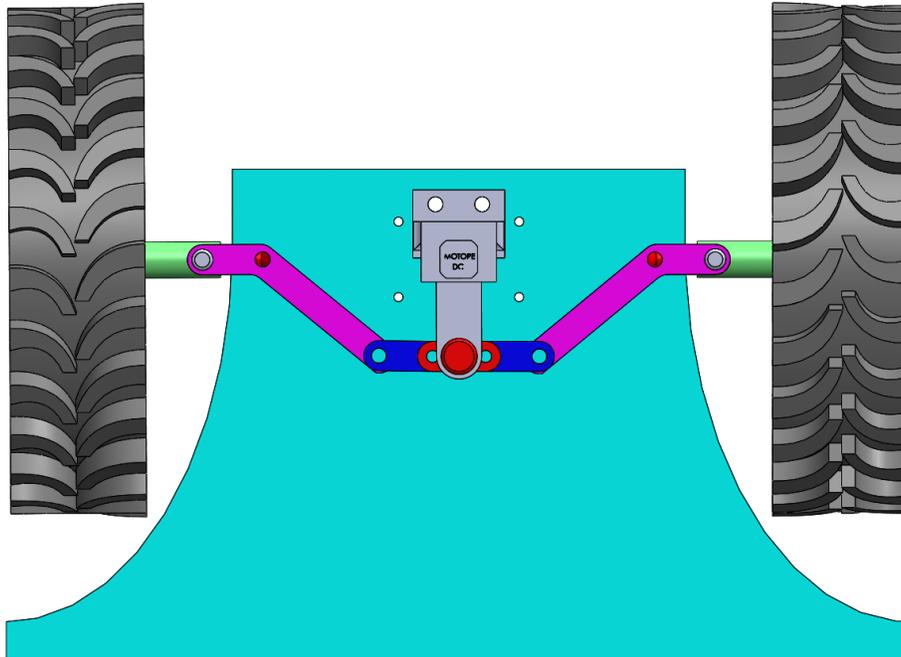


Figura 45: Forma ottimizzata del telaio

A questo punto è possibile calcolare la coppia da fornire alla ruota per sterzare, si assumono:

- $m_{ruota,F} = 50 \text{ kg}$, il veicolo è completamente simmetrico;
- $\mu = 0,45$ (suolo medio/morbido) ;
- $r = 0,126 \text{ m}$

Si ottengono:

$$F_{z,ruota} = 221 \text{ N}$$

$$Coppia_{attrito} = 28 \text{ Nm}$$

Si procede, quindi, con il calcolo della coppia motrice che il motore del sistema di sterzo deve erogare per rendere possibile la manovra di sterzo.

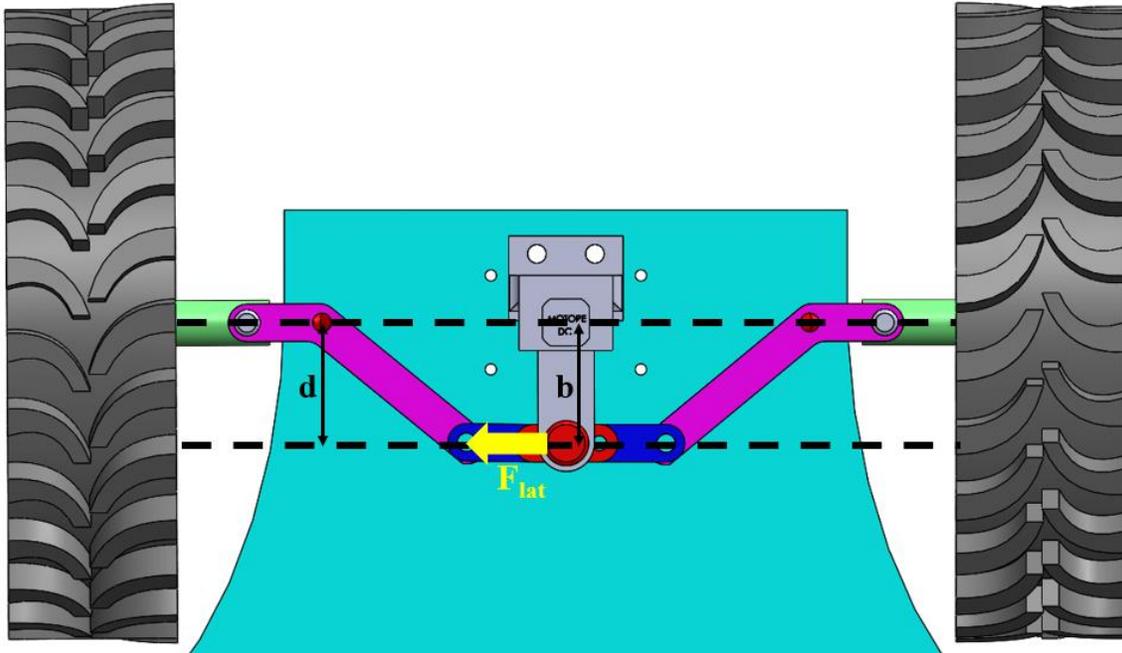


Figura 46: Forza laterale esercitata dal sistema di sterzo

Per rendere possibile la manovra di sterzo, la coppia resistente di attrito dovuta alla forza di aderenza è pari alla coppia esercitata dall'asta di sterzo sulla ruota:

$$F_{lat} \cdot d = C_{attrito}$$

$$F_{lat} = \frac{28 \text{ Nm}}{0.077 \text{ m}} = 363 \text{ N}$$

La forza che l'asta deve applicare su entrambe le ruote è pari al doppio di F_{lat} .

Si ottiene la coppia che il motore deve applicare come:

$$C_M = 2 \cdot F_{lat} \cdot b = 45 \text{ Nm}$$

Questa è la coppia necessaria alla rotazione delle due ruote appartenenti allo stesso asse attorno all'asse di sterzo.

4.4.3 Dimensionamento motore di sterzo

Una volta nota la coppia che ogni motore dei due differenti sistemi di sterzo deve applicare, si può procedere con il dimensionamento del motore di sterzo.

L'asta di sterzo ruota di $\pm 30^\circ$ in un tempo t pari a 2 s; si assume, inoltre, che i transitori di accelerazione siano minori di 200ms:

$$\omega_p = \frac{30^\circ}{2 \text{ s}} = \frac{15^\circ}{\text{s}} = \frac{0,262 \text{ rad}}{\text{s}}$$

$$a_p = \frac{\omega_p}{200 \text{ ms}} = \frac{1,31 \text{ rad}}{\text{s}^2}$$

Le caratteristiche del motore di sterzo sono, quindi:

- Velocità di rotazione di almeno $2,5 \text{ rpm}$;
- Coppia erogata di almeno 45 Nm ;
- Potenza erogata di almeno 120 W .

La scelta ricade, anche in questo caso, su un motoriduttore elettrico DC di tipo brushless, alimentato a 12 V.

È importante sottolineare che ai motori adibiti alla movimentazione dei due sistemi di sterzo, non verrà sicuramente richiesto un esercizio continuativo durante l'intero funzionamento del drone (6 ore), ma esclusivamente nelle manovre di sterzo necessarie per passare da un filare all'altro ed in quelle utili per evitare eventuali ostacoli.

Per questo motivo, per l'alimentazione di entrambi i motori di sterzo non sono necessarie altre batterie in quanto quelle utilizzate per il sistema di propulsione hanno a disposizione sufficiente autonomia anche per alimentare i due sistemi di sterzo.

4.4.4 Calcolo del raggio di curvatura

La specifica principale che il sistema di sterzo deve soddisfare consiste nel rendere possibili manovre di sterzata caratterizzate da un raggio di curvatura ridotto.

Il raggio di curvatura è semplicemente il raggio della traiettoria (assimilabile ad una parte di circonferenza) che il veicolo compie durante una sterzata. Il calcolo avviene considerando la distanza tra il centro di massa del veicolo C ed il centro O della circonferenza descritta dal veicolo stesso, come mostrato in figura:

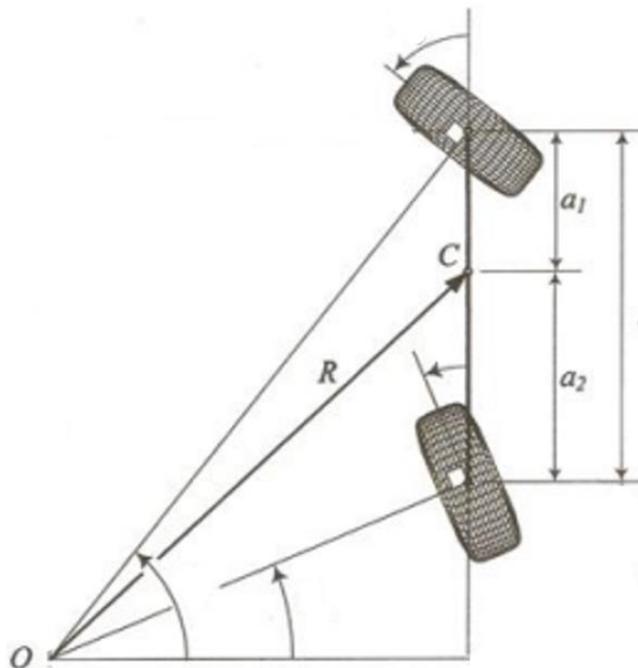


Figura 47: Raggio di curvatura di un veicolo

Per l'analisi della manovra di sterzo e, conseguentemente, per il calcolo del raggio di curvatura, si fa riferimento ad un modello semplificato detto modello a bicicletta o single track model.

Il modello che viene presentato in seguito si basa su una serie di ipotesi semplificative utili per far riferimento ad una condizione di impiego in cui il veicolo abbia il minor numero di movimenti apprezzabili ma sia comunque capace di curvare.

Si ipotizza, inizialmente, che il veicolo si muova su una strada piana ed orizzontale con una velocità di avanzamento v costante; in questo modo vengono trascurati i moti di scuotimento (moto lungo l'asse verticale) e di beccheggio (rotazione attorno all'asse orizzontale).

Trascurando anche le inerzie relative al rollio si assume indirettamente che il veicolo percorra curve a raggi relativamente ampi (lunghezza veicolo molto minore del raggio di curvatura) con una velocità bassa. L'aver trascurato i moti di beccheggio, di rollio e di scuotimento implica che il veicolo si muova con un moto esclusivamente piano.

Le ipotesi adottate vengono di seguito sintetizzate:

- Il veicolo si muove su un piano orizzontale (non sono presenti pendenze trasversali e longitudinali della strada);
- Le ruote di ciascun assale sono condensate in un'unica ruota equivalente;
- La velocità del veicolo V è imposta costante;
- Gli angoli di sterzo, deriva ed assetto sono piccoli: $\alpha_F, \alpha_R, \delta \rightarrow 0$;
- Il raggio di curvatura della traiettoria è superiore alle dimensioni della vettura: $R \gg l$;
- Si trascurano i trasferimenti di carico.

Ci si pone, inoltre, nelle condizioni di sterzata cinematica che, come riportato prima, implicano che le ruote siano nelle condizioni di puro rotolamento: $\alpha = 0 \rightarrow$ forze laterali nulle.

4.4.4.1 Approccio grafico

Applicando tutte le ipotesi del modello a bicicletta su un veicolo con sistema di sterzo di tipo 4WS e con rotazioni opposte degli assali, si ottiene il seguente schema:

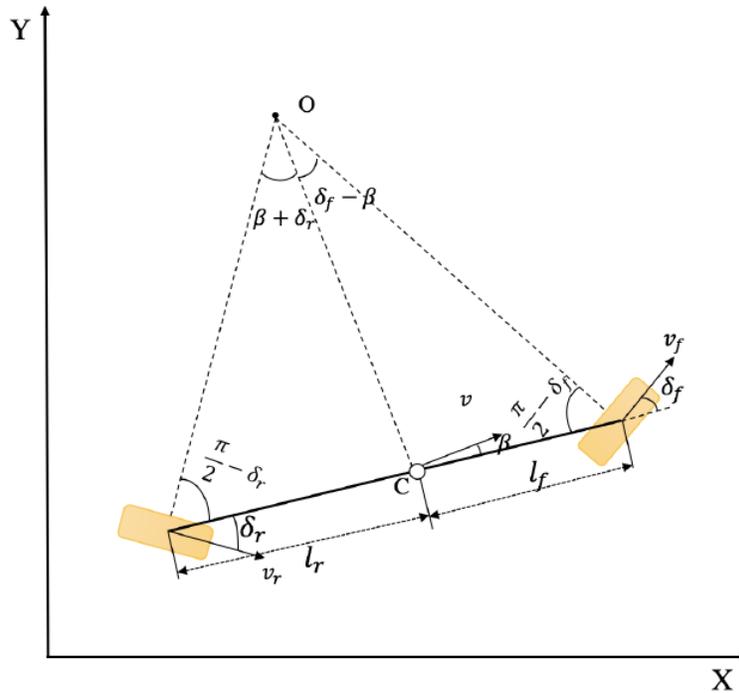


Figura 48: Modello a bicicletta di un veicolo 4WS⁴⁰

In cui:

- δ_f, δ_r : angoli di sterzo delle ruote anteriori e posteriori;
- v_f, v_r : velocità di traslazione delle ruote anteriori e posteriori;
- β : angolo di assetto
- l_f, l_r : semipassi anteriore e posteriore;
- C : centro di massa del veicolo.

Trascurando l'effetto della velocità, il raggio di curvatura può essere calcolato in maniera molto semplice con un approccio grafico.

Applicando ripetutamente il teorema dei seni si ottiene:

$$\frac{|OC|}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \delta_f\right)} = \frac{l_f}{\sin(\delta_f - \beta)}$$

$$\frac{|OC|}{\sin\left(\frac{\pi}{2} + \delta_f\right)} = \frac{l_r}{\sin(\beta - \delta_r)}$$

Combinando le due equazioni precedenti, si ottiene:

$$\tan\beta = \frac{l_r \cdot \tan\delta_f + l_f \tan\delta_r}{l_r + l_f}$$

$$\rho = \frac{1}{R} = \frac{1}{OC} = \frac{\sin(\delta_f + \beta)}{l_f \cos(\delta_f)}$$

Assumendo i valori di:

- $l_f = l_r = 0,5 \text{ m}$
- $\delta_f = 8^\circ$
- $\delta_r = -5,3^\circ$

Si ottengono:

- $\beta \approx 1,5^\circ$
- $R \approx 3 \text{ m}$

L'approccio di tipo grafico è sicuramente semplice ed intuitivo, tuttavia esso semplifica di molto un modello che è già di per sé estremamente semplificato; si, prosegue, quindi, con un approccio di tipo dinamico.

4.4.4.2 Approccio dinamico

L'approccio dinamico tiene conto delle forze che agiscono su un veicolo in moto lungo una traiettoria curva percorsa a velocità costante u .

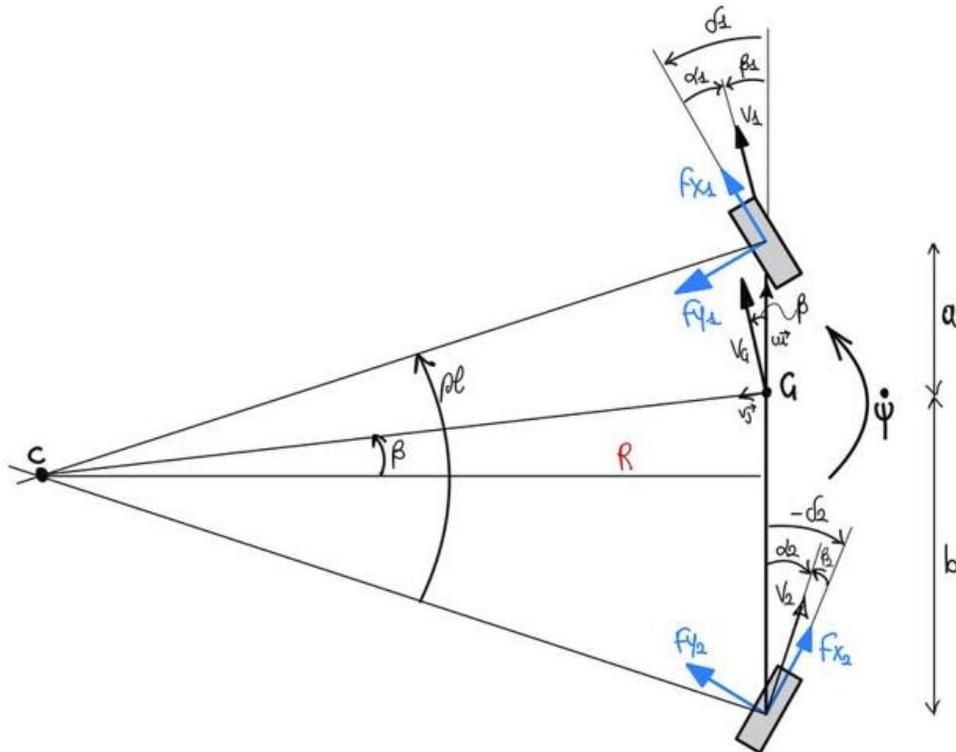


Figura 49: Modello a bicicletta dinamico di un veicolo 4WS

Da un'analisi cinematica del veicolo, tenendo conto che per angoli di sterzo minori di 15° si può scrivere $\cos\delta \approx 1$ e $\sin\delta \approx \delta$, si giunge alla scrittura delle seguenti equazioni:

$$m(\dot{u} - vr) = F_{x1} + F_{x2} - F_y\delta_1 - F_y\delta_2 - \frac{1}{2}\rho SC_x u^2$$

$$m(\dot{v} + ur) = F_{y1} + F_{y2} + F_{x1}\delta_1 - F_{x2}\delta_2$$

$$J\dot{r} = F_{y1}a - F_{y2}b + F_{x1}a\delta_1 - F_{x2}b\delta_2$$

In cui:

- $r = \dot{\psi}$ velocità angolare del veicolo;
- $v = \beta u$;
- F_y è la forza laterale che nasce dal contatto ruota-terreno, in questa trattazione la forza laterale ha un andamento lineare ed assume la forma $F_y = C \cdot \alpha$ in cui C è la rigidezza a scorrimento dello pneumatico (coefficiente che dipende dalla rigidezza del battistrada e dalle dimensioni dell'impronta);
- J è l'inerzia totale del veicolo di massa m .

