



**Politecnico
di Torino**

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**Progettazione e simulazione di rover
elettrici a guida autonoma per
applicazioni agricole**

Relatore:
Prof. Aurelio Somà

Candidato:
Mattia Scanavino

Correlatori:
Dott. Salvatore Martelli
Ing. Francesco Mocera

Anno Accademico 2022/2023

”alla mia Famiglia”

Abstract

La crescente domanda di prodotti alimentari sostenibili e la necessità di ridurre l'impatto ambientale dell'agricoltura hanno portato a una crescente attenzione verso l'automazione e l'innovazione tecnologica nell'ambito agricolo, mettendo in evidenza l'importanza di ridurre l'uso di carburanti fossili e di ottimizzare il processo di coltivazione.

La presente tesi di laurea si concentra sulla progettazione e simulazione di rover elettrici a guida autonoma destinati ad applicazioni agricole, con l'obiettivo di migliorare l'efficienza e la sostenibilità delle operazioni agricole. Si inizia esplorando le sfide e le opportunità dell'agricoltura moderna, valutando le attuali offerte di mercato in tale settore.

Successivamente, ci si concentrerà sulla progettazione di una possibile soluzione di rover elettrico, analizzando le caratteristiche e i requisiti necessari per soddisfare le esigenze specifiche del settore agricolo dove si intende operare, in questo caso vigneto e frutteto. Si dividerà quindi il veicolo in una serie di sotto parti, andando per ognuna ad analizzare le possibili scelte progettuali e componentistiche.

Al termine di questa ricerca, verranno eseguite simulazioni multibody per valutare le prestazioni del rover precedentemente ideato in varie condizioni agricole, al fine di verificare possibili criticità durante il movimento, come per esempio il ribaltamento, causa ogni anno di molti incidenti.

I risultati della tesi dimostrano che i rover elettrici rappresentano una soluzione promettente per aumentare l'efficienza e la sostenibilità dell'agricoltura. La progettazione e la simulazione giocano un ruolo chiave nel perfezionare tali veicoli per applicazioni agricole, aprendo la strada a un futuro in cui l'agricoltura intelligente e sostenibile è alla portata di tutti.

Indice

1	Introduzione	8
2	Stato dell'arte dei rover	11
2.1	Introduzione	11
2.2	Categoria dimensionale	11
2.3	Tipologia di trazione e struttura	12
2.4	Scopo del veicolo	16
2.5	Principali modelli presi in esame	19
2.5.1	Vitibot	19
2.5.2	Naio Technologies	21
2.5.3	Burro	23
2.6	Scelte operative del progetto	25
3	Il Rover	28
3.1	Progetto	28
3.1.1	Telaio principale	29
3.1.2	Sistema di movimentazione	33
3.1.3	Sistema di accumulo (ESS)	45
3.1.4	Sistemi di bordo	50
4	Simulazione multibody	55
4.1	Introduzione alle simulazioni multibody	55
4.2	La simulazione	57
4.3	Il modello	59
4.3.1	Realizzazione modello del veicolo	59
4.3.2	Modello complessivo e vincoli	62
4.3.3	Contatti	65
4.3.4	Definizione della traiettoria e Dummy Body	65
4.3.5	Terreno e Ostacoli	66
4.3.6	Controllo del veicolo	67
4.4	Tilt test	70
4.5	Ramp Test	74
4.6	Overturn Test	79
5	Conclusione e Sviluppi futuri	83
	Bibliografia	89

Elenco delle figure

1.1	Evoluzione della tecnica agricola negli anni [3][4][5][6]	9
1.2	Logo Ecothea S.r.l.	9
1.3	Schema esemplificativo del "precision farming" e dell'innovazione nel settore agricolo [10]	10
2.1	Percentuale di categoria dimensionale sull'intero campione	12
2.2	Possibile configurazione di una ruota "fissa" (sinistra) e una configurazione "pivottante" (a destra) [13]	13
2.3	Esempi di tipologia di trazione e struttura [14][15][16][17][18][19][20][21]	14
2.4	Percentuale delle varie strutture sulla totalità dei mezzi analizzati	15
2.5	Percentuale delle varie strutture sulle varie categorie analizzate	16
2.6	Esempio di un mezzo a singolo scopo, a sinistra, e di uno multiscopo, a destra [22][23]	17
2.7	Percentuale dello scopo dei mezzi sulla totalità dei mezzi analizzati	17
2.8	Percentuale dello scopo dei mezzi sulle categorie dimensionali analizzate	18
2.9	Rover Bakus della Vitibot nella taglia S (a sinistra) e L (a destra) [24]	19
2.10	Schema esplicativo di organizzazione dei filari a ritocchino (a destra) e a girapoggio (a destra) [25]	20
2.11	Rover Bakus durante un'operazione di sarchiatura su un vigneto [24]	21
2.12	Logo dell'azienda riportato su uno dei suoi veicoli[16]	22
2.13	Veicoli progettati dalla Naio, Ted (alto a sinistra), Jo (basso a sinistra), Oz (alto a destra) e Orio (basso a destra)[16]	22
2.14	Rover Burro nella sua configurazione base di trasporto [26]	23
2.15	Esempio di utilizzo del rover Burro in agricoltura [26]	24
2.16	Esempio di veicolo modulare prodotto dalla Milrem Robotics [27]	25
2.17	Esempio rappresentativo dell'agricoltura di precisione [29]	26
2.18	Esempio di rover modulare a quattro ruote fisse prodotto dalla cinese XAG [30]	26
3.1	Alcuni esempi di telaio realizzati durante la fase di sviluppo	29
3.2	Elemento principale del telaio del veicolo, realizzato con tubolari saldati	29
3.3	Esempio di telaio con "culla" sottostante saldata al telaio principale	30
3.4	Esempio di telaio con "culla" sottostante bullonata al telaio principale	30
3.5	Esempio di trattore con attacco a tre punti e PTO [31]	31
3.6	Telaio del rover con pianale posteriore e castello anteriore	31
3.7	Esempio di supporti antivibranti usati nell'industria [32][33]	32
3.8	Schema rappresentativo di sterzata mediante torque vectoring	33
3.9	Esempio di motore asincrono (a sinistra) e sincrono (a destra) [34][35]	34
3.10	Tabella riassuntiva dei motori sincroni a magneti permanenti	34

3.11	Tabella riassuntiva dei motori asincroni	35
3.12	Esempi di motori sincroni collegati al loro relativo azionamento [36][37]	35
3.13	Andamento della potenza richiesta dal singolo motore in funzione della velocità e della pendenza	37
3.14	Andamento della coppia richiesta dal singolo motore in funzione della velocità e della pendenza	38
3.15	Esempio di riduttore epicicloidale [39]	38
3.16	Esempio di montaggio del motore in asse con la ruota	39
3.17	Esempio di montaggio del motore in modo perpendicolare all'asse ruota	39
3.18	Esempio di strutture di supporto ruota proposte	40
3.19	Supporto ruota nella sua versione più avanzata	40
3.20	Esempio di spine commerciali (a sinistra) ed esempio del loro montaggio (a destra) [40][41]	41
3.21	Gruppo ruota nella sua versione più avanzata	42
3.22	Esempio di motofresa Grillo con le relative ruote a lisca di pesce [42][43]	42
3.23	Schema rappresentativo del collegamento delle componenti elettriche all'interno del veicolo	43
3.24	Esempio di inverter commerciali [44][45]	44
3.25	Andamento dell'energia totale richiesta, nella condizione di utilizzo con- tinuativo alla massima potenza in funzione di velocità e pendenza	45
3.26	Schema rappresentativo di un terreno con doppia pendenza utilizzato per la valutazione del ciclo di lavoro	46
3.27	Modello CAD della batteria per la valutazione degli ingombri	48
3.28	Esempio costruttivo di una PDU commerciale [46]	48
3.29	Esempio di un relè per alte correnti in DC (a sinistra) e due esempi di fusibili (a destra) [47][48][49]	49
3.30	Esempio di una batteria 12V, simile a quella predisposta nel veicolo [50]	49
3.31	Esempio di Dc-Dc converter per basse correnti (a sinistra) e per alte cor- renti (a destra) [51][52]	50
3.32	Esempio di una centralina veicolo (a sinistra) e di un computer di bordo (a destra) [53][54]	51
3.33	Vari esempi dei sensori presi in esame per l'installazione sul veicolo [56][57][58][59]	51
3.34	Esempio di funzionamento di un sistema RTK con relativo hardware [61][62]	53
3.35	Esempio di telecamere multispettarli (a sinistra) e di luci proposte (a destra) [63][64]	54
4.1	Esempio di applicazioni di un sistema multibody [65]	55
4.2	Esempio di due casi di ribaltamento in agricoltura [67] [68]	57
4.3	Telaio realizzato su Adams con profili cavi	59
4.4	Giunzioni tra i profilati realizzate su Adams (a sinistra) e su Solidworks (a destra)	60
4.5	Montanti realizzati su Adams e inseriti nel modello	61
4.6	Modello delle ruote inserite su Adams	61
4.7	Modello della batteria montato sul telaio	62
4.8	Simbolo del vincolo rigido	63
4.9	Simbolo rappresentativo del Bushing Joint	63