Da semplici considerazioni geometriche e, ricordando la relazione $F_y = C \cdot \alpha$, si ottengono le equazioni di congruenza:

$$F_{y1} = C_1\alpha_1 = C_1 \left(\delta_1 - \frac{v + ra}{u} \right)$$

$$F_{y2} = C_2\alpha_2 = C_2 \left(\delta_2 - \frac{v - rb}{u} \right)$$

Unendo le precedenti equazioni e trascurando i termini moltiplicati per gli angoli di sterzo, in quanto piccoli, si ottiene:

$$\dot{\beta} = \left(\frac{-C_1 - C_2}{mV} \right) \beta + \left(\frac{-C_1a - C_2b - mV^2}{mV^2} \right) \dot{\psi} + \frac{-C_1\delta_1 - C_2\delta_2}{mV}$$

$$\dot{\psi} = \left(\frac{-C_1a + C_2b}{J} \right) \beta + \left(\frac{-C_1a^2 - C_2b^2}{JV} \right) \dot{\psi} + \frac{(-C_1a)\delta_1 - (C_2b)\delta_2}{J}$$

A questo punto è possibile generare lo spazio degli stati:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu(t) \\ y = Cx + Du(t) \end{cases}$$

In cui:

- $x = \begin{bmatrix} \beta \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}$ vettore delle variabili di stato;
- $u(t) = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{bmatrix}$ vettore degli ingressi;
- $y = \begin{bmatrix} \beta \\ \dot{\psi} \\ \rho \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ a_y \end{bmatrix}$ vettore delle uscite;

$$\bullet A = \begin{bmatrix} \frac{-C_1 - C_2}{mV} & \frac{-C_1 a - C_2 b - mV^2}{mV^2} \\ \frac{-C_1 a + C_2 b}{J} & \frac{-C_1 a^2 - C_2 b^2}{JV} \end{bmatrix};$$

$$\bullet B = \begin{bmatrix} \frac{C_1}{mV} & \frac{C_2}{mV} \\ \frac{C_1 a}{J} & \frac{-C_2 b}{J} \end{bmatrix};$$

$$\bullet C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ \frac{-C_1 - C_2}{mV} & \frac{-C_1 a + C_2 b}{mV^3} \\ -1 & -\frac{a}{V} \\ -1 & \frac{b}{V} \\ \frac{-C_1 - C_2}{m} & \frac{-C_1 a + C_2 b}{mV} \end{bmatrix};$$

$$\bullet D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{C_1}{mV^2} & \frac{C_2}{mV^2} \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ \frac{C_1}{m} & \frac{C_2}{m} \end{bmatrix}.$$

Il sistema viene risolto tramite software Matlab-Simulink con i seguenti dati:

- $m = 200$ kg;
- $a = b = 0,5$ m;
- $V = 1,4$ m/s;
- $C_1 = C_2$ ricavati dai dati dello pneumatico;
- δ_1, δ_2 inseriti manualmente dall'utente.

Vengono riportati il modello Simulink utilizzato ed i risultati ottenuti con vari angoli di sterzo.

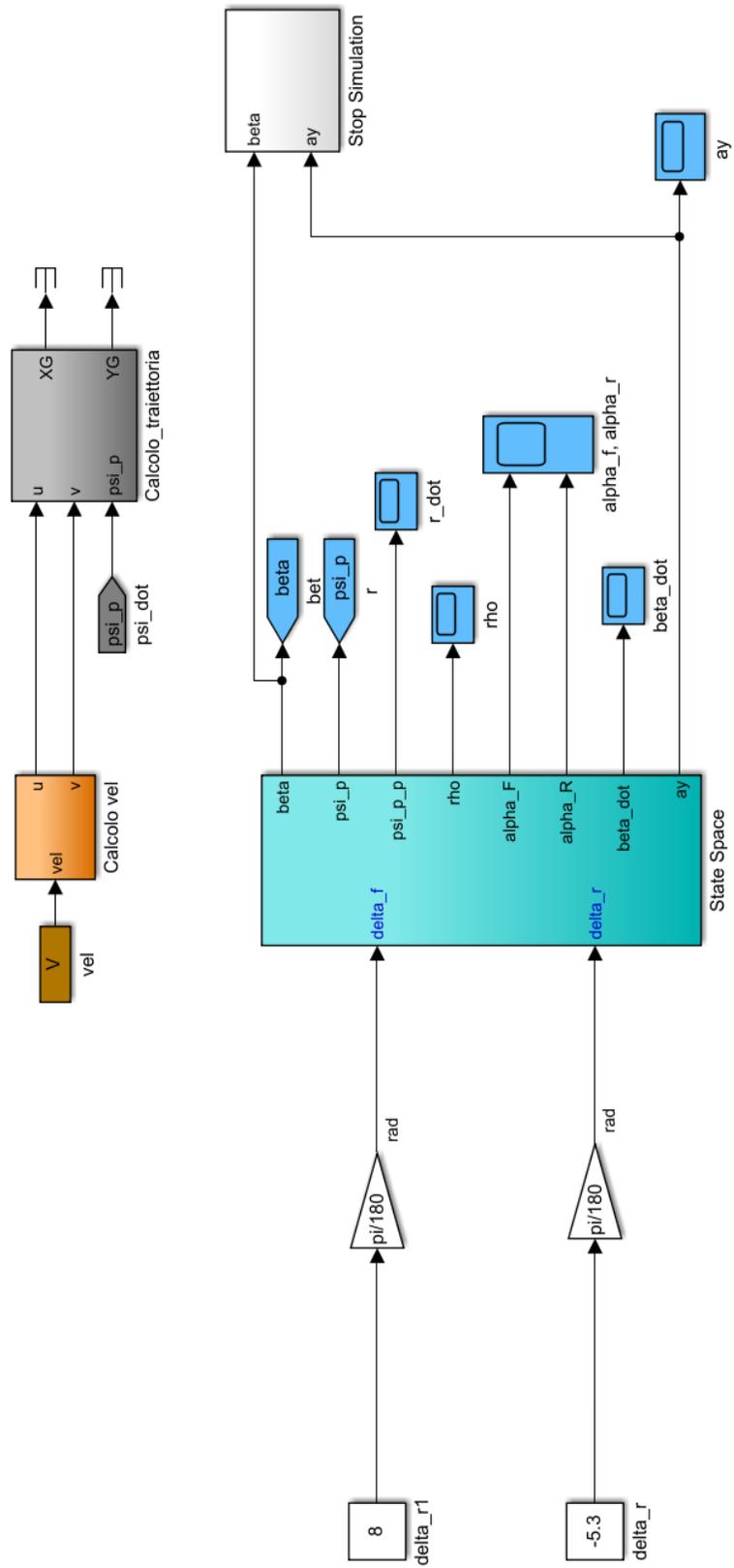


Figura 50: Modello Simulink per approccio dinamico

Imponendo alle ruote anteriori ed a quelle posteriori gli stessi angoli utilizzati nell'approccio grafico ($\delta_f = 8^\circ$ $\delta_r = -5,3^\circ$), come previsto, nel caso in esame si ottiene un raggio di curvatura maggiore (3.6 m) rispetto al raggio calcolato graficamente (3 m).

Il modello dinamico è, ovviamente, più preciso e più affidabile in quanto, anche se tiene conto di numerose semplificazioni, non trascura gli effetti della velocità e, soprattutto, delle forze che agiscono sul veicolo che, come dimostrato, influenzano la traiettoria percorsa dal veicolo stesso.

La traiettoria seguita dal centro di massa è riportata nella figura successiva.

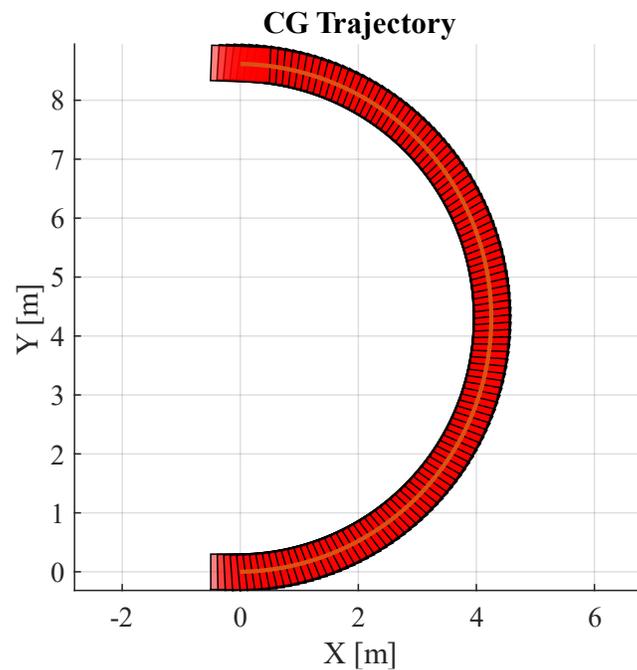


Figura 51: Traiettoria del centro di massa con angoli di sterzo dell'approccio grafico

È necessario, quindi, aumentare leggermente il valore degli angoli di sterzo per ottenere un raggio di curvatura pari a circa 3 m; infatti, con

- $\delta_f = 10^\circ$
- $\delta_r = -7^\circ$

Si ottiene un raggio di curvatura pari a 3 m ed il veicolo percorre la traiettoria riportata successivamente.

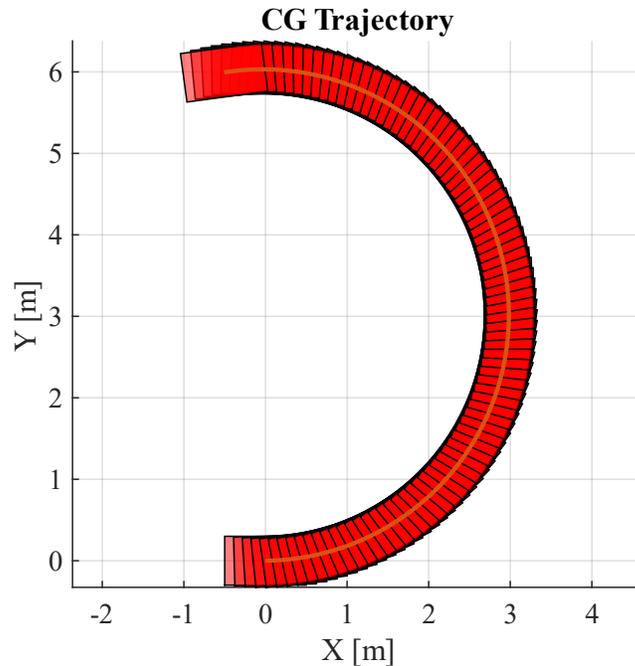


Figura 52: Traiettorie del centro di massa

4.5 Sensori

La sensoristica con la quale il drone è equipaggiato deve consentire:

- Una navigazione precisa e corretta;
- Il corretto monitoraggio dello stato delle colture.

Per quanto riguarda la navigazione sono necessari:

- Un'antenna per il GPS (rover mobile);
- Due sensori LiDAR 2D (o 3D) con un angolo di apertura di almeno 180° da posizionare uno sulla parte anteriore ed uno sulla parte posteriore della box prevista per l'alloggio dei sensori.

Per il monitoraggio sono, invece, previsti:

- Una stereo camera con percezione della profondità a lungo raggio che combinata con l'intelligenza artificiale riesce a percepire l'ambiente in 3D con un campo visivo grandangolare molto ampio (fino a 140°);
- Due sensori radiometrici (uno per lato) per valutare lo stato nutrizionale delle viti.

È possibile valutare la potenza necessaria all'alimentazione contemporanea di tutti i sensori, partendo dai loro dati di fabbrica:

SENSORE	CONSUMO
Antenna GPS RTK	5 W
Sensori LiDAR 3D	26 W
Stereo camera	2 W
Sensore radiometrico	0,5 W
TOTALE	≈ 35 W

Tabella 6: Potenza richiesta dai sensori

Ogni sensore può essere alimentato con una tensione massima pari a 5 V, di conseguenza si è scelta una batteria agli ioni di Litio con chimica LFP che, a sua volta, è alimentata da un pannello fotovoltaico accessorio, secondo lo schema seguente:



Figura 53: Schema collegamento alimentazione sensori

Il tutto è alloggiato in un'apposita box posta nella parte superiore del drone, come verrà mostrato meglio nei capitoli successivi.

Il pannello fotovoltaico selezionato ha delle dimensioni tali da occupare esclusivamente metà della box, in modo tale da consentire il corretto posizionamento di ogni sensore. Con una larghezza di 500 mm ed una lunghezza di 300 mm, il pannello fornisce una potenza pari a 20 W con un rendimento dell'80% sufficiente ad alimentare buona parte dei sensori.

A causa dell'elevato spazio presente nella box (circa 0,3 m²), è sicuramente possibile aggiungere altre tipologie di sensori per il monitoraggio, a seconda delle specifiche che si vogliono osservare e tenere sotto controllo oppure installare un piccolo braccio meccanico che consenta lo svolgimento di semplici operazioni manuali.

4.6 Pneumatici

La scelta del tipo di pneumatico più consono alla lavorazione dei vigneti è uno dei momenti più critici della progettazione del drone. È fondamentale, in ogni condizione di marcia e di lavorazione, evitare danni alle radici ed alla superficie del terreno al fine di proteggere le colture sia nel breve termine che nel lungo termine.

A tal fine si può introdurre il concetto di galleggiabilità di uno pneumatico (o di un cingolo) che indica la capacità di non affondare nel terreno riducendo, così, al minimo la pressione specifica al suolo, anche con carichi elevati: maggior galleggiamento implica, quindi, minore compattazione del terreno con conseguente riduzione dei danni alle colture.

I moderni materiali polimerici, permettono lo sviluppo di nuove tecnologie, come quella presentata da Trelleborg⁴¹ che offre una tipologia di pneumatici pensata esclusivamente per frutteti e vigneti. Questa permette la riduzione del peso e degli ingombri, l'aumento delle capacità di trazione e, soprattutto, rendono possibile una notevole diminuzione della compattazione del terreno.

L'innovazione principale è da ricercare, sicuramente, nel nuovo design ad "Omega" Ω che, combinata con una bassa pressione di gonfiaggio, consente elevata flessibilità ed una maggiore impronta di contatto con conseguente riduzione del compattamento del suolo.

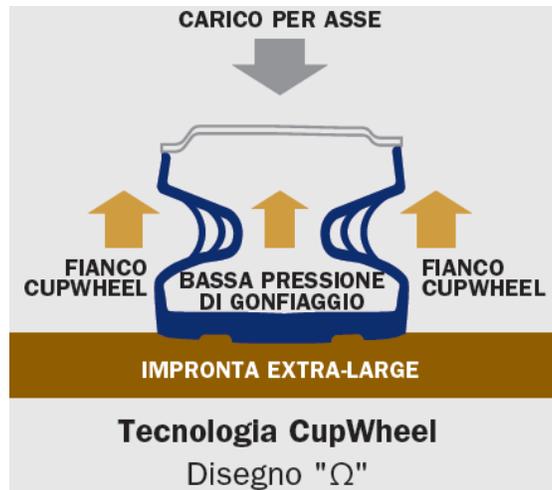


Figura 54: Tecnologia pneumatici Trelleborg

Gli pneumatici selezionati per questo progetto hanno le seguenti caratteristiche:

- Diametro totale 305 mm;
- Larghezza 100 mm;
- Cerchio R4 (diametro \approx 101 mm).

4.7 Modello completo

Il modello completo prevede, oltre al telaio, agli pneumatici, al sistema di sterzo ed ai motori sopra riportati, un apposito alloggiamento per le batterie e l'elettronica di controllo ricavato all'interno del telaio stesso, come riportato nelle figure successive; le cui dimensioni sono:

- Lunghezza: 500 mm;
- Larghezza: 380 mm;
- Altezza: 160 mm.

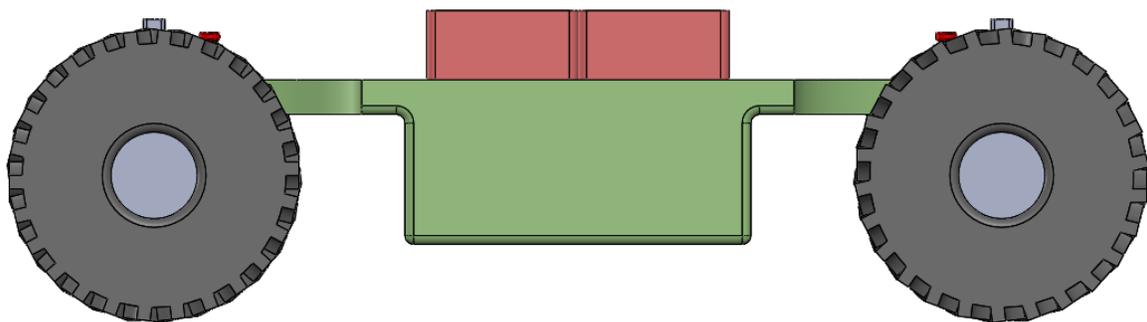


Figura 55: Alloggio per batterie ed elettronica di controllo – 1

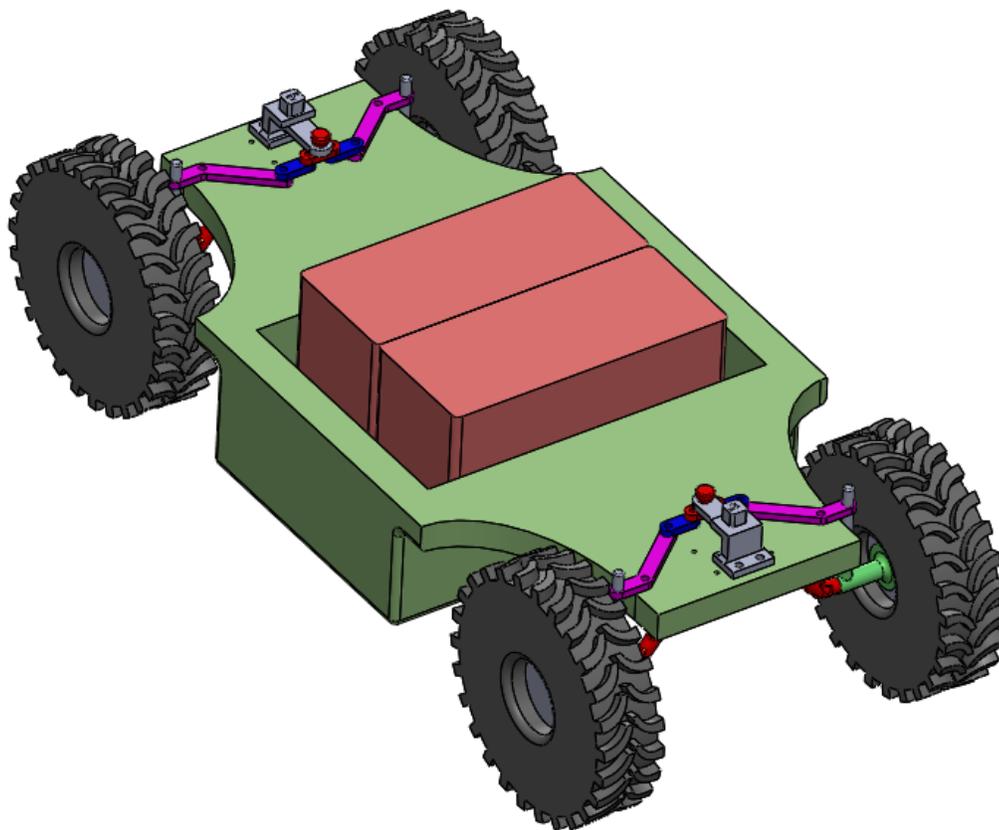


Figura 56: Alloggio per batterie ed elettronica di controllo - 2

La copertura del drone è provvista di un'area dedicata all'installazione del pannello fotovoltaico e di appositi attacchi e siti per i sensori selezionati.

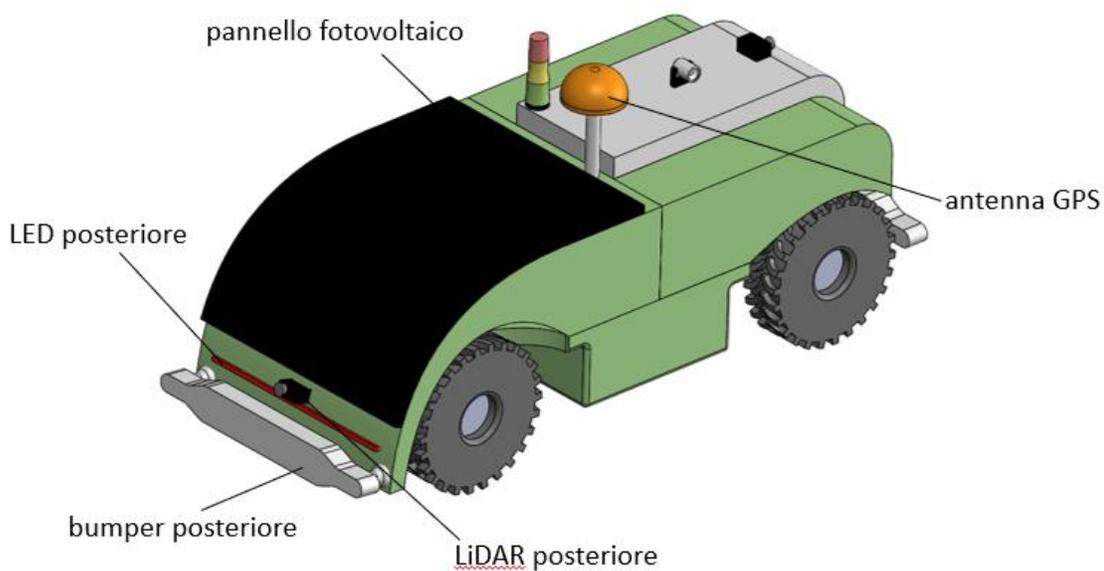


Figura 57: Vista posteriore della copertura del drone

Nella parte posteriore sono, infatti, visibili:

- Il pannello fotovoltaico;
- Uno dei due sensori LiDAR;
- La striscia LED rossa di posizione;
- Il bumper posteriore;
- L'antenna GPS-RTK;

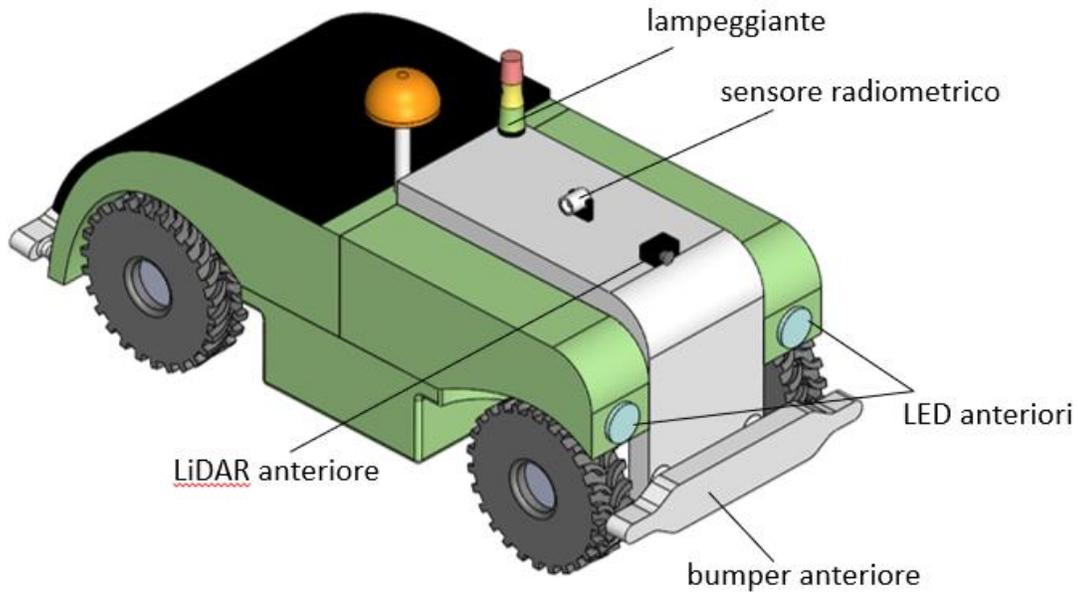


Figura 58: Vista frontale della copertura del drone

Nella parte anteriore sono, invece, visibili:

- Il bumper anteriore;
- I LED di posizione;
- Uno dei due sensori LiDAR;
- Il sensore radiometrico;
- Un lampeggiante.

Si riportano, di seguito, immagini del modello CAD del rover completo ed una tabella che riassume le sue specifiche.

CARATTERISTICHE	
Lunghezza telaio	1000 mm
Lunghezza totale	1300 mm
Altezza totale	650 mm
Larghezza totale	600 mm
Larghezza massima telaio	600 mm
Larghezza minima telaio	300 mm
Massa totale	200 kg

Tabella 7: Caratteristiche del rover

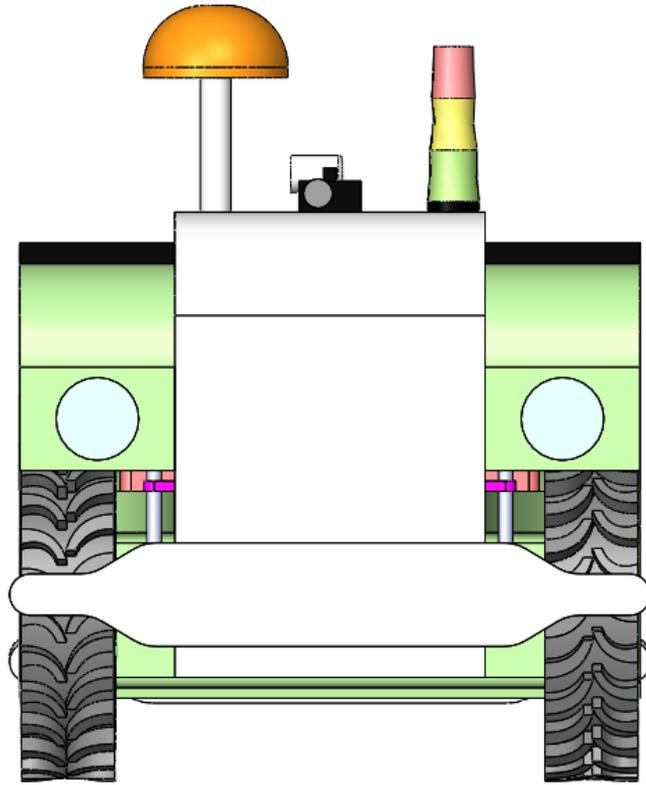


Figura 59: Vista frontale del rover

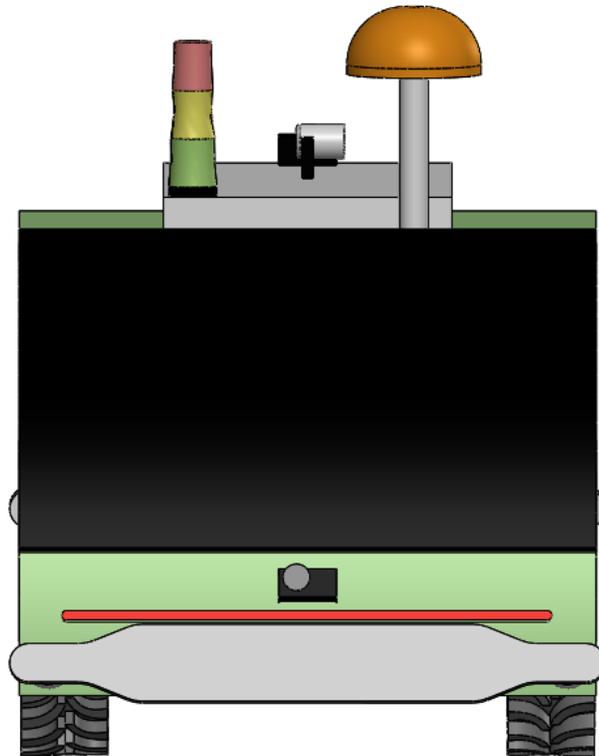


Figura 60: Vista posteriore del rover

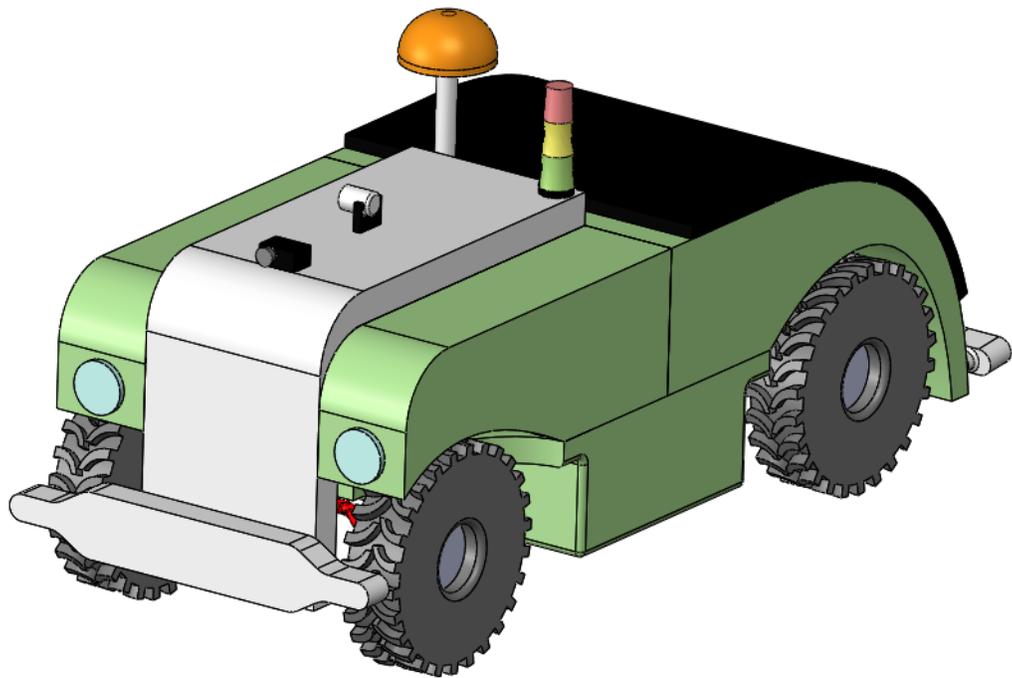


Figura 61: Vista anteriore destra del rover

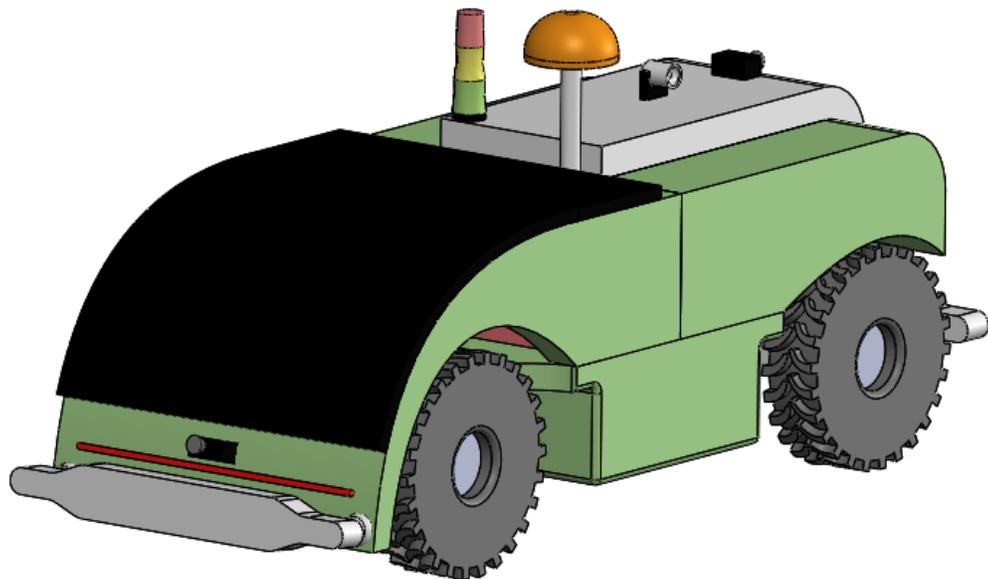


Figura 62: Vista posteriore sinistra del rover

5 Modellazione multibody

La progettazione del sistema di sterzo prosegue con la realizzazione di un modello multibody dell'intero drone, con l'obiettivo di analizzare le prestazioni del sistema.

Una volta sviluppato ex-novo il sistema all'interno del software, si procede con una serie di studi atti a simulare la capacità del sistema nel seguire una determinata traiettoria o nel percorrere una certa pendenza.

Il software utilizzato per le simulazioni è MSC/ADAMS View.

5.1 Il concetto di multibody

Con l'espressione "sistema multibody" si intende un sistema meccanico costituito da un insieme di corpi rigidi; ognuno di essi è collegato agli altri tramite giunti che ne limitano il movimento relativo. Un giunto, infatti, consente il moto relativo tra due elementi esclusivamente in certe direzioni e lo impedisce nelle altre.

Attraverso i software multibody è possibile modellare tali insiemi e successivamente svolgere analisi cinematiche e dinamiche dell'intero sistema, con quest'ultima è possibile comprendere come le varie parti in movimento interagiscono tra di loro e con l'ambiente. La capacità di svolgere analisi dinamiche è una delle caratteristiche principali di questo tipo di software che li contraddistingue dai software di animazione 3D con i quali è possibile svolgere solo analisi di tipo cinematico.

Per le caratteristiche appena elencate, questo tipo di software trova vasto utilizzo in vari settori dell'ingegneria, tra i quali: automazione, automotive, robotica, biomeccanico, eolico, veicoli on-road ed off-road, trasporto ferroviario.

Tra i principali codici multibody commerciali si ricordano: MSC Adams, Simpack, Gensys, Dytran, Madymo, Nucars, Vampire.

5.2 Il modello multibody

Vengono, innanzitutto, riportati i dati dimensionali e le masse caratteristiche del sistema in studio:

Dati dimensionali [mm]	
Lunghezza	1400
Semipasso anteriore	500
Semipasso posteriore	500
Altezza totale	400
Raggio ruote	150

Tabella 8: Dati dimensionali del drone

Masse [kg]	
Massa totale	200
Massa delle ruote	28
Massa batterie	40
Massa telaio	100

Tabella 9: Masse del drone

Il veicolo è stato suddiviso in più parti, ognuna delle quali rappresenta un corpo rigido:

- telaio;

- 4 ruote;
- batterie;
- box rettangolare rappresentate la massa restante;
- 2 aste a T per il moto del sistema di sterzo;
- 12 aste di forme e dimensioni diverse che costituiscono il sistema di sterzo.

Per la realizzazione di ogni parte, è stato possibile utilizzare le più appropriate tipologie di corpi rigidi presenti in Adams (parallelepipedo, cilindro, sfera...), ogni parte può essere utilizzata per creare parti più complesse collegandone due o più insieme attraverso funzioni booleane.

Ogni parte ha, ovviamente, delle specifiche proprietà inerziali che possono essere ricavate in tre modi differenti:

- Manualmente è possibile inserire i valori della massa totale e delle componenti del tensore delle inerzie. È una metodologia utile esclusivamente nel caso in cui si conoscano tutte le componenti del tensore delle inerzie e nel caso in cui non si abbia intenzione di parametrizzare il modello;
- Inserire esclusivamente la densità del materiale;
- Inserire esclusivamente il tipo di materiale.