4.10	Tabella riassuntiva dei parametri assegnati al bushing joint	64
4.11	Modello del veicolo completo realizzato su Adams	64
4.12	Tabella dei valori di contatto utilizzati	65
4.13	Modello del Dummy Body realizzato sul software Adams	66
4.14	Modello della simulazione con presenza di ostacolo e traiettoria	66
4.15	Posizionamento dell'ostacolo sul terreno nel modello	67
4.16	Schema esemplificativo dell'applicazione del torque vectoring	68
4.17	Schema esemplificativo del calcolo di $\dot{\theta}$	69
4.18	Istanti relativi alla prima simulazione	70
4.19	Grafico relativi alla posizione angolare e alla velocità di rotazione del rover nella prima prova	71
4.20	Blocco inserito nel modello al fine di eliminare la traslazione verso il basso del rover	71
4.21	Istanti relativi alla simulazione con il blocco alla traslazione delle ruote	72
4.22	Grafico relativi alla posizione angolare e alla velocità di rotazione del rover nella seconda prova	72
4.23	Modello a pendenza crescente del terreno	74
4.24	Esempio di variazione del parametro α	74
4.25	Test eseguito a 2 <i>km/h</i> , pendenza 22%	75
4.26	Test eseguito a 2 <i>km/h</i> , pendenza 25%	76
4.27	Test eseguito a 5 <i>km/h</i> , pendenza 22%	76
4.28	Test eseguito a 5 <i>km/h</i> , pendenza 25%	77
4.29	Test eseguito a 10 <i>km/h</i> , pendenza 22%	77
4.30	Test eseguito a 10 <i>km/h</i> , pendenza 25%	77
4.31	Tabella riassuntiva dei risultati del Ramp Test	78
4.32	Modello utilizzato per l'overturn test	79
4.33	Esempio di una prova con veicolo in incipiente ribaltamento	80
4.34	Curve relative alle prove di ribaltamento a differenti altezze di ostacolo	81
4.35	Schema dei due impatti	81
5.1	Esempio di struttura possibile del rover	83
5.2	Esempio di rover autonomo prodotto dalla AgXeed [76]	84
5.3	Esempio di rover con ruote indipendenti della Exxact Robotics [78]	85

Capitolo 1

Introduzione

L'agricoltura è un settore che da sempre è stato caratterizzato dall'impiego di lavoro manuale al fine di realizzare le più svariate operazioni. Sin dai tempi antichi è stato necessario lavorare la terra al fine di poter ottenere cibo da consumare oppure da commerciare. Questa attività ha da sempre richiesto la presenza di molte persone, sia per le ampie superfici da lavorare, sia per la gravosità dei compiti svolti.

Come ogni processo e attività umana, anch'esso nei vari secoli ha subito dei cambiamenti. Partendo dalla condizione del puro lavoro "umano", si è poi passati agli animali, utilizzando cavalli e buoi che, attraverso opportuni attrezzi ad essi collegati, permettevano di realizzare operazioni massive del terreno, migliorando le condizioni di lavoro e la resa dei campi.

Dopo questa evoluzione, si deve attendere gli ultimi anni del 1800 per avere i primi trattori utilizzati in campo agricolo direttamente in campo [1]. Prima di questi anni infatti c'erano stati dei tentativi di realizzare macchine operatrici, ma queste erano per lo più macchine stazionarie, adatte sì a svolgere compiti agricoli, ma non lavorazioni del terreno. Da qui in poi, queste macchine conosceranno una marcata evoluzione che le porterà sino a giorno d'oggi. Con l'avvento di questi mezzi meccanici il settore agricolo ha visto un importante cambio di rotta in termini di numero di lavoratori e di produzione [2]. Questa evoluzione ha interessato sia le colture in campo aperto, quali per esempio grano, mais e cereali, sia le colture "a filare", quali per esempio frutteti e vigneti.

Sebbene queste colture vengano entrambe interpretate come agricole, le lavorazioni da effettuare e la loro gestione sono profondamente diverse. Da un lato troviamo grandi appezzamenti di terra, da lavorare mediante trattori potenti e grandi attrezzature, mentre dall'altro troviamo piccole/medie colture, da lavorare con trattori compatti e agili, in grado di muoversi senza problemi tra i vari filari.

Dal punto di vista del lavoro manuale nel campo aperto la maggior parte delle lavorazioni sono eseguite meccanicamente. La preparazione del terreno, la semina, l'irroramento e la raccolta vengono eseguite da al più un paio di persone, che guidando vari mezzi con opportune attrezzature, riescono a svolgere una quantità di lavoro pari a quella di moltissimi lavoratori manuali.

Nei filari invece questo cambiamento da manuale a meccanizzato non è ancora del tutto completo. Sebbene infatti ad oggi i trattori e le attrezzature vengano ampiamente utilizzate, esistono dei compiti che devono ancora essere eseguiti a mano. Lavorazioni quali la potatura, la legatura e la raccolta per esempio, devono ancora oggi essere eseguite manualmente, o meglio, ci sono dei tentativi commerciali che realizzano questi compiti, ma questi sono ancora in fase di evoluzione e sviluppo.



Figura 1.1: Evoluzione della tecnica agricola negli anni [3][4][5][6]

Da quanto analizzato sopra, si evince come ad oggi, sebbene si sia ridotto drasticamente il numero di persone che lavorano nel settore agricolo, rimane fondamentale la presenza di addetti atti alla conduzione dei mezzi, in gran parte molto specializzati a causa di attrezzatura e veicoli sempre più complessi. Spostandosi sulle operazioni manuali di raccolta e potatura, invece, troviamo manodopera poco specializzata, molte volte sottopagata e sfruttata.

Ciò ha portato al pensiero ormai largamente diffuso di realizzare veicoli agricoli autonomi, in grado di operare senza la supervisione umana, alleggerendo il carico di lavoro agli addetti e inoltre aumentare la produzione, potendo acquistare più mezzi da far lavorare in contemporanea. Quest'ultimo punto risulta essere molto importante e attuale, poiché ad oggi siamo circa 7,5 miliardi di persone e ci si aspetta che nel 2050 saremo circa 9,8 miliardi [7], di conseguenza sarà necessario incrementare la produzione agricola per soddisfare l'aumento di richiesta senza aumentare in modo eccessivo i costi [8].

La presente esperienza è stata portata avanti presso Ecothea S.r.l., una azienda Torinese che da qualche anno si occupa di coniugare i macchinari off-road, come per esempio trattori, da sempre fedeli ad una alimentazione mediante combustibili fossili, con una visione più sostenibile, quale l'elettrico. L'azienda, infatti, sta attualmente cercando il perfetto connubio tra le due tipologie di alimentazione per compiere la cosiddetta "transizione energetica".



Figura 1.2: Logo Ecothea S.r.l.

In questo panorama si è quindi scelto di andare a progettare un piccolo rover agricolo, in grado di alleggerire il carico di lavoro da parte degli addetti, oltre che monitorare lo stato di salute delle colture. Su quest'ultimo aspetto ci si è concentrati a seguito della necessità sempre più reale di diminuire l'utilizzo di composti sintetici e diserbanti, favorendo la cosiddetta "agricoltura di precisione". In questa pratica, grazie ad a regolazione

continua delle tarature degli attrezzi utilizzati e a delle lavorazioni mirate, si riesce ad aumentare le rese sul campo, diminuire la costi di produzione, rendendo l'agricoltura efficiente e sostenibile [9]. Tale ricerca è volta allo sviluppo di mezzi adatti da una parte sui grandi appezzamenti, mentre dall'altra su campi di piccole/medie dimensioni. Questa differenziazione nasce dalla stessa necessità espressa precedentemente in ambito dei mezzi agricoli tradizionali, ovvero il movimento e le necessità della coltivazione. Dovendo dunque scegliere un campo di sviluppo in cui procedere, si sono scelte le piccole medie culture. Questo deriva dal fatto che il mezzo da realizzare risulta essere di dimensioni più contenute, con una potenza installata a bordo sicuramente inferiore e quindi più gestibile dal momento che risulterà essere un prototipo. Tuttavia si è consci del fatto che tale sviluppo potrà essere successivamente applicato a colture da campo aperto, poiché le tecnologie utilizzate saranno simili o addirittura uguali. Nella presente trattazione si

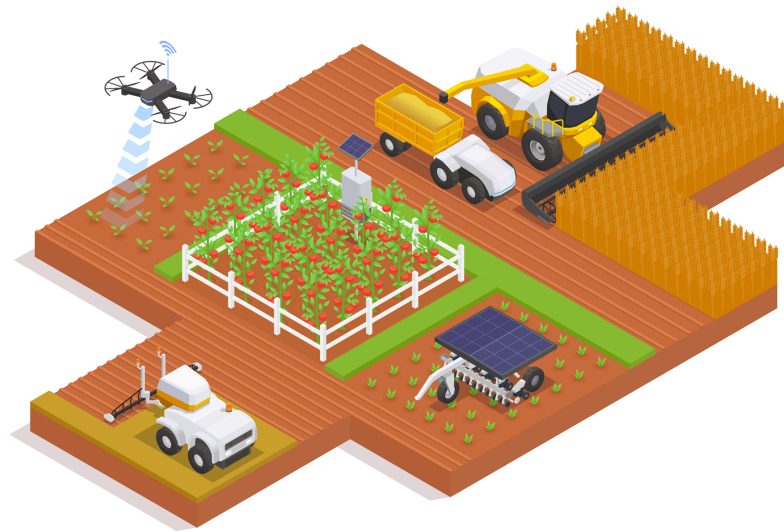


Figura 1.3: Schema esemplificativo del "precision farming" e dell'innovazione nel settore agricolo [10]

procederà in primo luogo ad analizzare lo stato dell'arte dei rover agricoli, andando a valutare le varie caratteristiche che essi possiedono in base al compito svolto. Tale ricerca è utile per delineare una possibile strada di sviluppo. Dal momento che le scelte fatte su ogni mezzo sono state concepite per una ragione specifica, si è cercato di prendere in considerazione le scelte "migliori" e di riportarle nel progetto finale. Dopo l'analisi infatti verranno stilata delle caratteristiche fondamentali che il veicolo dovrà possedere e su quelle verterà poi la fase di progettazione. Durante questa fase verrà elaborato il concept del veicolo, realizzando la sua struttura su software CAD. Ovviamente, al fine di renderlo realizzabile in un futuro, è stato necessario ricercare i componenti commerciali da installare, confrontare le varie soluzioni individuate al fine di scegliere la migliore. Una volta definita la struttura del rover quindi, si procederà alla modellizzazione di questo sul software multibody Adams View®. Tale implementazione servirà per andare a simulare il comportamento del rover durante alcune fasi di lavorazione. Il programma utilizzato permette di realizzare in ambiente virtuale il veicolo, sia dal punto di vista del movimento che della struttura, intesa come massa e geometria. Ciò permetterà di valutare la dinamica, ottenendo informazioni utili sia sul capacità effettiva di compiere alcune manovre, sia il rischio di un eventuale ribaltamento. Proprio su quest'ultimo aspetto si cercherà quindi di ottenere alcuni andamenti, al fine di comprendere ed eventualmente in futuro prevenire, possibili casi di ribaltamento.

Capitolo 2

Stato dell'arte dei rover

2.1 Introduzione

Nel panorama agricolo attuale, sono presenti numerosi esempi di rover autonomi. Dopo una ricerca sul web, sono stati individuati un totale di 69 rover, alcuni già commercializzati, mentre altri allo stato prototipale. Ovviamente tale ricerca è stata fondamentale per individuare una possibile struttura del rover da realizzare, poiché come una specie di "evoluzione", essi tendono ad adattarsi ai compiti da svolgere. Al fine di realizzare un'analisi il più possibilmente oggettiva, si sono suddivisi i vari rover secondo tre classificazioni principali:

1. Categoria dimensionale
2. Tipologia di trazione e struttura (Gommati, Cingolati, ecc.)
3. Scopo singolo o multiplo

2.2 Categoria dimensionale

Per la categoria dimensionale si è scelto di raggruppare i veicoli in tre categorie ben definite in funzione del volume complessivo occupato dal rover, ovvero quello ottenuto andando a moltiplicare tra loro le tre dimensioni principali:

- Piccolo $\rightarrow \text{Volume} < 1 \text{ m}^3$
- Medio $\rightarrow 1 \text{ m}^3 < \text{Volume} < 10 \text{ m}^3$
- Grande $\rightarrow \text{Volume} > 10 \text{ m}^3$

Si riporta in Figura 2.1 un grafico a torta che riporta la popolarità delle tre soluzioni rispetto al totale dei veicoli analizzati. Ovviamente si è consapevoli che tale distinzione non è propriamente corretta in quanto in numerosi casi le dimensioni non sono rappresentative del reale ingombro del mezzo o della sua capacità di lavoro. Tuttavia questa distinzione è stata effettuata al fine di avere una minima possibilità di classificazione di taglia tra i vari mezzi.

Una miglior distinzione tra i vari mezzi potrebbe essere effettuata sulla potenza specifica dei mezzi, in quanto a tale valore è correlato ad una effettiva possibilità di lavorazione. La mancanza di tale specifica su molti modelli però ha reso impossibile tale classificazione.

Categoria dimensionale

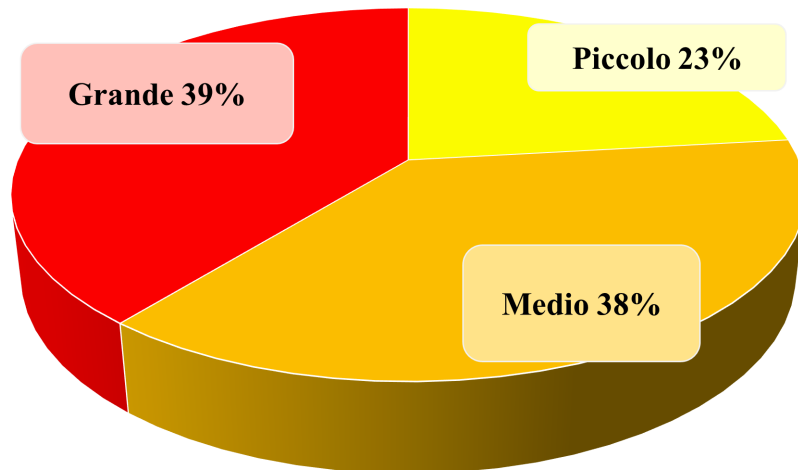


Figura 2.1: Percentuale di categoria dimensionale sull'intero campione

Come si può notare si ha una prevalenza, seppur non eccessiva, di strutture di medie e grandi dimensioni, che risultano praticamente sulla stessa percentuale, mentre le soluzioni piccole hanno circa 15 punti percentuali in meno. Ciò risulta essere ragionevole anche con la pratica agricola mondiale. Secondo la FAO statistical pocketbook [11], infatti, la maggior produzione mondiale si ha di barbabietole da zucchero, mais e grano, tutte colture che richiedono delle potenze e delle dimensioni delle trattrici medio-grandi. La coltivazione di queste, solitamente, avviene nel cosiddetto "campo aperto", ovvero senza la presenza di filari o altro, su ampi appezzamenti di terreno che, al fine di poter essere lavorati agevolmente da un contenuto numero di persone, richiede mezzi di potenze e dimensioni importanti. A tale proposito si faccia riferimento all'articolo [12] il quale riporta un metodo di stima della potenza necessaria per una singola fattoria secondo vari parametri forniti in input. Tale articolo è stato tuttavia scartato al fine di dimensionare il veicolo finale in quanto un parametro fondamentale per tale calcolo è il numero di ettari presenti nella proprietà, un parametro non disponibile in fase di progetto e soprattutto poco rappresentativo in una fase preliminare.

2.3 Tipologia di trazione e struttura

Per quanto riguarda la tipologia di trazione e di struttura, vi è la sostanziale differenza tra i mezzi cingolati e quelli su ruote. I cingolati, possiedono una struttura tradizionale, dove la movimentazione avviene mettendo in moto due "nastri" posti direttamente a contatto con il terreno. In tali sistemi la sterzata avviene attraverso un differenziale di velocità tra i due cingoli, in quanto non è meccanicamente possibile eseguire una manovra "classica", mancando di fatto un assale sterzante. Spostandosi invece alle soluzioni che utilizzano le ruote al fine far progredire il mezzo, esistono diverse configurazioni possibili:

- Quattro ruote fisse
- Quattro ruote pivottanti
- Due ruote fisse- Due ruote sterzanti
- Due ruote fisse- Due ruote pivottanti
- Quattro ruote fisse-telaio sterzante

Con l'espressione "ruota fissa" si intende una ruota che possiede il solo moto rotatorio rispetto all'asse mozzo, non è quindi in grado di eseguire una rotazione attorno ad un asse perpendicolare a questo. Una ruota pivottante invece viene identificata qualora la ruota possieda un doppio movimento, il primo attorno all'asse mozzo, il secondo attorno ad un asse perpendicolare al primo. Questo secondo grado di libertà permette alla ruota di sterzare sullo stesso asse, andando a direzionarsi secondo la direzione voluta. Nel primo caso al fine di eseguire la sterzata il veicolo dovrà possedere un assale sterzante oppure un differenziale di velocità tra le ruote destre e sinistre (simile ai cingoli); nel secondo caso invece sarà sufficiente angolare le ruote secondo la direzione di svolta desiderata.

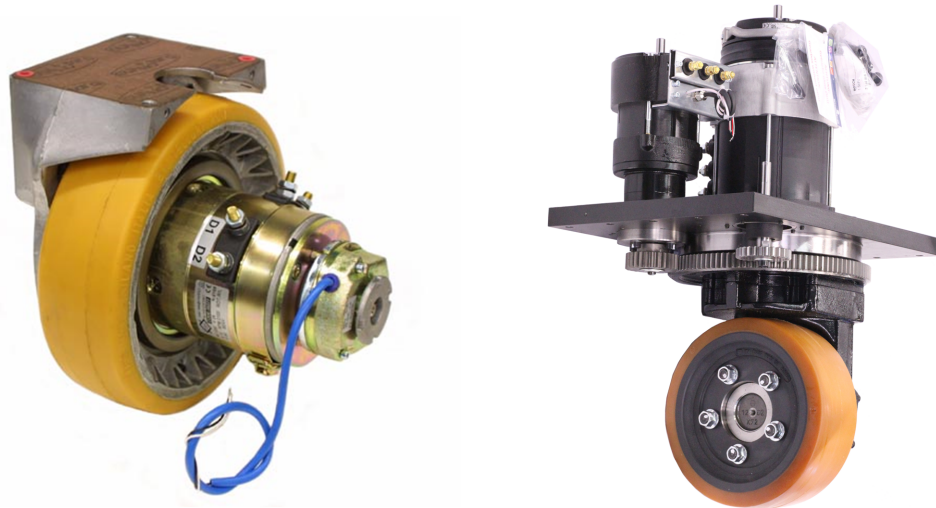


Figura 2.2: Possibile configurazione di una ruota "fissa" (sinistra) e una configurazione "pivottante" (a destra) [13]

In figura 2.3 si riporta un esempio di struttura per ogni possibile configurazione delle ruote su alcuni rover e alcuni grafici riportanti la percentuale di ogni soluzione all'interno del campione considerato. Per semplicità di trattazione e di realizzazione dei grafici, sono state riportate semplicemente le categorie più utilizzate, ovvero i cingoli, le quattro ruote fisse e le quattro ruote motrici pivottanti indipendenti, le altre configurazioni sono state raggruppate sotto la categoria "altri".