Le ultime due strategie lasciano al software il calcolo della massa e del tensore di inerzia in base alla geometria di ogni corpo.

Nel caso in studio, non disponendo degli specifici materiali di cui sono composte le parti e volendo ottenere le masse riportate sopra, si è scelto di inserire per ogni parte un valore di densità che, considerando le dimensioni geometriche, assicurasse una massa il più possibile simile a quella desiderata. I valori ottenuti sono stati confrontati con le proprietà inerziali delle geometrie equivalenti realizzate nel software CAD Solidworks.

Vengono di seguito riportate tutte le caratteristiche delle principali parti realizzate.

5.2.1 Telaio

Il telaio è costituito da una serie di aste rigide (links) unite insieme attraverso funzioni booleane, le dimensioni totali sono:

- Larghezza pari a 350 mm;
- Lunghezza totale pari a 1070 mm;
- Altezza totale pari a 30 mm.

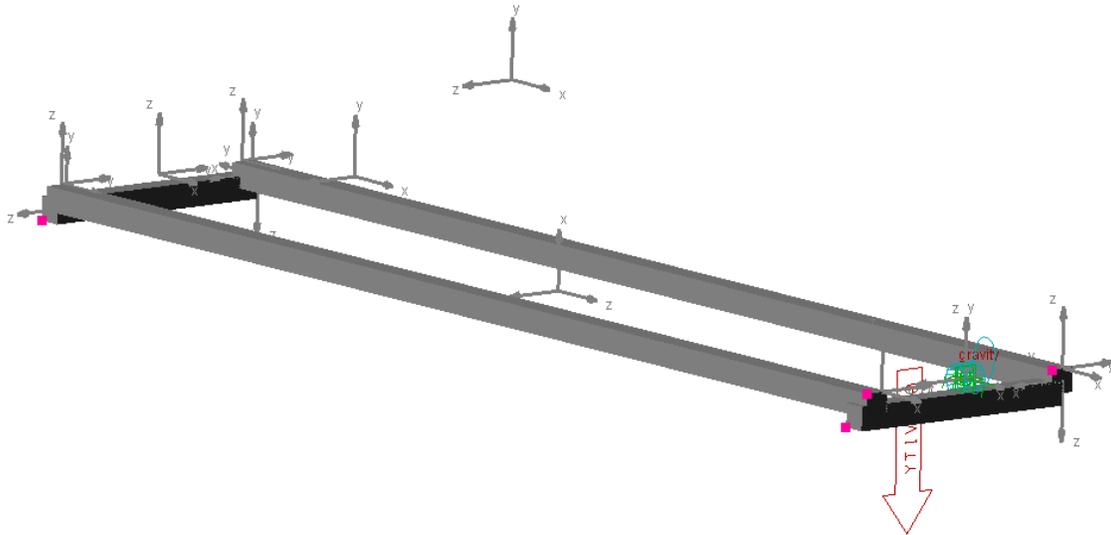


Figura 63: Telaio in ADAMS View

La densità scelta vale circa $7800 \frac{kg}{m^3}$, si ottengono, così, le seguenti proprietà:

Massa	$\sim 100 \text{ kg}$
I_{xx}	$1.3 \cdot 10^7 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$
I_{yy}	$1.2 \cdot 10^7 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$
I_{zz}	$8 \cdot 10^5 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$

Tabella 10: Proprietà inerziali del telaio

5.2.2 Pacco batterie

Il pacco batterie è stato modellato con un semplice parallelepipedo con dimensioni totali:

- Larghezza pari a 100 mm;
- Lunghezza pari a 800 mm;
- Altezza pari a 182 mm.

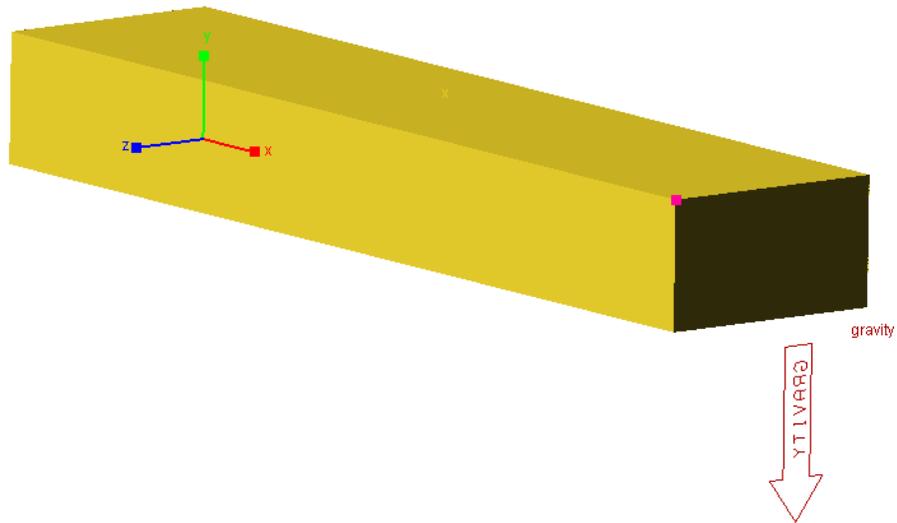


Figura 64: Pacco batterie in ADAMS View

La densità scelta vale circa $3420 \frac{kg}{m^3}$, si ottengono, così, le seguenti proprietà:

Massa	$\sim 50 \text{ kg}$
I_{xx}	$2.8 \cdot 10^6 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$
I_{yy}	$2.7 \cdot 10^6 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$
I_{zz}	$1.8 \cdot 10^5 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$

Tabella 11: Proprietà inerziali del pacco batterie

5.2.3 Ruote

Le ruote sono state modellate con un semplice cilindro con dimensioni totali:

- Raggio pari a 150 mm;
- Lunghezza pari a 100 mm.

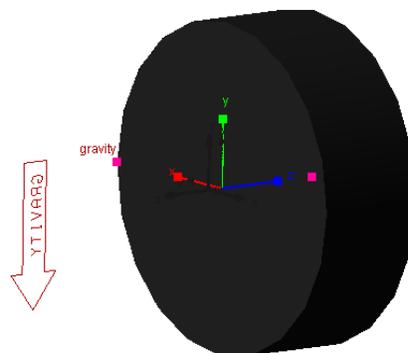


Figura 65: Ruota su ADAMS View

La densità scelta vale circa $1310 \frac{kg}{m^3}$, si ottengono, così, le seguenti proprietà:

Massa	$\sim 8 \text{ kg}$
I_{xx}	$1 \cdot 10^5 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$
I_{yy}	$6 \cdot 10^4 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$
I_{zz}	$6 \cdot 10^4 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$

Tabella 12: Proprietà inerziali della ruota

5.2.4 Massa restante

La massa restante è stata modellata con un semplice parallelepipedo con dimensioni totali:

- Larghezza pari a 80 mm;
- Lunghezza pari a 400 mm;
- Altezza pari a 182 mm.

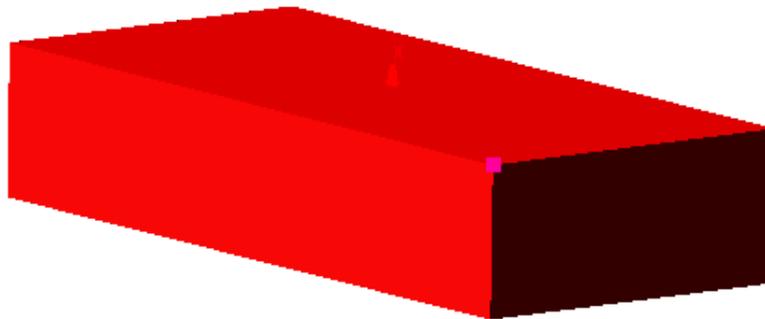


Figura 66: Massa restante in ADAMS View

La densità scelta vale circa $4620 \frac{kg}{m^3}$, si ottengono, così, le seguenti proprietà:

Massa	$\sim 27 \text{ kg}$
I_{xx}	$4.34 \cdot 10^5 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$
I_{yy}	$3.74 \cdot 10^5 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$
I_{zz}	$8.93 \cdot 10^4 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$

Tabella 13: Proprietà inerziali massa restante

5.2.5 Modello complessivo

Si riporta, adesso, il modello completo del drone in studio:

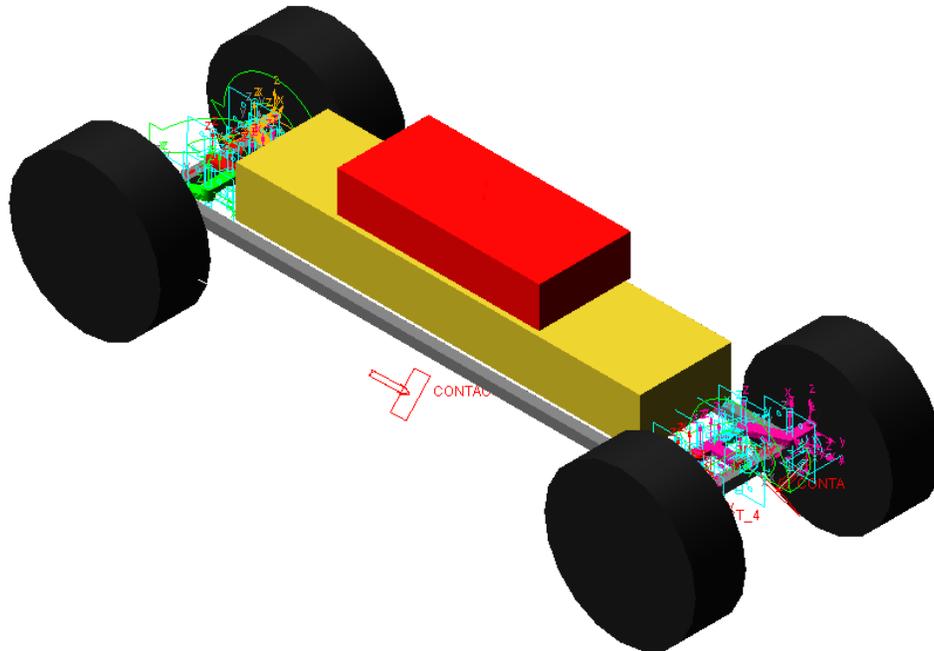


Figura 67: Modello multibody completo – Vista isometrica

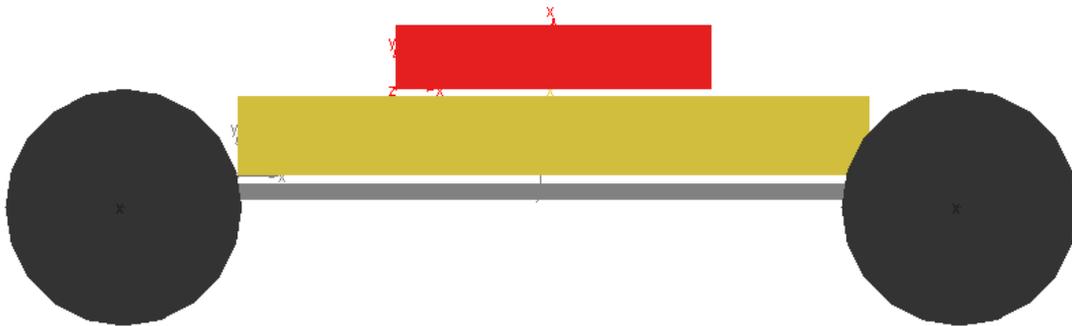


Figura 68: Modello multibody completo - Vista laterale

Il telaio, il pacco batterie ed il parallelepipedo che rappresenta la massa restante, sono stati collegati insieme con due diversi giunti fissi (fixed joints). Il giunto fisso elimina tutti e 6 i possibili gradi di libertà relativi ai due corpi che esso collega.

È importante specificare che non è stato possibile modellare il telaio, le batterie ed il parallelepipedo in una sola parte, in quanto è stato impossibile individuare un unico valore di densità che permettesse di ottenere le dimensioni geometriche e masse desiderate.

Per quanto riguarda il suolo, esso è stato modellato come un parallelepipedo di larghezza e lunghezza molto maggiori rispetto alle dimensioni del veicolo. Il software permette di inclinarlo della quantità (in gradi) che si preferisce, sia in direzione laterale che longitudinale, rendendo possibili analisi cinematiche e dinamiche sia su strada pianeggiante che su strada in pendenza.

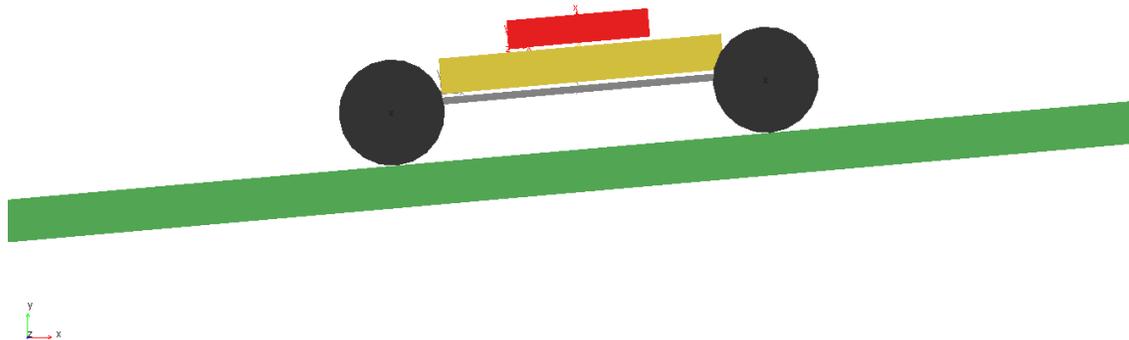


Figura 69: Drone su suolo inclinato di 5°

Il software riconosce come ground (“suolo”) lo spazio in cui vengono inseriti i vari corpi rigidi ma non rappresenta un reale suolo sul quale il veicolo può muoversi: è fondamentale, dunque, generare un suolo della stessa tipologia di quello riportato in figura e, successivamente, unirlo con il ground tramite un giunto fisso.

Ogni ruota è vincolata alla struttura principale tramite il sistema di aste che costituisce il gruppo sterzo e che verrà illustrato meglio nel capitolo successivo. Le ruote hanno l’importante funzione di mettere in contatto l’intero veicolo con il suolo: all’interno del software è possibile modellare il contatto ruota-terreno che permette il moto all’intero veicolo.

Il contatto è di tipo solido-solido (anche se, nella realtà, il terreno e lo pneumatico sono due corpi deformabili) ed è possibile selezionare la tipologia di attrito presente tra i due sistemi ed i relativi coefficienti statici e dinamici. Di seguito si riportano le scelte effettuate:

Friction Force	Coulomb
Coulomb Friction	On
Static Coefficient	0.3
Dynamic Coefficient	0.1
Stiction Transition Vel.	100.0
Friction Transition Vel.	1000.0

Figura 70: proprietà contatto ruota-terreno

5.3 Modellazione del sistema di sterzo

Il sistema di sterzo è stato progettato ex-novo all’interno dell’ambiente ADAMS View, tuttavia esso ha le stesse caratteristiche e le stesse modalità di funzionamento di quello realizzato in ambiente CAD Solidworks.

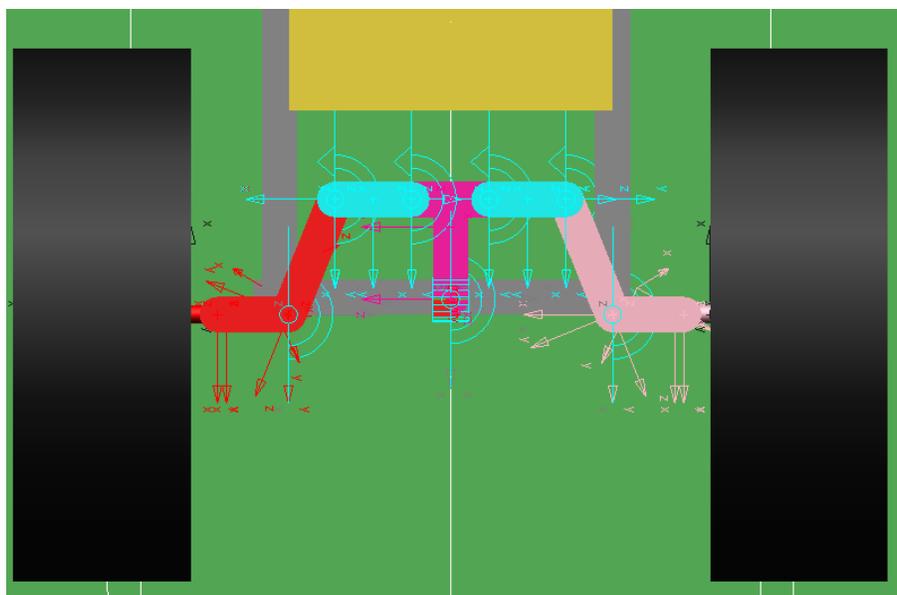


Figura 71: Vista superiore del sistema di sterzo anteriore in ADAMS View

È possibile evidenziare due aste “angolari” (rossa e rosa), ottenute tramite l’unione di due aste differenti, due aste orizzontali ed un’asta a T. Quest’ultima può ruotare attorno al punto in cui è vincolata al telaio trasferendo, così, il moto all’intero sistema.