I grafici sono strutturati in modo da ritrovare a sinistra la differenza percentuale fra i cingoli e i cosiddetti gommati, ovvero i rover in cui la trazione viene eseguita su pneumatici, mentre sulla destra, a causa delle differenti categorie presenti relativamente alle ruote, troviamo un'ulteriore suddivisione in base alla tipologia. L'analisi è stata effettuata prima su ogni singola categoria dimensionale, piccola, media e grande, successivamente sulla totalità dei veicoli analizzati.

Come si può notare la configurazione "Gommati" è sempre prevalente rispetto ai "Cingolati", le quattro ruote fisse invece diminuiscono in numero con l'aumentare delle dimensioni del veicolo, mentre le quattro ruote pivottanti risultano crescere di importanza mano a mano che le dimensioni del veicolo crescono. Questi andamenti sono giustificabili sicuramente dalle masse in gioco. Su veicoli piccoli e leggeri, infatti, è comodo e semplice eseguire una sterzata attraverso un differenziale di velocità, mentre nel caso in cui gli ingombri aumentino e con essi le masse, risulta necessario introdurre una soluzione che favorisca le operazioni di sterzata. Si rimanda al paragrafo 2.6 per ulteriori approfondimenti sulla sterzata.



a) Cingolato



b) Quattro ruote fisse



c) Quattro ruote pivotanti motorizzate



d) Due ruote fisse più due ruote pivotanti libere



e) Tre ruote pivotanti motorizzate



f) Quattro ruote fisse con telaio sterzante



g) Due ruote fisse più due ruote sterzanti



h) Due ruote fisse più due ruote pivotanti motorizzate

Figura 2.3: Esempi di tipologia di trazione e struttura [14][15][16][17][18][19][20][21]

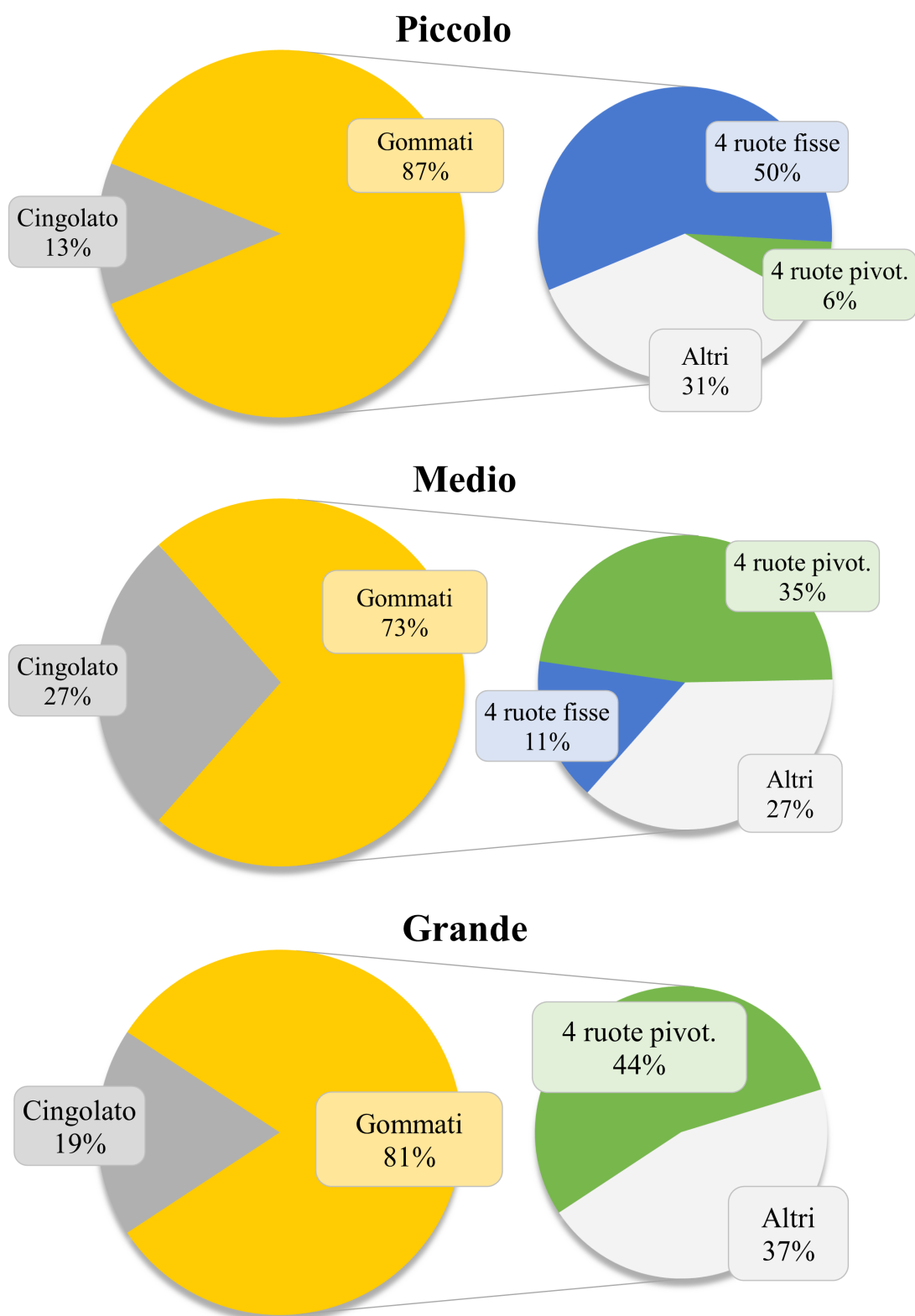


Figura 2.4: Percentuale delle varie strutture sulla totalità dei mezzi analizzati

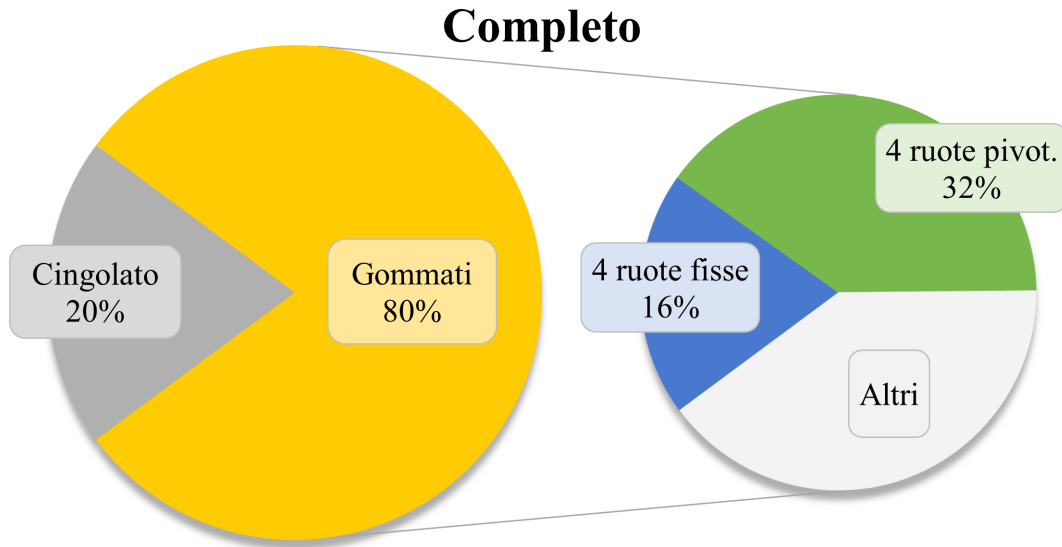


Figura 2.5: Percentuale delle varie strutture sulle varie categorie analizzate

2.4 Scopo del veicolo

Nell'ultima classificazione effettuata si è andati a definire lo scopo per il quale il rover è stato progettato. Analizzando le varie soluzioni proposte dalle case costruttrici si è notato come esse possano scegliere due "filosofie" differenti. Alcune tipologie di robot, infatti, sono stati pensati per realizzare un singolo compito, in alcuni casi anche molto di nicchia, mentre altri veicoli sono stati progettati secondo un approccio modulare, ovvero la possibilità di attacco di più attrezzature al fine di eseguire una serie di compiti. Tra le varie funzionalità realizzate dai vari rover individuiamo principalmente:

- Monitoraggio
- Trasporto
- Lavorazioni specifiche del terreno
- Lavorazioni generiche del terreno

Si fa notare come la differenza tra lavorazioni generiche e specifiche risieda nella attrezzatura utilizzata. Nel caso generico infatti vengono utilizzate attrezzature tradizionali, collegate al veicolo tramite il classico sistema a tre punti. Per le lavorazioni specifiche invece si intendono quelle operazioni che vengono svolte con attrezzi particolari oppure con un vero e proprio sistema realizzato direttamente sul veicolo. Tale distinzione è già presente nel mercato odierno, da una parte infatti troviamo macchine molto specifiche come per esempio mietitrebbie e semoventi raccogli frutta, mentre dall'altra i classici trattori che, in funzione dell'attrezzatura collegata riescono a svolgere compiti anche molto diversi.

La necessità di realizzare macchine specifiche per una singola esigenza deriva dal fatto che molte volte risulta difficile o poco efficiente progettare un'apparecchiatura che possa essere collegata alla trattrice al fine di realizzare quel compito. In questi casi l'evoluzione tecnica ha portato alla realizzazione di macchine ad hoc, il cui sviluppo è incentrato interamente per svolgere quel determinato compito.