Il collegamento con ogni ruota è effettuato come segue:

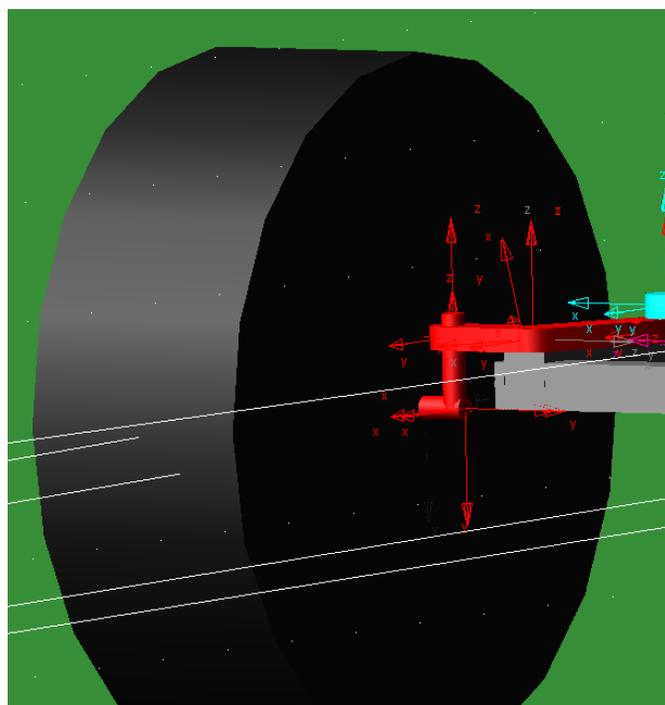


Figura 72: Collegamento tra ruota e sistema di sterzo in ADAMS View

Il copro rosso che collega telaio e ruota è stato ottenuto attraverso più funzioni booleane che hanno unito insieme:

- L'asta di forma angolare evidenziata nella figura 39;
- Un'asta verticale;
- Un'asta orizzontale la cui estremità è vincolata al centro della ruota.

Il corpo appena descritto e la ruota sono collegati da un giunto a cerniera (revolute joint) che permette la rotazione delle ruote attorno al loro asse di simmetria.

I restanti collegamenti del sistema di sterzo sono riportati di seguito:

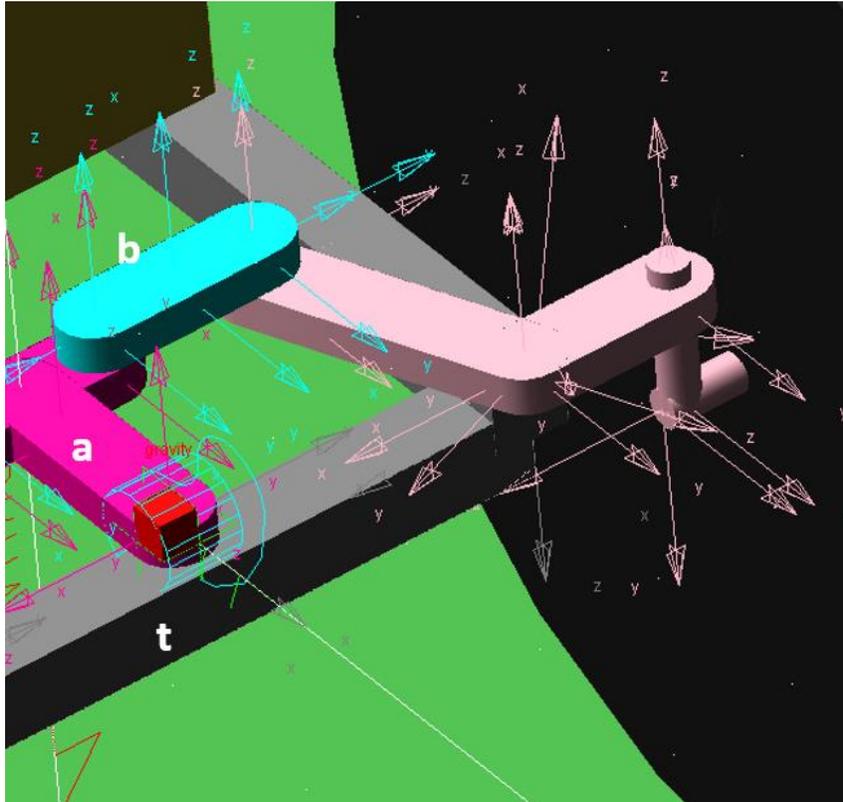


Figura 73: Collegamenti del sistema di sterzo in ADAMS View

Sono presenti:

- Una cerniera (1gdl) tra a e b con rotazione libera intorno all'asse verticale (uscente);
- Una cerniera (1gdl) tra a e t con rotazione imposta intorno all'asse verticale (simula la rotazione del motore di sterzo);
- Una cerniera (1gdl) tra b e c con rotazione libera intorno all'asse verticale;
- Una cerniera (1gdl) tra c e t con rotazione bloccata intorno agli assi orizzontali e rotazione imposta intorno all'asse verticale.

5.4 Inseguimento di una traiettoria

Dopo la realizzazione del modello multibody, è stato testato il sistema di sterzo all'interno dell'ambiente ADAMS View: è stata imposta una traiettoria ben precisa e si sono verificate le capacità del sistema nel seguire correttamente il percorso.

Per impostare la traiettoria desiderata, viene fornita al software una matrice contenente le coordinate nello spazio dei vari punti appartenenti al percorso che il veicolo deve seguire. La matrice è, quindi, composta da tre colonne (una per la coordinata x, una per la coordinata y ed una per la coordinata z) le cui componenti raccolgono distanze in mm rispetto ad un marker di origine posto in corrispondenza dell'origine del sistema di riferimento del terreno. Il software interpola questi punti con una spline di secondo grado: la traiettoria, sarà, quindi una spezzata che tocca tutti i punti definiti nella matrice.

Vengono riportate, di seguito, una matrice esempio e la traiettoria che le corrisponde:

	X	Y	Z
1	0.0	0.0	0.0
2	1000.0	0.0	0.0
3	1500.0	0.0	250.0
4	2000.0	0.0	500.0
5	2500.0	0.0	750.0
6	3000.0	0.0	1000.0
7	3500.0	0.0	1250.0
8	4000.0	0.0	1500.0
9	4500.0	0.0	1750.0
10	5000.0	0.0	2000.0
11	5500.0	0.0	2250.0
12	6000.0	0.0	2500.0
13	6500.0	0.0	2500.0
14	7000.0	0.0	2500.0
15	7500.0	0.0	2500.0
16	8000.0	0.0	2500.0
17	8500.0	0.0	2500.0
18	9000.0	0.0	2250.0
19	9500.0	0.0	2000.0
20	1.0E+04	0.0	1750.0
21	1.05E+04	0.0	1500.0
22	1.1E+04	0.0	1250.0
23	1.15E+04	0.0	1000.0
24	1.2E+04	0.0	750.0
25	1.25E+04	0.0	500.0
26	1.3E+04	0.0	250.0
27	1.35E+04	0.0	0.0
28	1.45E+04	0.0	0.0

Figura 74: Esempio di matrice contenente 28 punti appartenenti ad una generica traiettoria

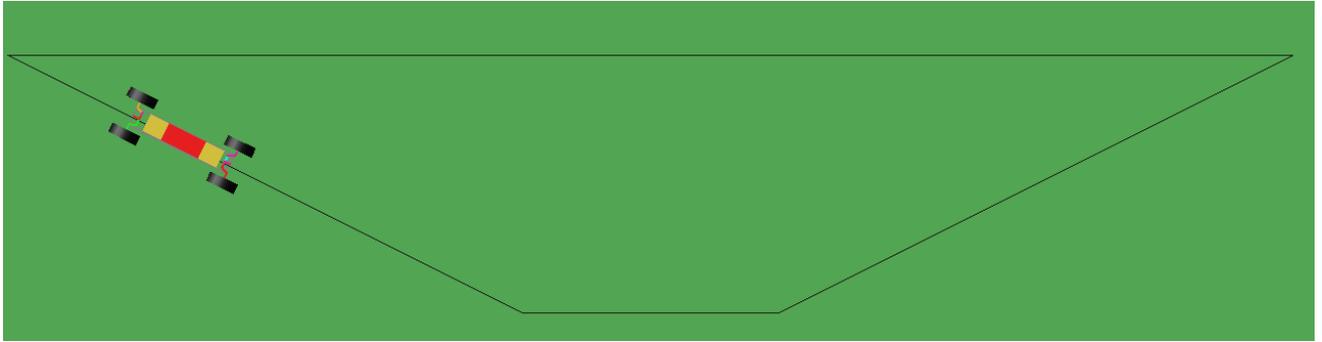


Figura 75: Traiettoria riferita alla matrice

Il veicolo è capace di seguire correttamente la traiettoria solo in seguito alla regolazione degli angoli del sistema di sterzo. Ricordando che le ruote sterzano conseguentemente alla rotazione delle due aste a T attorno alla cerniera posta tra il telaio e l'asta stessa, tramite il software si impone il moto di tali aste.

Il corretto valore che l'angolo di sterzo deve, via via, assumere, è proporzionale alla differenza tra la posizione attuale del veicolo e la posizione desiderata. Le due posizioni sono note in qualsiasi momento della simulazione grazie all'utilizzo di due marker distinti.

Per quanto riguarda la posizione del trattore, si è scelto come riferimento un marker che appartiene al telaio ed è posto al centro dell'assale anteriore.

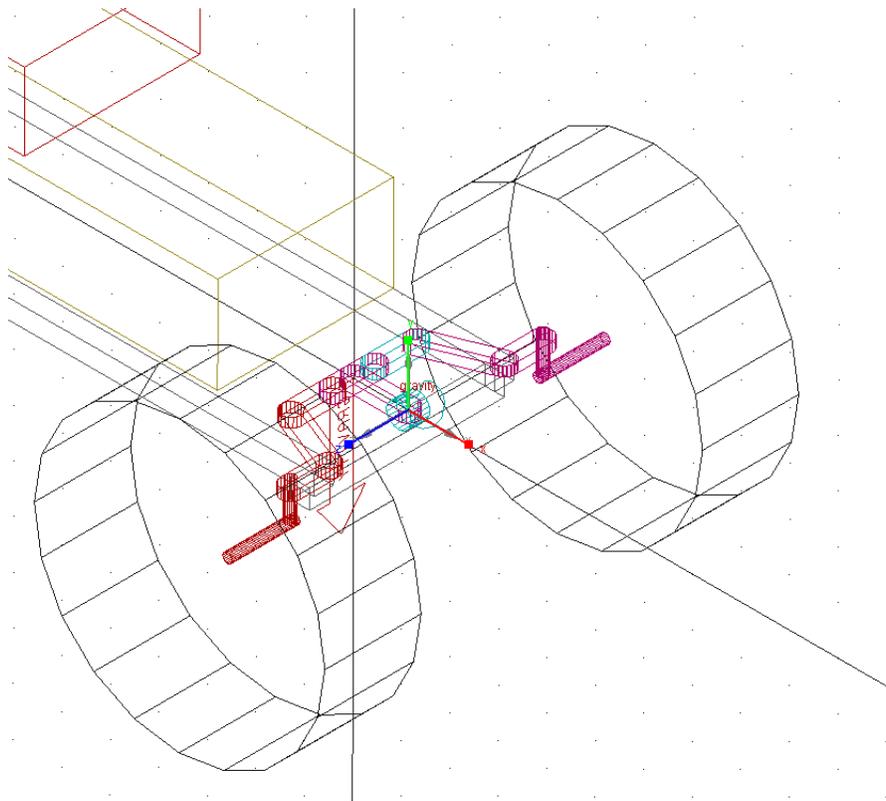


Figura 76: Marker per la posizione attuale del veicolo

Per identificare, invece, la posizione desiderata, istante per istante, è stato introdotto il cosiddetto “dummy body”, ovvero un corpo fittizio di forma cubica che non ha un ruolo attivo nella dinamica del sistema, ma che viene utilizzato, in questo caso, come riferimento durante le simulazioni.

Attraverso il vincolo Point-Curve constrain, si impone che il dummy body si muova solamente lungo la traiettoria creata. Inoltre, affinché il dummy body avanzi lungo la traiettoria con la stessa velocità del veicolo, si è imposta una legge del moto che impone che le coordinate lungo la direzione longitudinale del sistema di riferimento assoluto del corpo fittizio e del trattore siano sempre identiche.

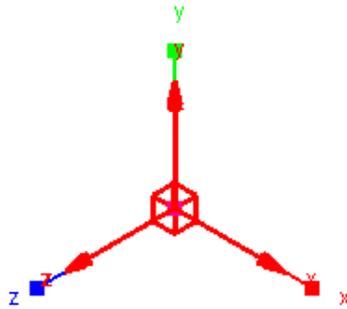


Figura 77: Dummy body

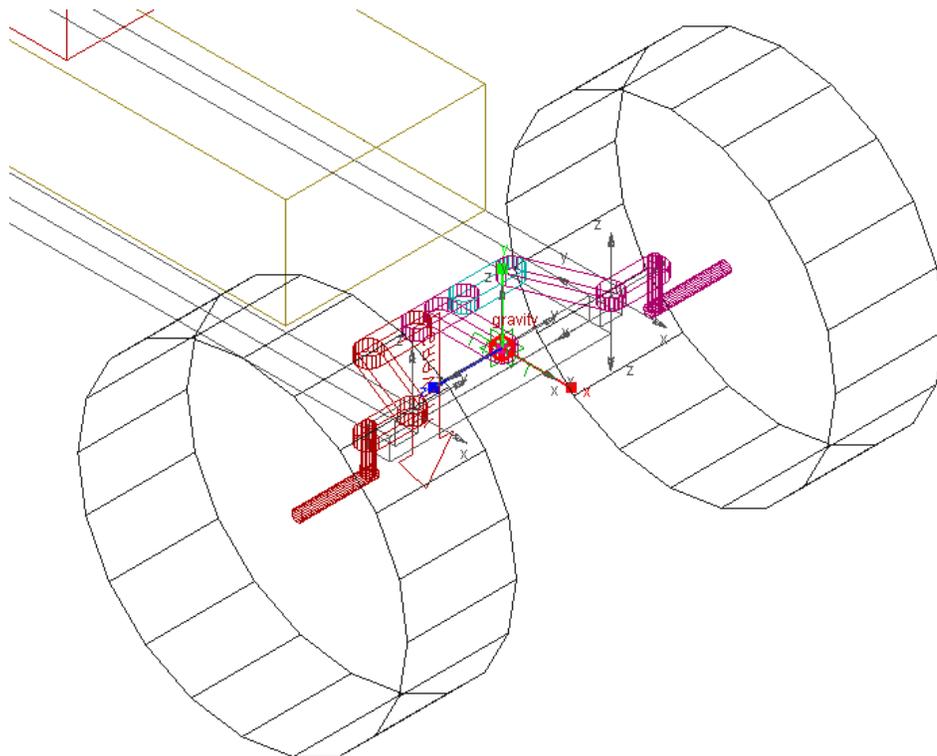


Figura 78: Posizione del dummy body

Dalla differenza delle posizioni dei due marker, si ottiene l'errore di posizione

$$\Delta_{pos} = pos_{TELAIO} - pos_{DUMMY BODY}$$

Da questa lunghezza è necessario passare ad una misura angolare per imporre la manovra di sterzo più adeguata; l'equazione che permette tale passaggio è la seguente:

$$\alpha_{sterzo} = K \cdot \tan \left(\frac{pos_{STELAIO} - pos_{DUMMY BODY}}{L} \right)$$

In cui:

- K : costante che indica la proporzionalità tra l'errore di posizione e l'angolo di sterzo. All'aumentare del suo valore aumenterà in modo proporzionale la reattività del sistema di sterzo;
- L : lunghezza [mm] utilizzata per "chiudere" il triangolo formato dalla linea che unisce i due marker sulla traiettoria e dalla differenza delle due posizioni.

La scelta di questo tipo di equazione è intuitiva e trova riscontro fisico nel passaggio da una lunghezza ad un angolo, come riportato nella figura successiva:

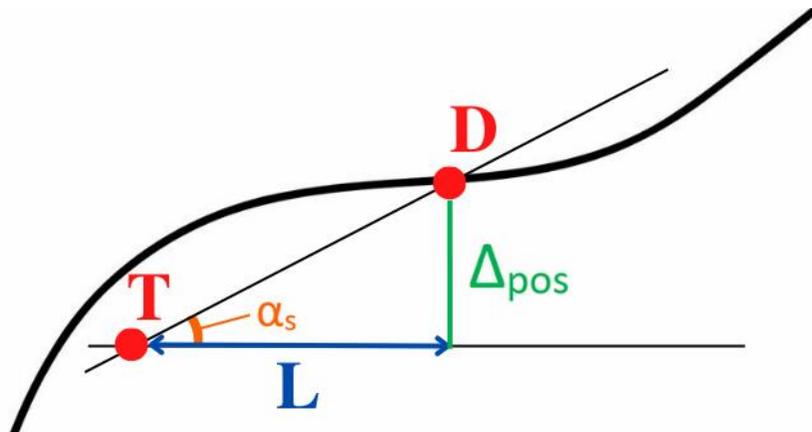


Figura 79: Passaggio grafico da una lunghezza ad un angolo

I valori assunti dalle costanti K ed L non sono casuali, essi sono stati selezionati dopo una serie di prove atte a verificare le capacità del veicolo nel seguire la traiettoria data. Vengono riportati grafici che riportano sull'asse delle ascisse la coordinata longitudinale del veicolo (coordinata delle x nella matrice riportata sopra) e sull'asse delle ordinate, invece, la coordinata laterale (coordinata z nella matrice riportata sopra):

- Prove con $\omega = \frac{\pi \text{ rad}}{4 \text{ s}}$, $L = 2000 \text{ mm}$ e K variabile:

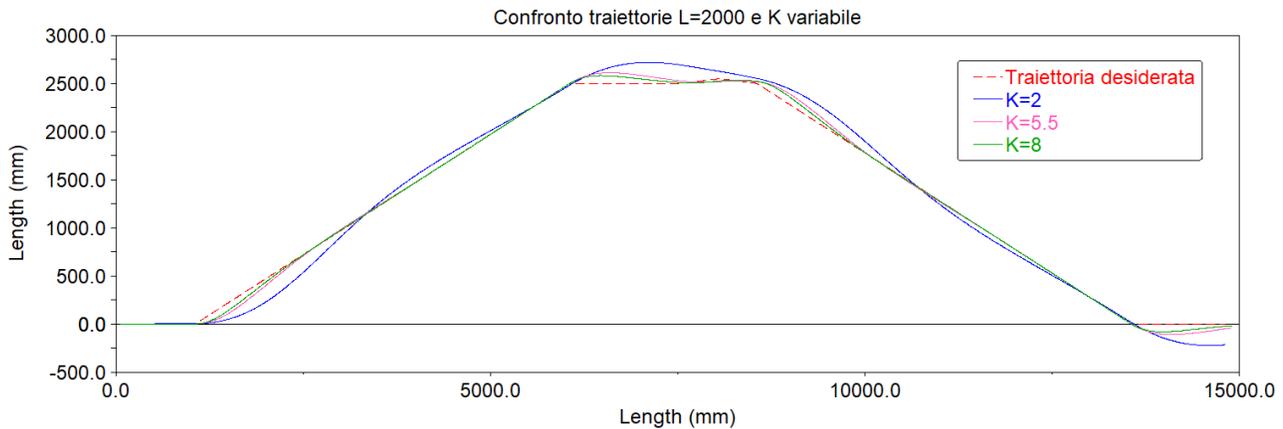


Figura 80: Traiettoria seguita dal trattore al variare di K

È innanzitutto evidente il concetto di reattività introdotto prima: valori troppo bassi di K fanno sì che il sistema sia troppo poco reattivo, il trattore, infatti, non è in grado di seguire in modo accurato la traiettoria per una gran parte di essa. Sono, inoltre, visibili marcati fenomeni di overshoot che consistono in picchi sia positivi che negativi che evidenziano un evidente distacco dalla traiettoria da seguire. Al tempo stesso, valori troppo elevati di K , generano una traiettoria con picchi minori ma con un andamento poco lineare: la curva corrispondente ad un K pari ad 8 è, infatti, ricca di creste, indice di un algoritmo che esegue operazioni di correzione troppo spesso.

Il valore di K ottimale è, quindi, un valore intermedio: si accettano, infatti, picchi leggermente più alti a discapito di una traiettoria pulita e lineare;

- Prove con $\omega = \frac{\pi \text{ rad}}{4 \text{ s}}$, $K = 5.5$ ed L variabile:

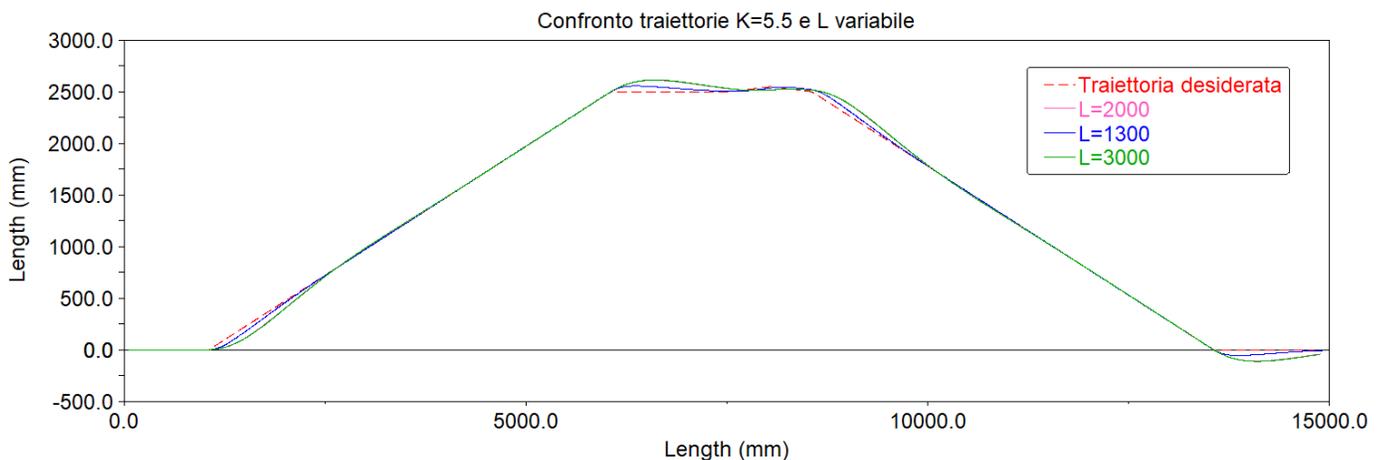


Figura 81: Traiettoria seguita dal trattore al variare di L

Come nel caso precedente, anche per quanto riguarda L si osserva un comportamento simile e la soluzione migliore corrisponde ad un valore intermedio.

È, tuttavia, osservabile un andamento opposto rispetto al caso precedente: valori piccoli di L rendono il sistema molto più reattivo, ma ciò è semplicemente dovuto al fatto che questa costante è legata con una proporzionalità inversa (è al denominatore dell'equazione di correzione) al

valore dell'angolo di sterzo.

I valori selezionati delle costanti K ed L risultano, dunque:

- $K = 5,5$;
- $L = 2000$.

5.4.1 Influenza della velocità

La capacità di seguire correttamente una determinata traiettoria dipende anche dalla velocità con cui il veicolo la percorre: è intuitivo pensare, infatti, che ad una velocità di avanzamento minore corrisponda una traiettoria percorsa molto più simile a quella desiderata.

Sono state, infatti, effettuate simulazioni che prevedono la medesima traiettoria desiderata ma velocità di avanzamento diverse:

- Prova con $\omega_{ruota} = \frac{\pi \text{ rad}}{6 \text{ s}}$, quindi $V_{avanzamento} = 0,075 \frac{\text{m}}{\text{s}}$:

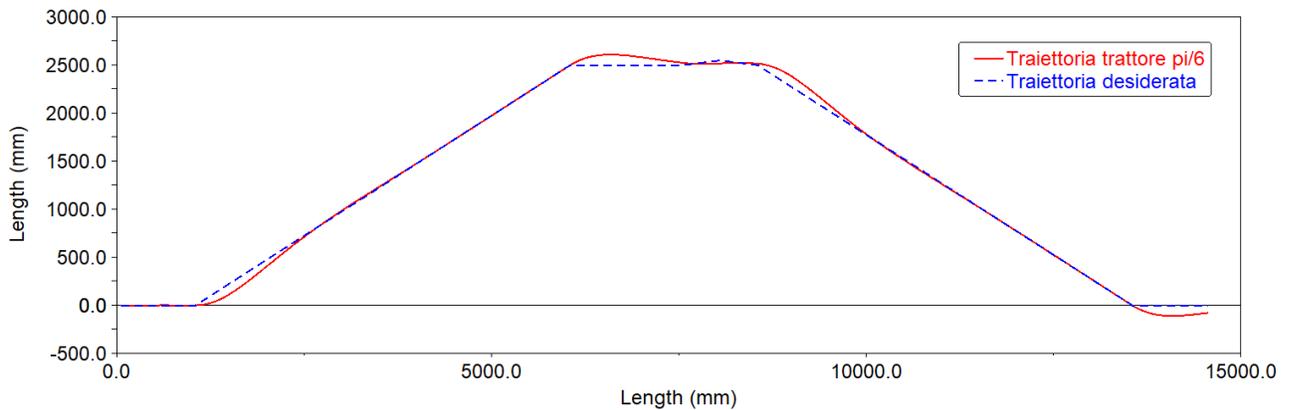


Figura 82: Traiettoria seguita a velocità minore

- Prova con $\omega_{ruota} = 3 \cdot \pi \frac{\text{rad}}{\text{s}}$, quindi $V_{avanzamento} = 1,4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$:

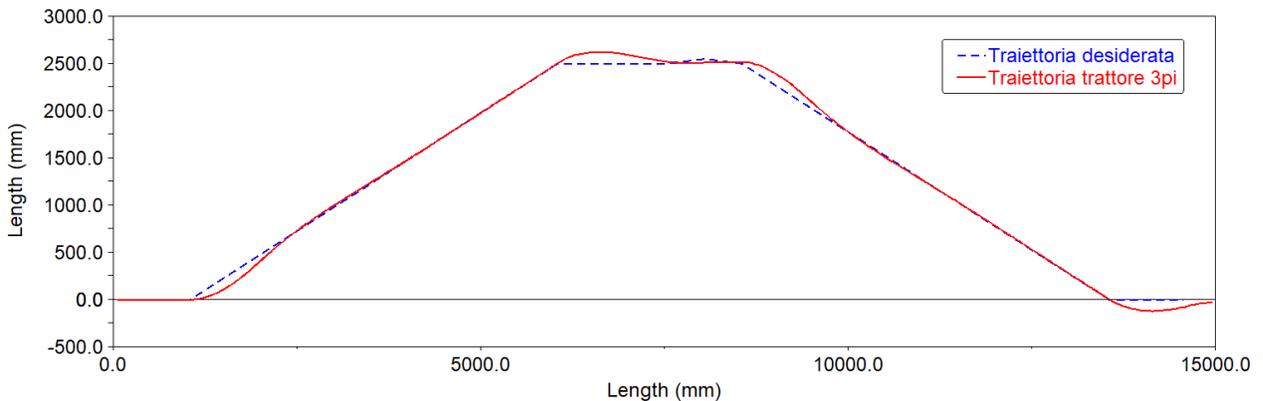


Figura 83: Traiettoria seguita a velocità maggiore

Sebbene le due traiettorie percorse dal trattore abbiano la stessa forma, analizzandole bene è possibile osservare picchi più pronunciati per la prova eseguita a velocità di avanzamento maggiore.

5.4.2 Influenza della tipologia del sistema di sterzo

Per mostrare tutti i vantaggi legati alla scelta di un sistema di sterzo di tipo 4WS rispetto ad un 2WS, è stata eseguita una prova con il fine di confrontare le capacità delle due tipologie di sistema nel seguire la medesima traiettoria percorsa alla medesima velocità di avanzamento.

La traiettoria percorsa con un sistema di sterzo di tipo 2WS è caratterizzata da minor precisione e, soprattutto, transitori di tempo maggiori per il completamento della manovra di sterzo.

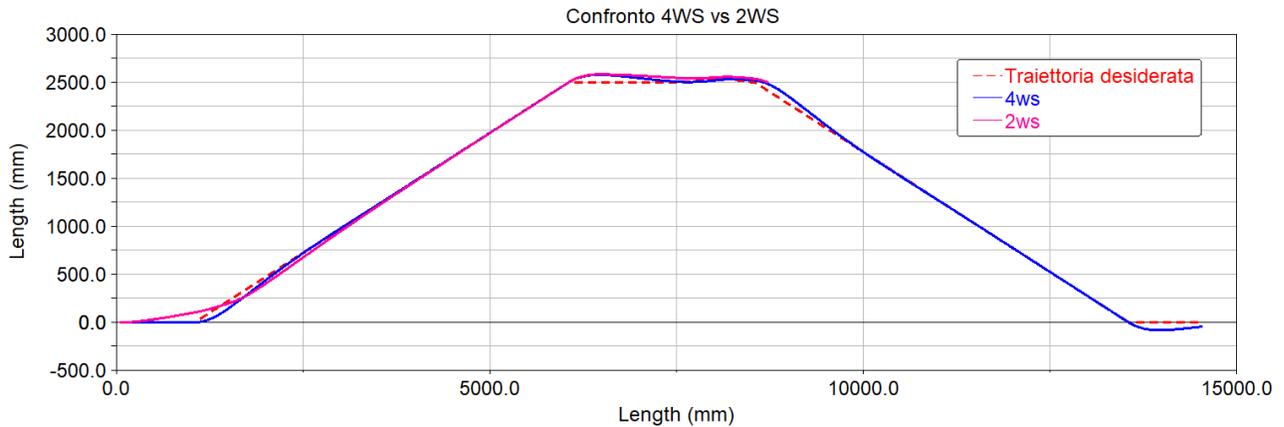


Figura 84: Confronto traiettorie sistema di sterzo 4WS vs 2WS

È fondamentale notare che con questa tipologia di traiettoria, il rover dotato di un sistema di sterzo di tipo 2WS non è in grado di portare a termine la simulazione: in presenza di un cambio di traiettoria repentino, infatti, la simulazione va in errore in quanto l'angolo necessario a compiere la manovra di sterzo desiderata supera il limite meccanico di 30° . Ciò dimostra che un sistema di sterzo non integrale garantisce manovre di sterzata caratterizzate esclusivamente da raggi di curvatura pronunciati, in disaccordo, quindi, con le tipiche manovre da compiere all'interno di un vigneto.

5.5 Controllo coppia

Lo studio riportato in seguito è stato eseguito per modellizzare la coppia motrice garantita agli assali delle ruote. Nelle applicazioni multibody e, soprattutto, nel modello in studio, non è importante modellare in modo accurato la trasmissione della coppia motrice dal motore all'assale: per questo motivo non è riportato alcun organo di trasmissione e la coppia motrice viene applicata direttamente agli assi delle ruote.

Il rover, come spiegato in precedenza, è costituito da quattro ruote motrici sterzanti, per cui è necessario applicare una coppia motrice ad ognuna delle ruote.

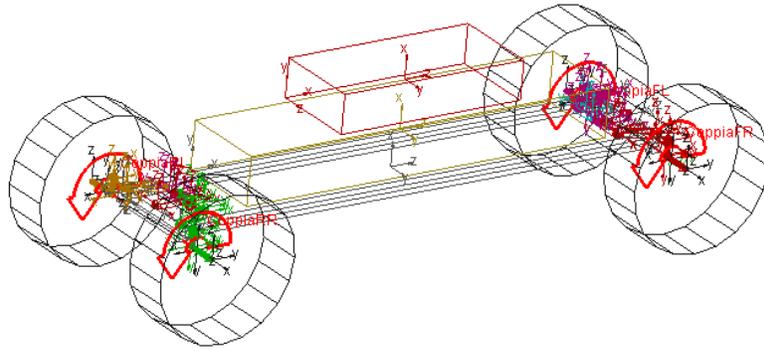


Figura 85: Coppie motrici applicate agli assi delle ruote

La strategia utilizzata per determinare la funzione che modella i valori di coppia motrice applicata alle ruote si serve di un controllo di tipo proporzionale che viene sintetizzato con la seguente equazione:

$$C_{motrice} = K \cdot \Delta_{vel}$$

La coppia motrice è, infatti, funzione dell'errore di velocità del rover ed è proporzionale ad esso di un fattore K, in quanto la coppia cresce all'aumentare dell'errore stesso.

Le grandezze in gioco sono definite come segue:

- K : il guadagno del controllo proporzionale, vale 2000 Ns e permette di passare dal valore di velocità [mm/s] ad un valore di coppia [Nmm];
- $\Delta_{vel} = velocità_{desiderata} - velocità_{attuale}$ [mm/s];
- $velocità_{desiderata}$: è la velocità di traslazione del veicolo imposta dall'utilizzatore sotto forma di una funzione o di una matrice;
- $velocità_{attuale}$ è la velocità di traslazione reale della ruota e viene automaticamente calcolata istante per istante come:

$$velocità_{attuale} = \omega_{media} \cdot R_{ruota}$$

In cui ω_{media} è la media delle velocità angolari di tutte e quattro le ruote motrici.

Il controllo è schematizzato nella figura successiva:

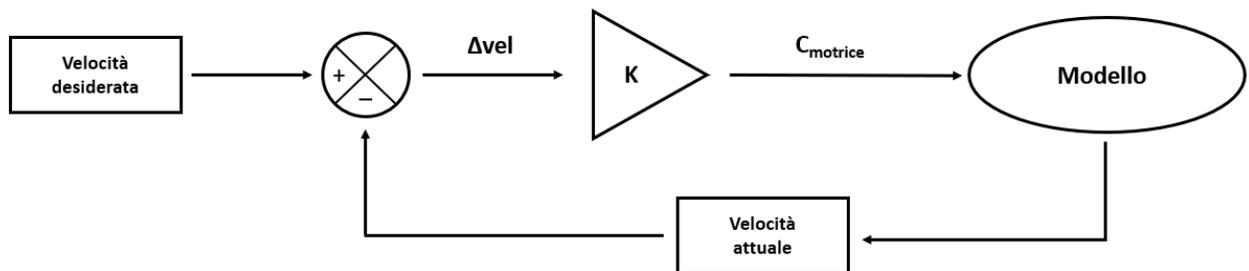


Figura 86: Controllo coppia proporzionale

In presenza di suolo in pendenza, la relazione di proporzionalità tra la coppia motrice e l'errore di velocità, deve essere modificata in quanto è necessario considerare anche il contributo necessario a compensare l'azione resistiva della forza peso.

L'equazione diventa, infatti:

$$C_{motrice} = K \cdot \Delta_{vel} + m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \cdot R$$

In cui:

- α : angolo di inclinazione del terreno in $^{\circ}$;
- m : massa del veicolo ;
- R : raggio della ruota.