Figura 2.6: Esempio di un mezzo a singolo scopo, a sinistra, e di uno multiscopo, a destra [22][23]

Nella figura 2.6 si nota a sinistra un cingolato realizzato per rimuovere le mandorle incolte dagli alberi mediante dei pallini scagliati con aria compressa (singolo compito), mentre a destra troviamo un rover pensato per essere compatibile con le attrezzature tradizionali e quindi che possa essere usato per una moltitudine di compiti.

Si riporta di seguito un'analisi comparativa che confronta le strutture "multi scopo" rispetto a quelle a "singolo scopo". Come nel caso precedente si è scelto di eseguire una prima analisi su tutti i modelli individuati, per poi andare a considerare invece ogni categoria dimensionale precedentemente individuata.

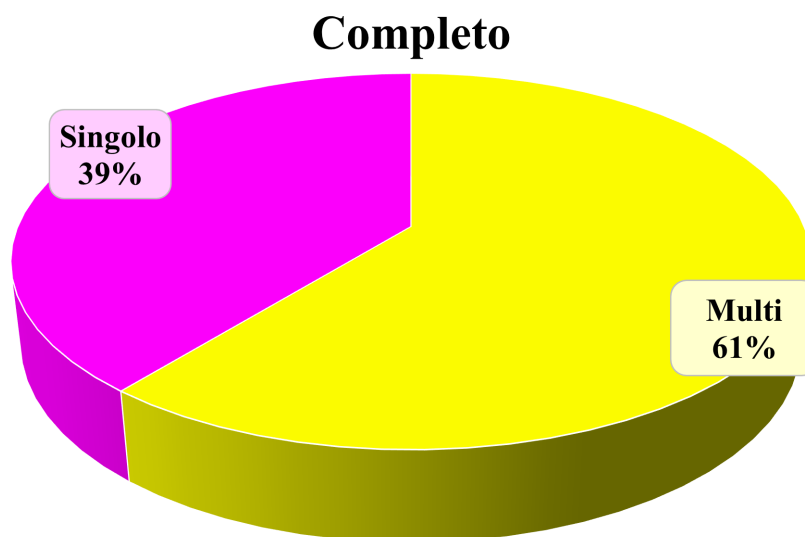


Figura 2.7: Percentuale dello scopo dei mezzi sulla totalità dei mezzi analizzati

Si noti come sulla totalità dei mezzi analizzati prevalga, seppur in maniera non eccessivamente netta, la struttura "multi scopo". Andando ad analizzare invece le varie categorie dimensionali si ha una prevalenza di veicoli specifici di piccole dimensioni che però vanno a decrescere di rilevanza con l'aumento delle dimensioni.

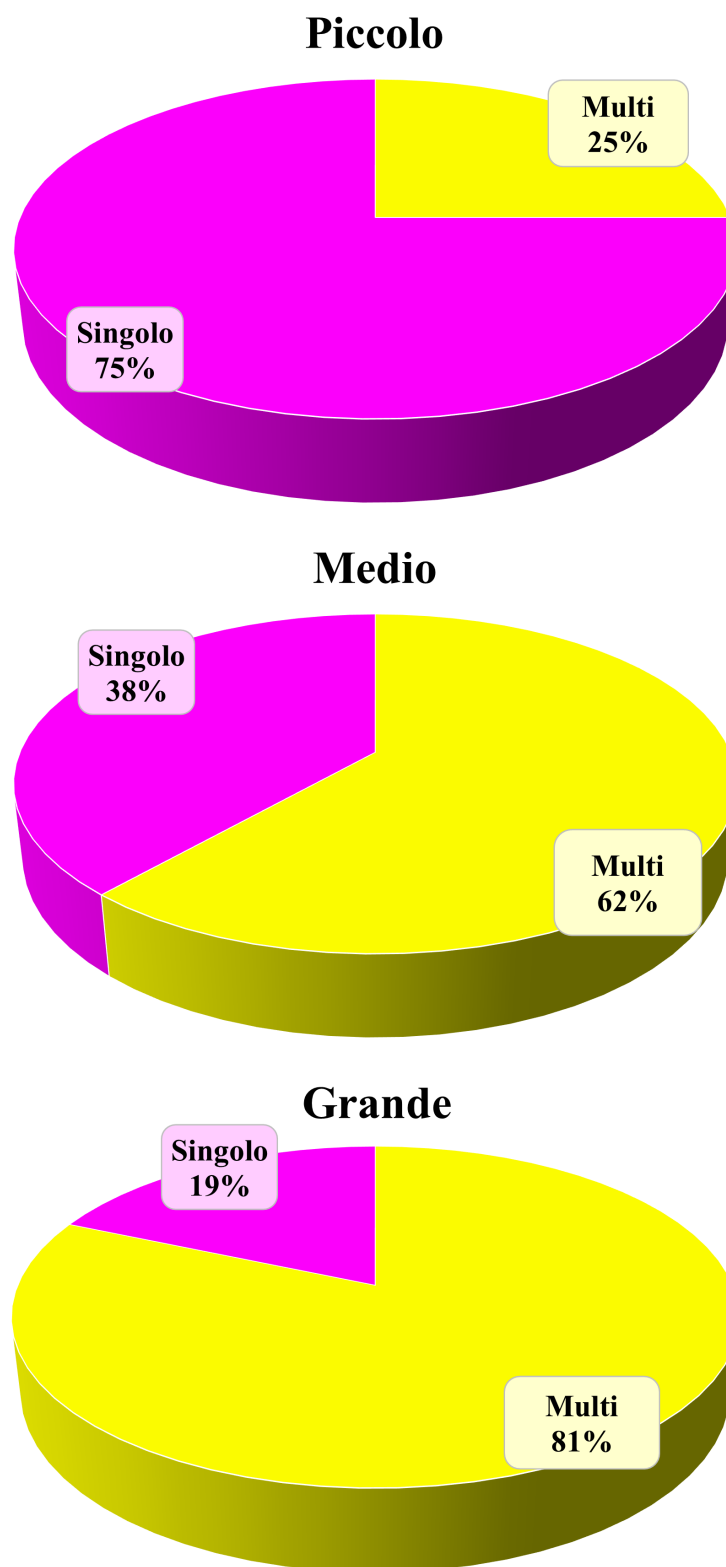


Figura 2.8: Percentuale dello scopo dei mezzi sulle categorie dimensionali analizzate

2.5 Principali modelli presi in esame

Tra i vari modelli analizzati, alcuni risultano essere più interessanti e rappresentativi rispetto ad altri. Ciò deriva dal fatto che ogni singolo rover è stato realizzato a seguito di una visione differente da parte dei progettisti, che, anche in caso di un utilizzo simile, possono comunque optare per scelte progettuali differenti. Per questo motivo è stato utile analizzare una moltitudine di veicoli al fine di avere una panoramica generale dei rover attualmente sviluppati.

Si cerca ora di riportare i veicoli più significativi tra quelli analizzati, in modo da fornire un riferimento ed un confronto per le future considerazioni. I rover scelti per tale introduzione sono:

- Il *Bakus*, realizzato dalla *Vitibot*, poiché riprende il campo di applicazione “vigneto”, di interesse nella presente trattazione. Ulteriori caratteristiche interessanti risultano poi essere la struttura scavallante e le ruote indipendenti-pivottanti.
- I rover dalla *Naio Technologies*, poiché offrono una gamma relativamente ampia di rover adatti a differenti applicazioni, che vanno dalle serre al campo aperto. Tale offerta risulta essere di grande utilità poiché mette in luce come una stessa azienda possa muoversi su scelte differenti in funzione del campo di applicazione.
- Il *Burro*, prodotto da un’azienda americana omonima, realizza un rover che, come vedremo successivamente, rispecchia una filosofia molto interessante per la presente trattazione. Tale rover infatti prevede un compito di semplice trasporto, in modo da semplificare le operazioni realizzate dal personale.

2.5.1 Vitibot



Figura 2.9: Rover Bakus della Vitibot nella taglia S (a sinistra) e L (a destra) [24]

Il robot Bakus, sviluppato dalla francese Vitibot, viene attualmente commercializzato in due taglie, S ed L, in modo da essere compatibile con diverse tipologie di coltura.

Il sistema è stato sviluppato principalmente per la lavorazione delle vigne, la sua struttura particolare è stata pensata per tale coltura e viene definita scavallante, ovvero durante

le operazioni il telaio si trova a cavallo del filare. Tale soluzione agevola la lavorazione contemporanea delle piante su entrambi i lati, ma limita l'impiego di tali sistemi ai campi opportunamente adatti. Esso, infatti, si muove in maniera agevole su terreni piani o poco pendenti, mentre nel caso di terreni collinari, le uniche lavorazioni effettuabili sono quelle in cui la sistemazione utilizzata è quella a ritocchino oppure con filari a girapoggio ma senza gradoni e con pendenza massima del 20%.

Al fine di comprendere meglio l'organizzazione di questi tipi di coltura, si riporta in figura 2.10 uno schema che definisce l'andamento dei filari nelle due principali tipologie adottate nell'organizzazione dei filari, a ritocchino oppure a girapoggio.