Il controllo è schematizzato nella figura successiva:

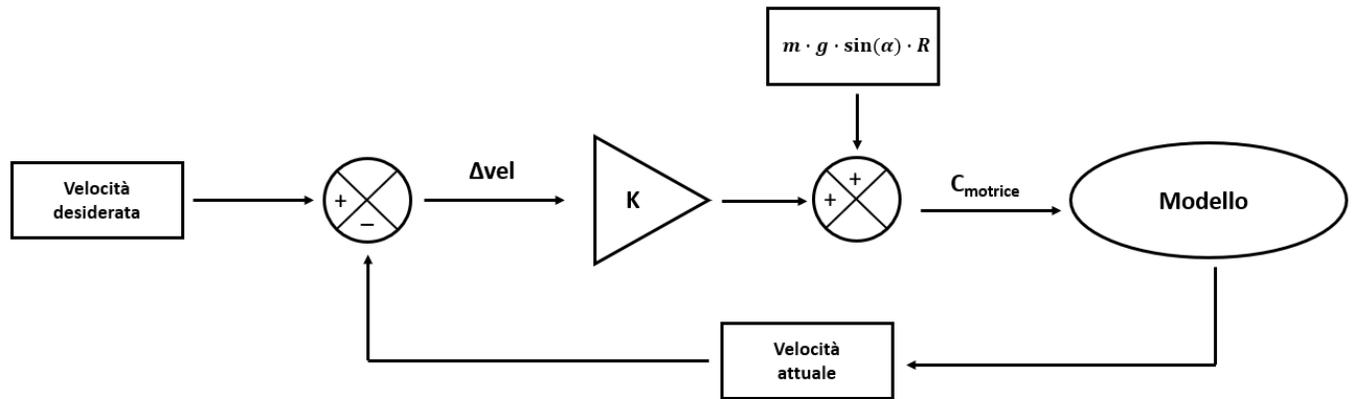


Figura 87: Controllo coppia proporzionale con suolo in pendenza

A titolo di esempio si riportano alcuni grafici ottenuti in una simulazione eseguita con suolo inclinato di 10° :

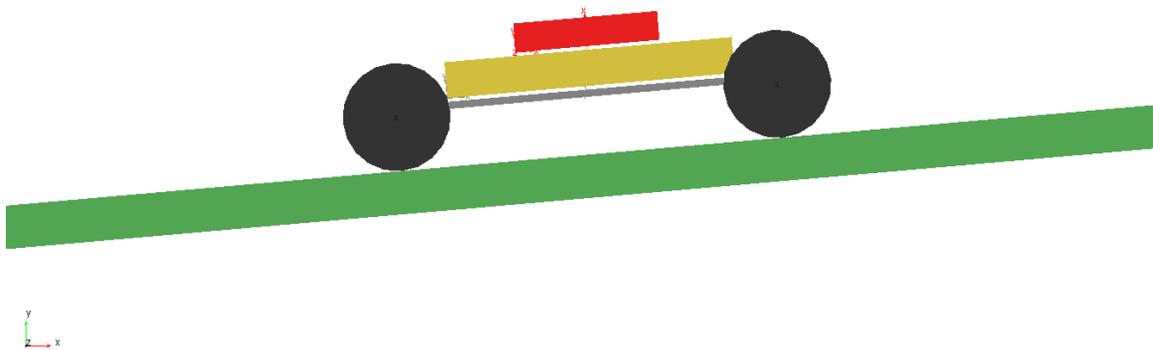


Figura 88: Rover in moto su un suolo inclinato di 10°

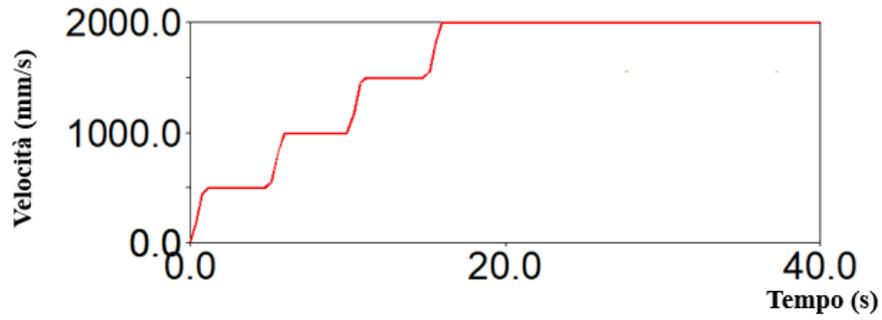


Figura 89: Velocità di traslazione desiderata imposta come funzione a gradino

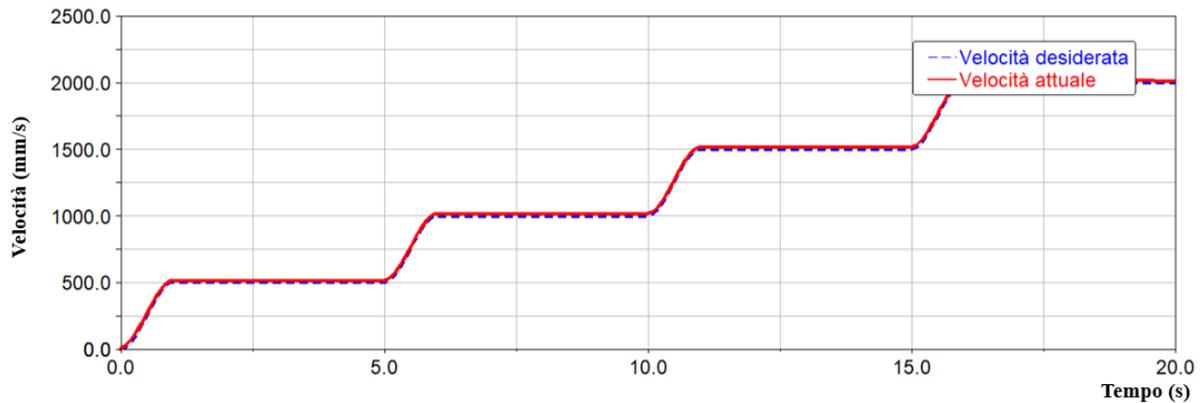


Figura 90: Confronto tra la velocità di traslazione attuale e velocità di traslazione desiderata

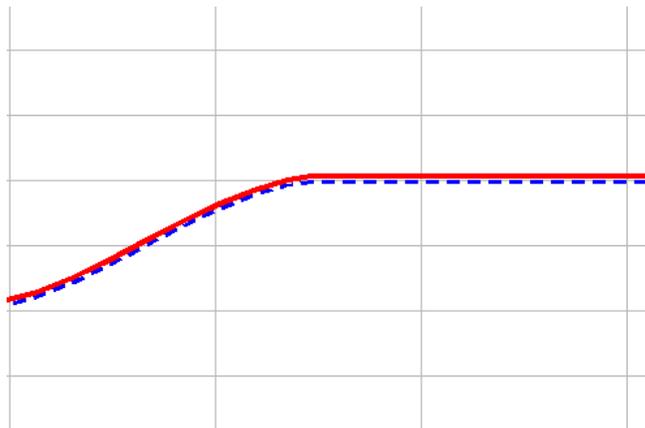


Figura 91: Particolare del confronto

Dai grafici riportati e, soprattutto, dal particolare riportato in figura 95 è evidente come il rover sia in grado di seguire in modo del tutto affidabile la funzione di velocità imposta.

5.6 Pendenza longitudinale massima

In campo agricolo, la principale causa di infortunio mortale sul lavoro riguarda il ribaltamento del veicolo. Le statistiche ufficiali nazionali e internazionali degli ultimi 40 anni evidenziano che al

ribaltamento del trattore agricolo si devono mediamente circa il 70% degli infortuni con esito fatale del comparto agricolo. (fonte: Inail)

Una delle simulazioni svolte in ambiente MSC Adams View riguarda la pendenza longitudinale massima che il veicolo riesce a percorrere prima di ribaltarsi. Viene creato un nuovo marker appartenente al suolo che viene inclinato via via di un angolo sempre maggiore rispetto alla direzione laterale del modello e tutti i singoli corpi solidi che costituiscono il modello vengono posizionati relativamente ad esso in modo tale da ottenere configurazioni simili a quella riportata nella figura successiva:

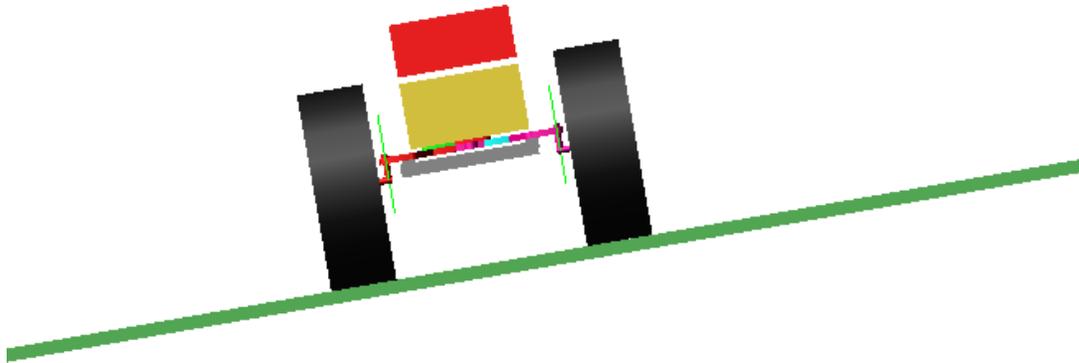


Figura 92: Terreno con angolo di inclinazione laterale pari a 6°

La pendenza laterale massima raggiungibile vale 6°.

5.7 Moto tra filari

L'ultima simulazione svolta in ambiente MSC Adams View consiste nella validazione dell'intero modello attraverso la simulazione del moto tra i filari.

La classica geometria dei filari è riportata nella figura successiva ed, in particolar modo, vengono evidenziate le distanze da percorrere e le dimensioni caratteristiche.

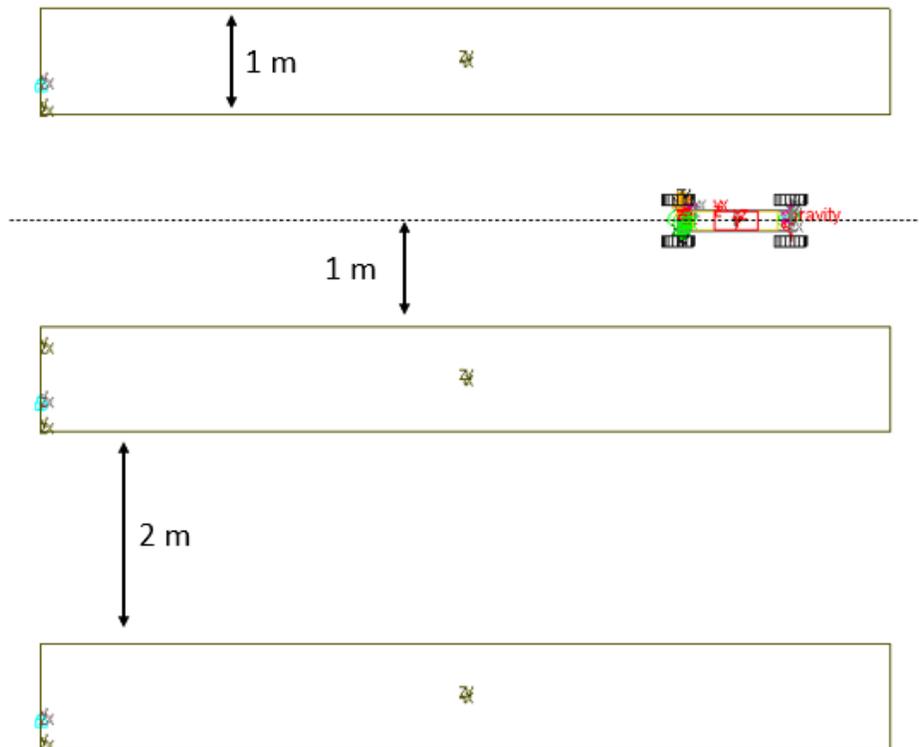


Figura 93: Geometria dei filari

Come anticipato in precedenza, al veicolo è richiesto di mantenere determinate distanze dalle viti e, soprattutto, di spostarsi tra un filare e l'altro con manovre caratterizzate da un raggio di curvatura che sia il più piccolo possibile.

Le alternative sono sostanzialmente due:

- Il rover si sposta tra due filari adiacenti, compiendo una manovra di sterzo caratterizzata da un raggio di curvatura molto piccolo ed angoli di sterzo piuttosto pronunciati;
- Il rover si sposta tra un filare e l'altro saltandone uno ad ogni sterzata, per poi percorrerlo nel percorso di ritorno; in questo modo si ottengono manovre più dolci caratterizzate da angoli di sterzo non troppo elevati.

Il sistema di sterzo del veicolo non permette di ottenere elevati angoli di sterzo a causa dei limiti meccanici imposti dal sistema stesso, tuttavia questi sono sufficienti per percorrere una traiettoria come quella riportata in figura caratterizzata, quindi, da una manovra lineare ed angoli di sterzo simili a quelli ottenuti nelle precedenti prove di tipo cinematico e dinamico riportate nel Capitolo 4.

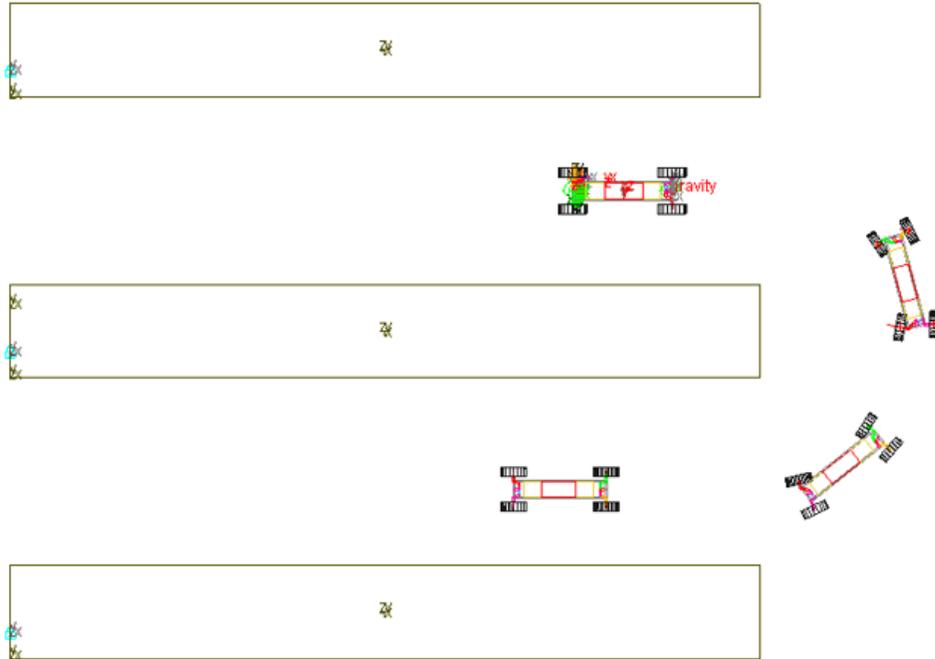


Figura 94: Moto tra i filari

Per ottenere una traiettoria di questo tipo gli angoli di sterzo delle ruote anteriori e posteriori assumono andamento simile:

- Angolo di sterzo anteriore: assume un valore massimo di circa 16°

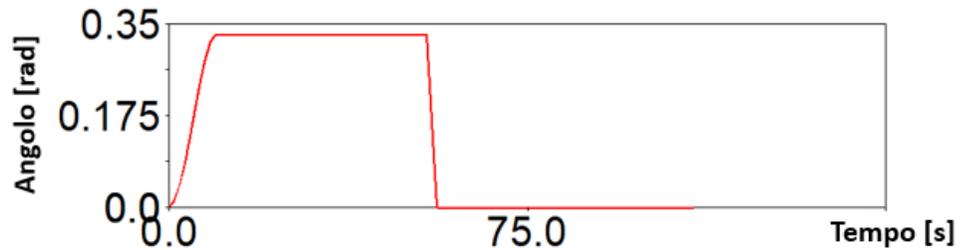


Figura 95: Angolo di sterzo anteriore

- Angolo di sterzo posteriore: assume un valore massimo di circa 15°

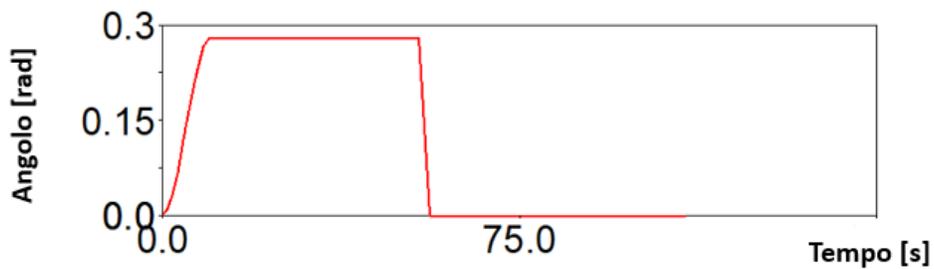


Figura 96: Angolo di sterzo posteriore

6 Design review e sviluppi futuri

A questo punto della trattazione, è possibile analizzare in che modo siano stati rispettati e soddisfatti tutti i requisiti di progetto.

Gli obiettivi di sostenibilità ed efficienza sono stati raggiunti in primo luogo con la scelta di un sistema di propulsione 100% elettrico e, in secondo luogo, con l'adozione di molteplici tecnologie necessarie a rendere precise ed affidabili tutte le attività svolte in campo agricolo. Attraverso l'utilizzo di svariati sensori di posizione (LiDAR e stereo camere), uniti all'affidabilità del sistema di navigazione GPS RTK, la movimentazione del rover all'interno del vigneto è precisa e soprattutto sicura per le colture e per gli operatori.

L'adozione di un sistema di sterzo semplice e di tipo 4WS rende il rover facilmente manovrabile ed abile a compiere traiettorie caratterizzate da raggi di curvatura non troppo elevati. Infine, attraverso il monitoraggio dello stato delle colture, l'operatore agricolo può selezionare il trattamento più adatto per ogni zona dell'intero vigneto, il che comporta un elevato risparmio in termini di pesticidi, concimi e carburante.

Il rover ottenuto è costituito dall'insieme di semplici tecnologie facilmente implementabili: il sistema di sterzo è, infatti, costituito dall'unione di più aste azionate da un piccolo motoriduttore DC; la trasmissione non prevede differenziali e l'intera struttura, inoltre, è semplice e facilmente realizzabile.

È possibile sintetizzare il tutto con la seguente tabella:

OBIETTIVO	TECNOLOGIA ADOTTATA
Sostenibilità	Propulsione 100% elettrica
Precisione	Navigazione con GPS RTK e LiDAR
Capacità di trazione	Trazione integrale e pneumatici agricoli
Manovrabilità	Sistema di sterzo 4WS che garantisce piccoli raggi di curvatura
Efficienza	Monitoraggi e trattamenti affidabili e precisi
Compattezza	Massa ed ingombri contenuti

Tabella 14: Sintesi degli obiettivi raggiunti

Al termine di questo elaborato è, quindi, possibile, senza dubbio, affermare che il progetto presentato, sebbene riguardi un rover non ancora realizzato, dimostra che l'obiettivo di ottenere una tipologia di agricoltura sempre più precisa, efficiente e, soprattutto, sostenibile, è facilmente perseguibile, sia in termini di accessibilità alle tecnologie che in termini di costi.

Le prestazioni del veicolo possono essere senza dubbio migliorate andando a modificare alcune delle tecnologie sopra elencate, mantenendole comunque semplici e facilmente reperibili a discapito, però, dei costi.

Per rendere il rover ancor più manovrabile, è possibile eliminare il collegamento meccanico presente tra le due ruote di uno stesso asse e dotare ogni ruota di un proprio motore integrato. Controllando separatamente ogni motore, tramite strategie di torque vectoring, è possibile ruotare ogni ruota attorno al proprio asse verticale ottenendo, così, la possibilità di effettuare manovre di sterzo caratterizzate da ridotti raggi di curvatura.

Un ulteriore miglioramento può essere ottenuto rendendo la struttura esterna configurabile rendendo possibile la variazione dell'interasse e dell'altezza da terra del rover, in modo tale da renderlo versatile per qualsiasi tipologia di vigneto o frutteto.

6.1 Versione futura

Viene, di seguito, proposto un progetto di massima di una possibile versione futura del rover realizzato in questo studio.

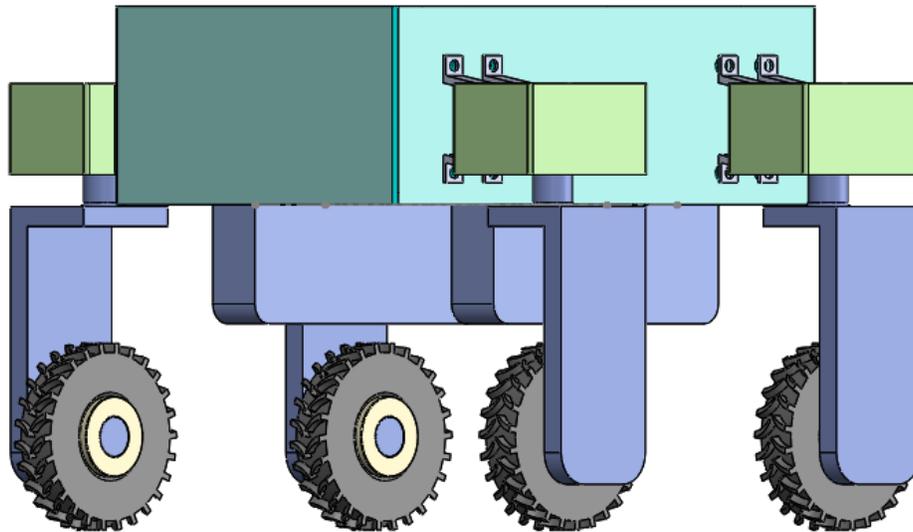


Figura 97: Versione futura del rover

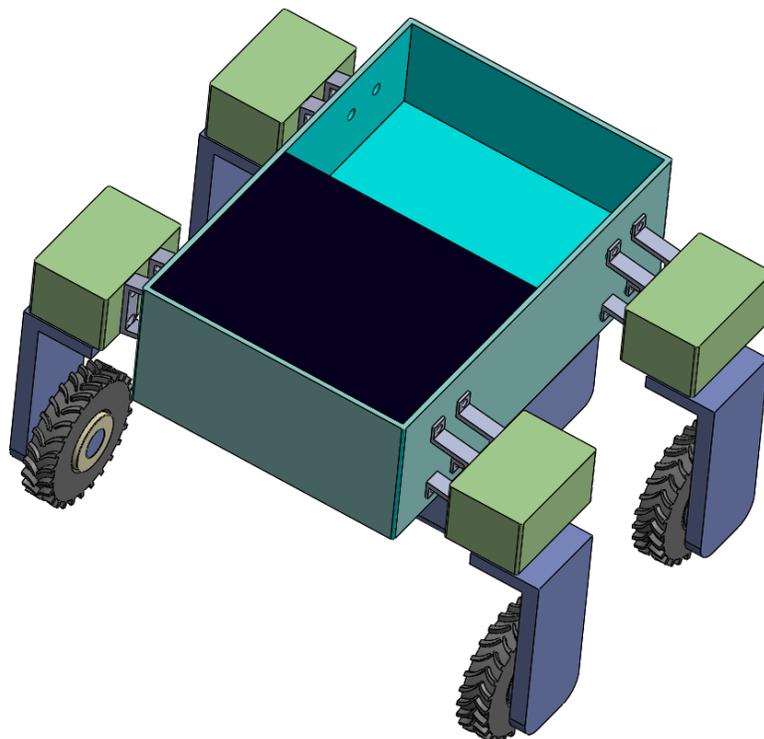


Figura 98: Versione futura del rover

La versione proposta è una versione modulare: una serie di moduli elementari sono, infatti, uniti insieme per realizzare un nuovo drone scavallante che svolga funzioni di monitoraggio all'interno dei vigneti. I moduli sono i seguenti:

- Modulo batterie: è un modulo pensato per ospitare esclusivamente batterie ed elettronica di controllo.

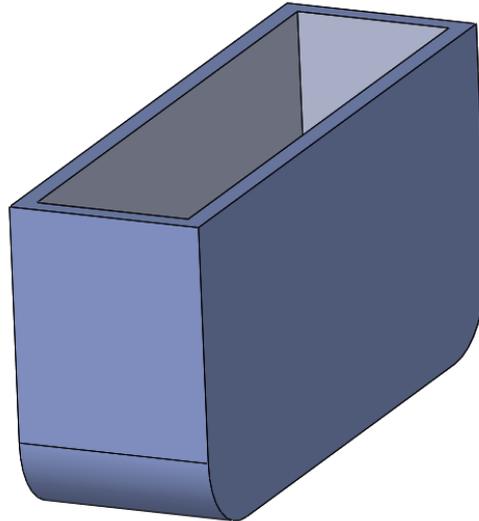


Figura 99: Modulo batterie

La sua particolare forma ed il suo posizionamento sono pensati per ridurre gli ingombri nella zona centrale del drone e per ottenere una distribuzione equa delle masse su tutti i lati. I pacchi batterie che può ospitare, però, sono caratterizzati da numerose celle a litio di dimensioni ridotte con design all'avanguardia, che permette al pacco batteria di assumere una forma meno ingombrante;

- Modulo di sterzo: il drone in questione ha un sistema di sterzo di tipo 4WS; la tecnologia usata per realizzarlo, però, è molto costosa e richiede elevate capacità di controllo e programmazione.

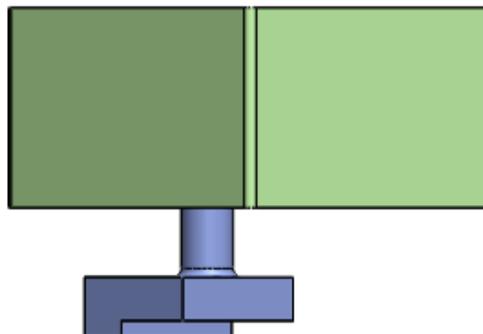


Figura 100: Modulo di sterzo

La box verde riportata in figura contiene un normale motore elettrico brushless DC che viene flangiato sul perno uscente dalla box stessa. Ogni ruota ha un proprio modulo di sterzo, ciò rende possibile ottenere un sistema di sterzo 4WS che permette il controllo separato di ciascuna ruota. In questo modo il drone può ruotare completamente su se stesso e ciò rende possibile la massima

riduzione del raggio di curvatura.

- Modulo per la propulsione: il drone in oggetto è dotato di trazione integrale. Per ottenere un'architettura di tipo scavallante, è necessario evitare il collegamento delle due ruote anteriori o delle due ruote posteriori tramite un asse. Tutti i robot scavallanti presenti in letteratura ed in commercio, per far fronte a questa tipologia di problema, dotano ogni ruota di un proprio motore (diverso da quello utilizzato nel modulo di sterzo).

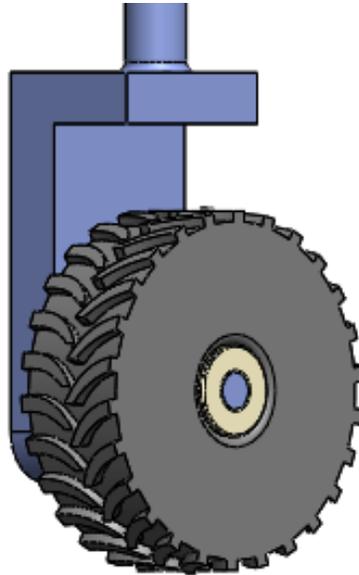


Figura 101: Modulo per la propulsione

Il motore elettrico DC di tipo brushless è integrato direttamente all'interno della ruota, il suo asse, infatti, coincide con l'asse dello pneumatico. Ciò rende sicuramente il sistema di propulsione più semplice e meno ingombrante:

si ottengono, infatti, un alleggerimento della parte meccanica, una trasmissione ancor più diretta di quella già essenziale dei motori attuali e la possibilità di avere angoli di sterzo molto più ampi senza più i limiti fisici imposti dai semiassi.

Anche in questo caso la soluzione presentata è caratterizzata da elevati costi e dispendiose tecniche di programmazione e controllo.

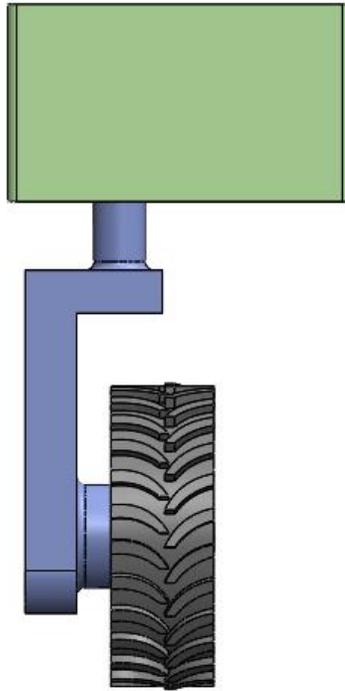


Figura 102: Modulo di sterzo e modulo di propulsione

- Modulo per sensori ed eventuale pannello fotovoltaico: la restante parte del drone proposto è caratterizzata da una box posta superiormente che prevede l'alloggio di tutti i sensori utili per la navigazione (antenna GPS RTK, sensori LiDAR) e per il monitoraggio (sensori ad infrarossi, stereo camere, ecc ...) e di un pannello fotovoltaico utile alla loro alimentazione.

Il rover così proposto può costituire una valida alternativa al rover oggetto di questa tesi, qual ora si volessero svolgere operazioni di monitoraggio all'interno di vigneti con filari ed interspazi di qualsiasi dimensione.

7 Bibliografia e sitografia

1. Farokhi Soofi A, D. Manshadi S, Saucedo A. Farm electrification: A road-map to decarbonize the agriculture sector. *The Electricity Journal*. 2022;35(2):107076. doi:10.1016/j.tej.2022.107076
2. Todde G, Murgia L, Caria M, Pazzona A. A Comprehensive Energy Analysis and Related Carbon Footprint of Dairy Farms, Part 2: Investigation and Modeling of Indirect Energy Requirements. *Energies (Basel)*. 2018;11(2):463. doi:10.3390/en11020463
3. Gebbers R, Adamchuk VI. Precision Agriculture and Food Security. *Science (1979)*. 2010;327(5967):828-831. doi:10.1126/science.1183899
4. G. Lapini. BREVE STORIA DELLE MACCHINE AGRICOLE. *EMMECIquadro Scienza Educazione E Didattica*. Published online 2014.
5. Innovation of tractors. <https://www.timetoast.com/timelines/innovation-of-bows>.
6. Hunter MC, Smith RG, Schipanski ME, Atwood LW, Mortensen DA. Agriculture in 2050: Recalibrating Targets for Sustainable Intensification. *Bioscience*. 2017;67(4):386-391. doi:10.1093/biosci/bix010
7. Brady M. *Robotics Science*. Vol 1. MIT press; 1989.
8. Vrochidou E, Tziridis K, Nikolaou A, et al. An Autonomous Grape-Harvester Robot: Integrated System Architecture. *Electronics (Basel)*. 2021;10(9):1056. doi:10.3390/electronics10091056
9. Jørgen Torgersen. *Mobile Agricultural Robot*. 2014.
10. Mocera F. *Cingolato Automatico Multifunzione*.
11. Ravankar A, Ravankar AA, Rawankar A, Hoshino Y. Autonomous and Safe Navigation of Mobile Robots in Vineyard with Smooth Collision Avoidance. *Agriculture*. 2021;11(10):954. doi:10.3390/agriculture11100954
12. Zhang H ye, Lin W ming, Chen A xia. Path Planning for the Mobile Robot: A Review. *Symmetry (Basel)*. 2018;10(10):450. doi:10.3390/sym10100450
13. Karur K, Sharma N, Dharmatti C, Siegel JE. A Survey of Path Planning Algorithms for Mobile Robots. *Vehicles*. 2021;3(3):448-468. doi:10.3390/vehicles3030027
14. Adamchuk VI, Hummel JW, Morgan MT, Upadhyaya SK. On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Comput Electron Agric*. 2004;44(1):71-91. doi:10.1016/j.compag.2004.03.002
15. Maes WH, Steppe K. Estimating evapotranspiration and drought stress with ground-based thermal remote sensing in agriculture: a review. *J Exp Bot*. 2012;63(13):4671-4712. doi:10.1093/jxb/ers165
16. Gebbers R, Adamchuk VI. Precision Agriculture and Food Security. *Science (1979)*. 2010;327(5967):828-831. doi:10.1126/science.1183899
17. Heege HJ, Reusch S, Thiessen E. Prospects and results for optical systems for site-specific on-the-go control of nitrogen-top-dressing in Germany. *Precis Agric*. 2008;9(3):115-131. doi:10.1007/s11119-008-9055-3

18. Gorjian S, Ebadi H, Trommsdorff M, Sharon H, Demant M, Schindele S. The advent of modern solar-powered electric agricultural machinery: A solution for sustainable farm operations. *J Clean Prod.* 2021;292:126030. doi:10.1016/j.jclepro.2021.126030
19. Andújar JM, Segura F. Fuel cells: History and updating. A walk along two centuries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2009;13(9):2309-2322. doi:10.1016/j.rser.2009.03.015
20. Ghobadpour A, Boulon L, Mousazadeh H, Malvajerdi AS, Rafiee S. State of the art of autonomous agricultural off-road vehicles driven by renewable energy systems. *Energy Procedia.* 2019;162:4-13. doi:10.1016/j.egypro.2019.04.002
21. VitiBot. Bakus. <https://vitibot.fr/robots-viticoles-bakus/bakus-s/?lang=it>.
22. Sitia. Trektor. <https://www.sitia.fr/en/innovation-2/trektor/>.
23. Naio Technologies. Ted. <https://www.naio-technologies.com/en/ted/>.
24. Free Green Nature. Icaro x4. <https://www.freegreen-nature.it/>.
25. v. Saiz-Rubio, F. Rovira-Mas, M.P. Diago, et al. VINESCOUT: A VINEYARD AUTONOMOUS ROBOT FOR ON-THE-GO ASSESSMENT OF GRAPEVINE VIGOUR AND WATER STATUS. Published online 2020.
26. Trattori Web. Robot agricoli, a cavallo del filare. Ecco cinque modelli già pronti per il mercato. <https://www.trattoriweb.com/robot-agricoli-ecco-cinque-modelli-gia-pronti-per-il-mercato/>.
27. Grimstad L, From P. The Thorvald II Agricultural Robotic System. *Robotics.* 2017;6(4):24. doi:10.3390/robotics6040024
28. Earth Automation. Dood. <https://www.earthautomations.com/prodotto/>.
29. Trattori Web. Dood, scende in campo il robot agricolo di Earth Automations. <https://www.trattoriweb.com/dood-scende-in-campo-il-robot-agricolo-di-earth-automations/>.
30. Damanauskas V, Janulevičius A. Differences in tractor performance parameters between single-wheel 4WD and dual-wheel 2WD driving systems. *J Terramech.* 2015;60:63-73. doi:10.1016/j.jterra.2015.06.001
31. Kolator B, Białołbrzewski I. A simulation model of 2WD tractor performance. *Comput Electron Agric.* 2011;76(2):231-239. doi:10.1016/j.compag.2011.02.002
32. Velardocchia M, Bonisoli, Galvagno, Vighiani. *Fondamenti Di Meccanica Del Veicolo.*; 2020.
33. Battiato A., Diserens E., Laloui L., Sartori L. A mechanistic approach to topsoil damage due to slip of tractor tyres. *Journal of Agricultural Science and Applications.* 2013;2(2):160-168.
34. Jenane C., Bashford L.L. Field tractive performance comparisons between a tractor operated in the 2WD and 4WD mode. Published online 1995.
35. <https://www.flashbattery.tech/tipi-batterie-litio-quale-chimica-utilizzare/>.
36. <https://www.mpoweruk.com/lithiumS.htm>.

37. Qiu Q, Fan Z, Meng Z, et al. Extended Ackerman Steering Principle for the coordinated movement control of a four wheel drive agricultural mobile robot. *Comput Electron Agric.* 2018;152:40-50. doi:10.1016/j.compag.2018.06.036
38. Genta G. Conventional and slip steering for multi-wheel planetary rovers . Published online 2010.
39. Bak T, Jakobsen H. Agricultural Robotic Platform with Four Wheel Steering for Weed Detection. *Biosyst Eng.* 2004;87(2):125-136. doi:10.1016/j.biosystemseng.2003.10.009
40. Wang Z. *DEGREE PROJECT VEHICLE ENGINEERING.*; 2018.
41. Trelleborg. *PneuTrac Vigneti E Frutteti.*; 2014.