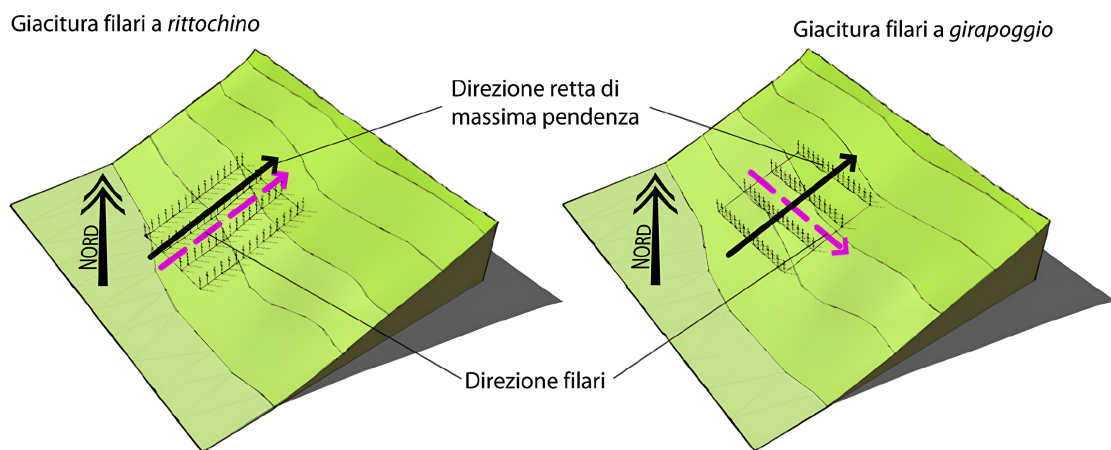


Figura 2.10: Schema esplicativo di organizzazione dei filari a ritocchino (a sinistra) e a girapoggio (a destra) [25]

Le sue dimensioni, la sua potenza e la sua struttura lo rendono adatto sia a lavorazioni massive che di precisione nell'intorno dei ceppi delle piante. L'ingombro complessivo, infatti, è molto simile a quello di un trattore tradizionale e pertanto gli utensili utilizzabili a bordo sono molto simili a quelli normalmente utilizzati in campo agricolo (ovviamente dietro opportune modifiche per l'implementazione a bordo).

Di contro la struttura scavallante risulta essere poco vantaggiosa e utilizzabile nel caso di lavorazioni su filari a girapoggio particolarmente inclinati oppure a gradoni. Inoltre eseguendo una lavorazione interfilare rimane comunque da lavorare con un ulteriore mezzo la parte centrale del filare.

Le operazioni agricole effettuabili sono:

- Diserbo meccanico con o senza dischi
- Apertura del terreno a disco o con puntello
- Rasaerba elettrico
- Interceppi elettrico
- Sarchiatrice a dita
- Aratura leggera per diserbo
- Erpicatura del terreno

Il punto di forza di questo sistema è sicuramente il sistema di movimentazione mediante quattro ruote motorizzate indipendenti, in grado di ruotare a 360°, rendendo possibile una rotazione dell'intero robot in circa 4 m.

Un altro punto di forza è sicuramente la varietà di utensili implementabili a bordo. La zona centrale infatti permette l'aggancio e la gestione di vari utensili, che possono essere attivi, ovvero movimentati da un sistema elettrico gestito direttamente dal robot, oppure attrezzi passivi, i quali effettuano lavorazioni semplicemente essendo trascinati in avanti, nel quale comunque l'altezza viene gestita in maniera continua dal robot.



Figura 2.11: Rover Bakus durante un'operazione di sarchiatura su un vigneto [24]

Tale rover è molto interessante e soprattutto fonte di molti spunti in quanto risulta essere uno tra i veicoli più avanzati in termini di sviluppo tra quelli analizzati. Inoltre è uno tra i pochi ad essere attualmente sul mercato, seppure a prezzi elevati e necessità di ambienti di lavoro opportunamente strutturati. Tuttavia la sua modularità gli permette di essere molto versatile in termini di possibili lavorazioni.

2.5.2 Naio Technologies

Questa azienda francese propone quattro soluzioni di robot a guida autonoma:

- **“Ted”**, un robot su ruote scavallante per la lavorazione delle vigne;
- **“Jo”**, un cingolato compatto per la lavorazione delle vigne;
- **“Oz”**, un robot a ruote compatto per il monitoraggio e la lavorazione dei campi;
- **“Orio”**, un robot a ruote adatto alla lavorazione in campo.

Tutti i veicoli proposti possiedono un'alimentazione completamente elettrica, un sistema di guida base basato su GPS/GNSS RTK, più alcune altre soluzioni specifiche per ogni robot. I primi due sistemi, Ted e Jo, sono pensati per applicazioni in vigneto e quindi una coltura su filari, andando ad effettuare lavorazioni tra i ceppi di vite oppure sul centro del filare. Le operazioni realizzabili sono l'ossigenazione del terreno, il rincalzo e la rimozione degli infestanti. Le due soluzioni proposte differiscono per tipo di struttura e per la zona del filare che si intende lavorare. Ted, presentando una struttura scavallante (con tutti i difetti/pregi individuati nel Baku), è adatto a lavorazioni interfilari, mentre Jo, presentando un attacco attrezzi posteriore, esegue lavorazioni sulla parte centrale del filare con attrezzi tradizionali.

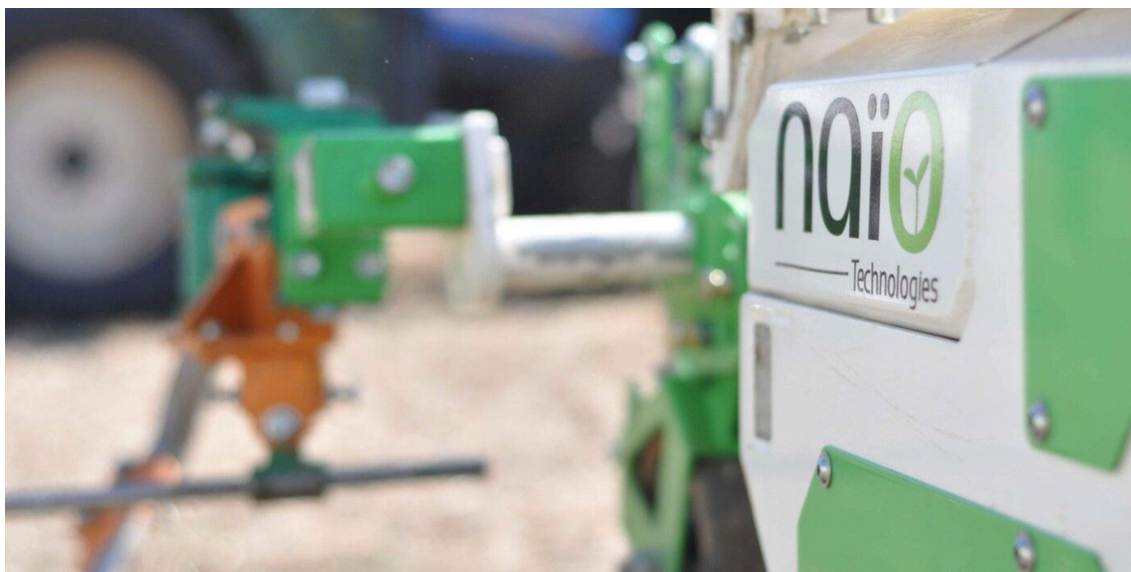


Figura 2.12: Logo dell'azienda riportato su uno dei suoi veicoli[16]

Gli altri due sistemi invece, Oz e Orio, sono adatti ad una lavorazione in campo, dove si richiedono operazioni di semina, preparazione del terreno e rimozione degli infestanti. Queste due soluzioni si differenziano principalmente per il tipo di struttura utilizzata e per le dimensioni. Correlate a quest'ultime, infatti, troviamo sia lavorazioni effettuabili, sia tipologia di coltura trattabile. Oz grazie alla sua geometria compatta, rende possibile il processamento di piccole coltivazioni, eventualmente anche in serra. Orio invece grazie alle maggiori dimensioni e alla maggiore potenza disponibile permette di lavorare contemporaneamente più solchi e quindi processare una porzione di terreno più ampia in un singolo passaggio.



Figura 2.13: Veicoli progettati dalla Naïo, Ted (alto a sinistra), Jo (basso a sinistra), Oz (alto a destra) e Orio (basso a destra)[16]

Ogni soluzione è stata studiata e valutata in modo da percepire i pregi e difetti, individuando così una possibile strada da percorrere. Come già esposto precedentemente, la moltitudine di rover prodotti ha permesso un confronto diretto tra le possibili strutture realizzative.

2.5.3 Burro

Questa Azienda americana è riuscita a sviluppare un robot autonomo molto semplice, ma allo stesso tempo utile.

Il veicolo nella sua configurazione base non è in grado di eseguire specifici compiti agricoli, tuttavia grazie alla sua struttura con un ampio pianale al di sopra del mezzo, è in grado di trasportare carichi anche relativamente pesanti. Sul retro poi è installato un gancio di traino, con il quale è possibile agganciare carrelli o altre attrezzature al fine di essere trainate. Si riporta di seguito un'immagine che riporta il veicolo sopracitato.



Figura 2.14: Rover Burro nella sua configurazione base di trasporto [26]

Il concetto base nello sviluppo di tale sistema è stato sicuramente l'alleggerimento del lavoro umano in determinate operazioni agricole, permettendo allo stesso tempo la velocizzazione di alcune operazioni.

Il veicolo è in grado di muoversi in modo autonomo grazie ai vari sensori presenti e all'algoritmo di intelligenza artificiale che opera a bordo. Sono presenti infatti diverse possibilità di lavoro a seconda della necessità degli operatori. Troviamo quindi le modalità:

- **Follow**, nel quale il rover, attraverso un sistema di visione artificiale, riesce a seguire una persona, in modo da aiutarla nell'eventuale trasporto di cassette o altri oggetti.
- **Follow Row**, in questa modalità il rover viene predisposto in modo da avanzare in modo autonomo lungo il filare. Tale soluzione può essere interessante in fase di raccolta, dove la cassetta in cui depositare i frutti deve avanzare con l'operatore a velocità relativamente fissa.
- **Autonomous Route**, in questo caso il rover segue un percorso predefinito dall'utente attraverso l'utilizzo di un sistema GPS RTK. Ovviamente i sensori di visione e di presenza di eventuali oggetti rimangono presenti al fine di evitare incidenti.
- **Scout Rows**, questa modalità può essere interessante per il monitoraggio dei filari. Quando viene utilizzata, infatti, il rover esegue una combinazione della modalità Follow Row e Autonomous Route. Il mezzo viaggia in modo autonomo tra i filari, andando ad eseguire una "esplorazione", valutando le condizioni della coltura e del raccolto attraverso i sensori posti a bordo.

Sul sito dell'azienda sono presenti numerosi video che testimoniano tutto ciò che il robot è in grado di eseguire. Si nota molto bene la modularità e la versatilità di tale mezzo. Essendo infatti una struttura molto semplice, può essere adattata e modificata secondo le esigenze, al fine di compiere una moltitudine di compiti.

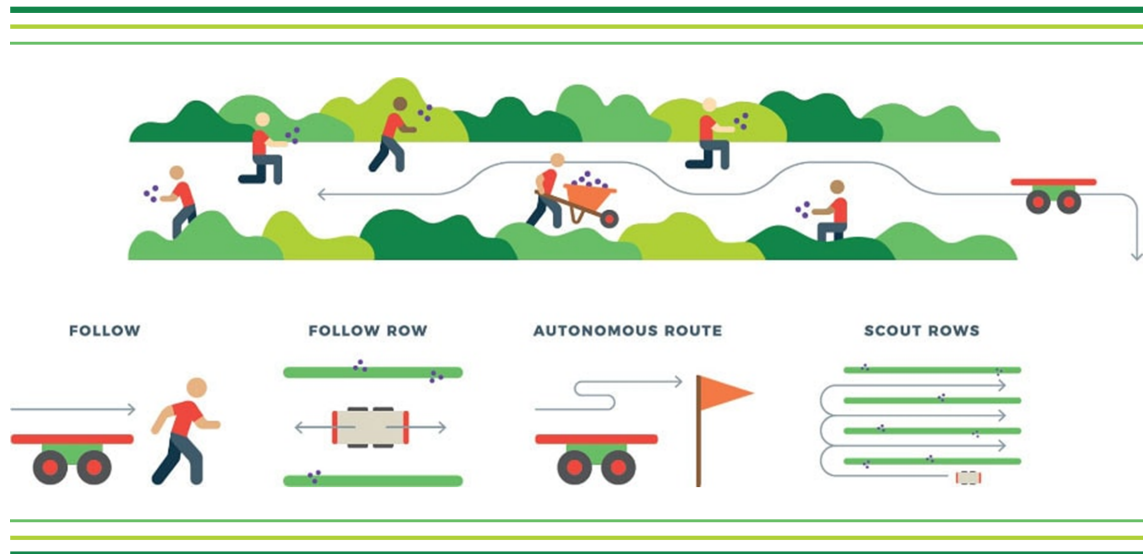


Figura 2.15: Esempio di utilizzo del rover Burro in agricoltura [26]

Il veicolo risulta essere molto vicino alla concezione di rover che si vuole sviluppare nella presente trattazione. La sua struttura risulta essere composta e realizzata da pochi componenti fondamentali, che però possono essere sufficienti per ottenere un veicolo molto utile in diversi campi.

La modularità è un concetto che verrà ripreso in più punti durante l'intera discussione, in quanto al fine di limitare al massimo il numero di veicoli presenti in un'azienda, è necessario realizzare dei veicoli multi scopo, che possano essere utilizzati in più occasioni, andando a definire uno scenario in cui il costo di acquisto possa essere ammortizzato su più fronti.

2.6 Scelte operative del progetto

Alla luce di quanto riportato nei paragrafi precedenti, si evince come si possano scegliere strade molto differenti a seconda sia dello scopo a cui verrà destinato il rover, sia delle proprie necessità progettuali. Si ricorda infatti che nella presente trattazione si sta cercando la soluzione migliore per realizzare un dimostratore tecnologico a guida autonoma, che possa essere un sistema di test per varie tecnologie e sperimentazioni.

Un filo conduttore in tale sviluppo è sicuramente la modularità. Con questa si intende la capacità del veicolo di poter essere adattato alle proprie esigenze, andando ad aggiungere/sostituire componenti in modo da renderlo adatto ad una moltitudine di compiti. Tale filosofia deve essere tenuta in considerazione durante tutta la fase di progettazione, in quanto ogni singola possibilità di modifica deve essere adeguatamente predisposta.



Figura 2.16: Esempio di veicolo modulare prodotto dalla Milrem Robotics [27]

Prendendo in considerazione i vari confronti percentuali, le necessità di realizzative e di futura applicazione analizzate nelle pagine precedenti, si è scelto di optare per:

- Rover di medie dimensioni
- Sistema a quattro ruote fisse, quindi sterzata mediante differenziale di velocità
- Operazioni di trasporto e monitoraggio

Volendo giustificare tali scelte, le dimensioni medie sono state considerate ottimali in relazione al campo di applicazione scelto (frutteto e vigneto). Questa taglia, infatti, garantisce una certa libertà in termini di un futuro sviluppo e di possibili applicazioni. Realizzando opportunamente una piattaforma base è possibile ottenere il volume necessario per installare varie attrezzature, mentre la massa complessiva, mediamente elevata, permette di utilizzare attrezzi che realizzino sia lavorazioni mediamente massive che di precisione. Quest'ultime stanno incrementando di importanza in questi ultimi anni, poiché oltre ad essere mirate, vengono eseguite con apparecchiature avanzate che oltre ad eseguire la lavorazione permettono anche la raccolta di dati sulla coltura [28]. Le ruote fisse sono state scelte per una motivazione di "semplicità", sia in termini realizzativa che di gestione software. Come si può notare infatti nella figura 2.2, la ruota pivottante o sterzante richiede una struttura più complessa. Dovendo infatti ruotare per realizzare la sterzata, deve essere presente un meccanismo che permetta tale movimentazione.



Figura 2.17: Esempio rappresentativo dell'agricoltura di precisione [29]

Questa scelta porta con sé una struttura meccanica più complessa in termini di progettazione e una gestione software che deve tenere conto di un ulteriore grado di libertà. Essendo questo veicolo allo stato “prototipale”, si è scelto di optare per una soluzione più semplice e quindi anche di più pronta realizzazione, privilegiando uno sviluppo più rapido rispetto ad una soluzione ottimale in fase di utilizzo.

Le ruote fisse non risultano essere la migliore scelta in relazione alla manovrabilità del veicolo, poiché la sterzata avviene a seguito di uno strisciamento delle ruote che oltre ad essere in alcuni casi “variabile” a seconda del tipo di terreno, effettua sicuramente un danneggiamento su quest'ultimo.

Al fine di non precludersi nessuna opzione, tuttavia, in fase di progettazione si è cercato di realizzare una struttura modulare, nel quale in futuro le quattro ruote fisse potessero essere sostituite da quattro ruote sterzanti.



Figura 2.18: Esempio di rover modulare a quattro ruote fisse prodotto dalla cinese XAG [30]

Nel confronto tra ruote e cingoli, alla fine la scelta è ricaduta sulle prime a causa di una minore complessità dal punto di vista realizzativo, in correlazione ai benefici che si otterrebbero adottando una configurazione a cingoli. Sebbene infatti quest'ultima soluzione presenti una superficie di appoggio più ampia, che garantisce una minore compattazione del terreno, la struttura correlata al moto di tale sistema risulta essere piuttosto complessa.

Tenendo quindi in considerazione lo scopo finale di questo rover, ovvero la sperimentazione di varie tecnologie a bordo, si è scelto di optare per una soluzione più semplice e "immediata" quali le ruote.

Per un motivo molto simile si è scelto come campo di applicazione principale il trasporto e il monitoraggio. Tali compiti, infatti, non richiedono attrezzature complesse o molto dispendiose dal punto di vista energetico. Per realizzarle è sufficiente prevedere un piano di carico (per il trasporto) e un sistema di telecamere adatte (per il monitoraggio).

Anche in questo caso la scelta è stata guidata dalla necessità di una realizzazione semplificata del mezzo, ma rifacendosi sempre alla modularità precedentemente citata. Pensando infatti la struttura secondo queste caratteristiche, una volta ottenuto un veicolo in grado di muoversi in modo autonomo, sarà molto semplice aggiungere una serie di funzionalità in base alle proprie esigenze.

Capitolo 3

Il Rover

3.1 Progetto

Il progetto di un veicolo o in generale di un qualsiasi sistema “complesso” può essere sicuramente analizzato sotto vari fronti. Tale procedura è la stessa che, opportunamente ribaltata, viene utilizzata in fase di sviluppo. Risulta infatti difficile partire da un “foglio bianco” e realizzare in modo diretto un progetto. Per semplificare tale processo, si può decidere di suddividere il macro oggetto, in sottocomponenti, solitamente in base alla funzione svolta. Così facendo si riesce a procedere in maniera sequenziale, andando a sviluppare prima una singola sottoparte, affrontando tutte le problematiche del caso e, una volta ultimata, si procede all’assemblaggio di tale sottosistema sul progetto principale.

Ovviamente, dovendo interagire tra loro, i vari sottocomponenti non possono essere sviluppati in modo “stagno”, pertanto in fase di progettazione si deve predisporre la loro futura interazione con il resto del macchinario. Si tratta di una valutazione preliminare, che sicuramente risulta essere poco vincolante in termini di scelte, poiché l’effettiva interazione con il resto del rover avverrà in fase di montaggio. Le principali componenti di tale progetto sono:

- Telaio principale del rover
- Sistema di movimentazione (motori, riduttori, inverter)
- Sistema di alimentazione (ESS)
- Sensoristica e componentistica per la guida autonoma e per il controllo
- Altri sistemi di bordo (batteria 12V, ruote, luci, ecc)

Si andrà ora ad analizzare ogni sottopunto, in modo da esplicitare la logica che ha portato alle varie scelte, sia in termini strutturali che di componentistica. Essendo ancora nello stato prototipale, la definizione delle varie parti talvolta risulta approssimativa, pertanto in fase di sviluppo si è cercato di portare sempre avanti un ventaglio più o meno ricco di possibilità. Questo ha permesso di lavorare in modo asincrono sulle varie parti, andando poi a confrontarsi in modo diretto durante le fasi decisionali, in modo da comprendere quale fosse la soluzione migliore da implementare a seguito di una valutazione globale del sistema. Come si potrà notare alcune immagini utilizzate in seguito non saranno collegabili in modo diretto al rover “finale”, ma sono rappresentative del percorso seguito, in quanto ogni proposta è stata una possibile soluzione elaborata durante la fase di sviluppo.

3.1.1 Telaio principale

Questo componente rappresenta la struttura portante dell'intero sistema. Esso infatti costituisce l'elemento principale a cui, in seguito, verranno aggiunte tutte le altre sotto-parti. Nonostante tutte queste necessità, si è cercato di realizzare un telaio semplice, ma modulare, in modo da poter essere adattato ad ogni futura necessità.

Nella letteratura i telai possono essere realizzati secondo diverse filosofie, in questo caso si è optato per un saldato, costituito da profili tubolari, che riescono a ridurre il peso garantendo comunque un buon livello di rigidità.

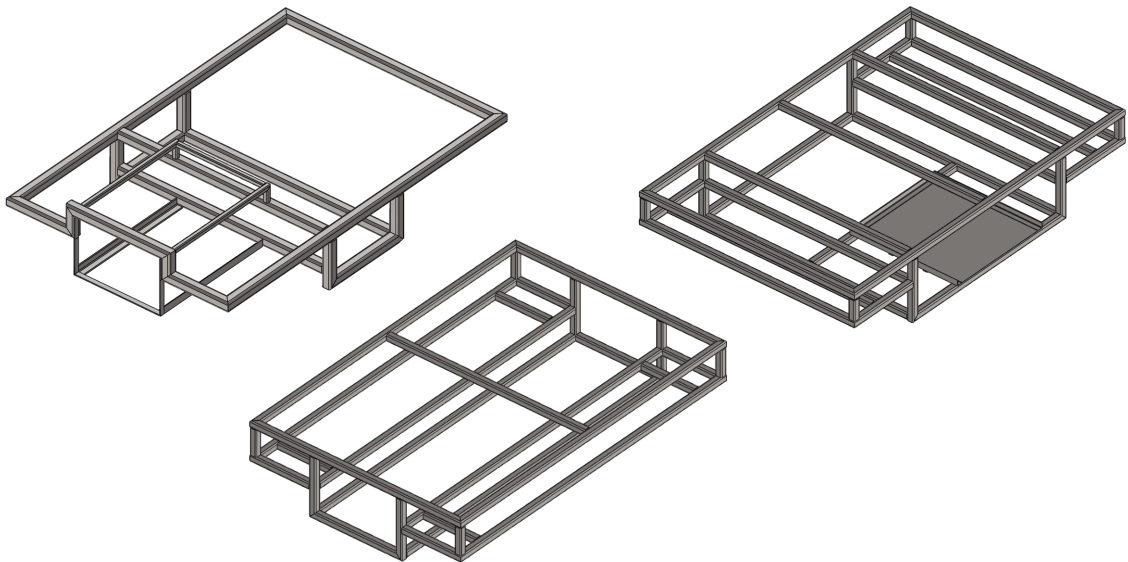


Figura 3.1: Alcuni esempi di telaio realizzati durante la fase di sviluppo

Dopo una serie di idee e di valutazioni, si è scelto di procedere con dei tubolari quadrati/rettangolari, realizzando una struttura principale più robusta al quale successivamente collegare tutte le ulteriori componenti.

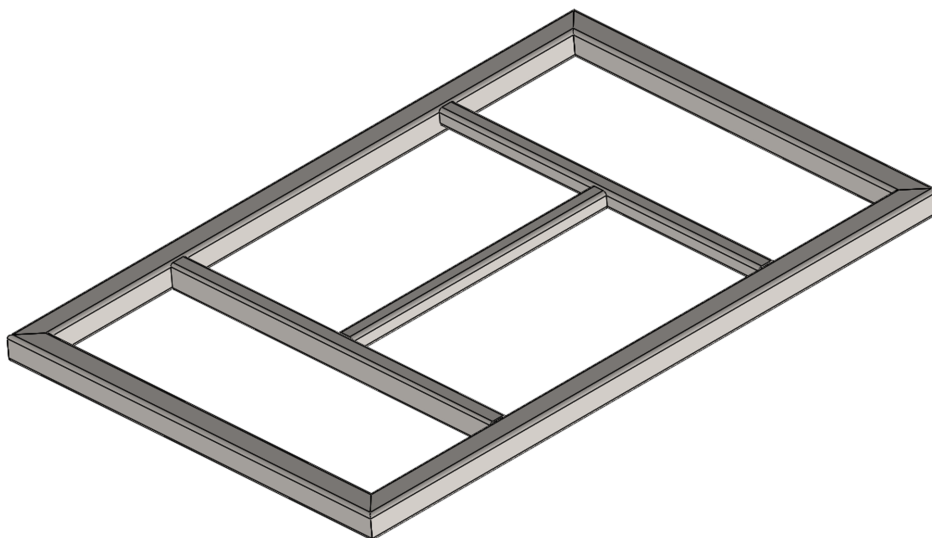


Figura 3.2: Elemento principale del telaio del veicolo, realizzato con tubolari saldati

Come si può notare nella figura 3.2, la struttura principale è stata realizzata con un anello di tubolari quadrati cavi, al cui interno sono stati inseriti dei rinforzi, per aumentare la rigidità del telaio. Questo anello rappresenta la componente base del telaio del rover e su di esso verranno poi vincolate tutte le successive componenti. Al fine di ricavare uno spazio nella zona sottostante al telaio, dove alloggiare le batterie e parte dell'elettronica, è stata pensata una soluzione "a culla". L'idea iniziale è stata quella di saldare al di sotto del telaio principale una struttura, sempre realizzata attraverso tubolari, di sezione questa volta inferiore, in grado di assolvere questa richiesta richiesta.

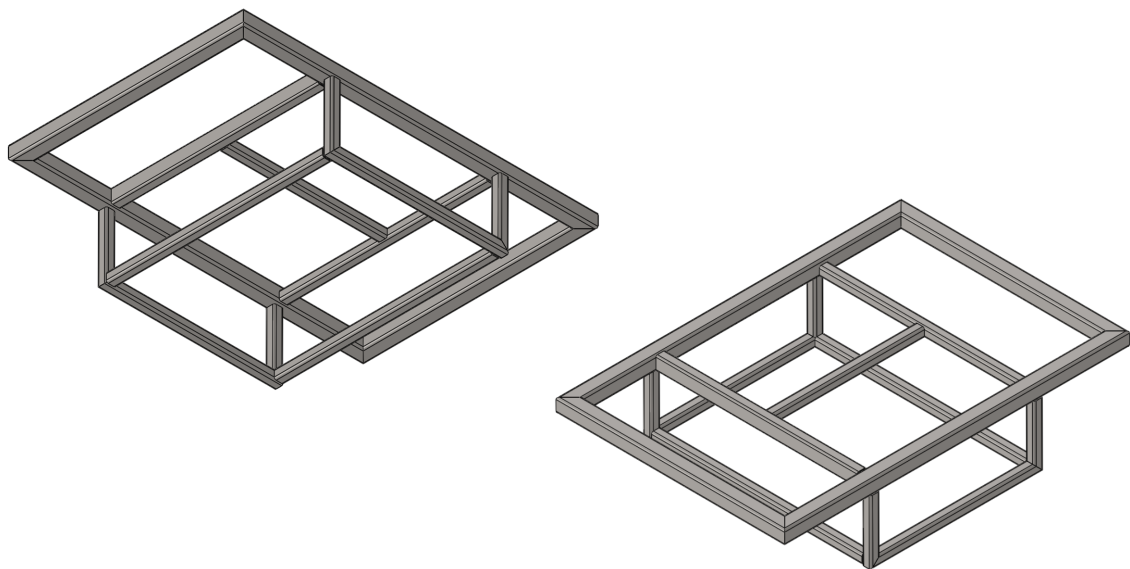


Figura 3.3: Esempio di telaio con "culla" sottostante saldata al telaio principale

Tale vincolo (la saldatura) tuttavia, a seguito di una serie di valutazioni, non permette un montaggio agevole di tutto il pacco batterie e dell'elettronica di bordo. Per ovviare a questo si è scelto di rimuovere la saldatura a favore di una giunzione bullonata, la quale permette di assemblare i vari componenti sulla culla e solo successivamente collegare questo sotto assieme al telaio principale.

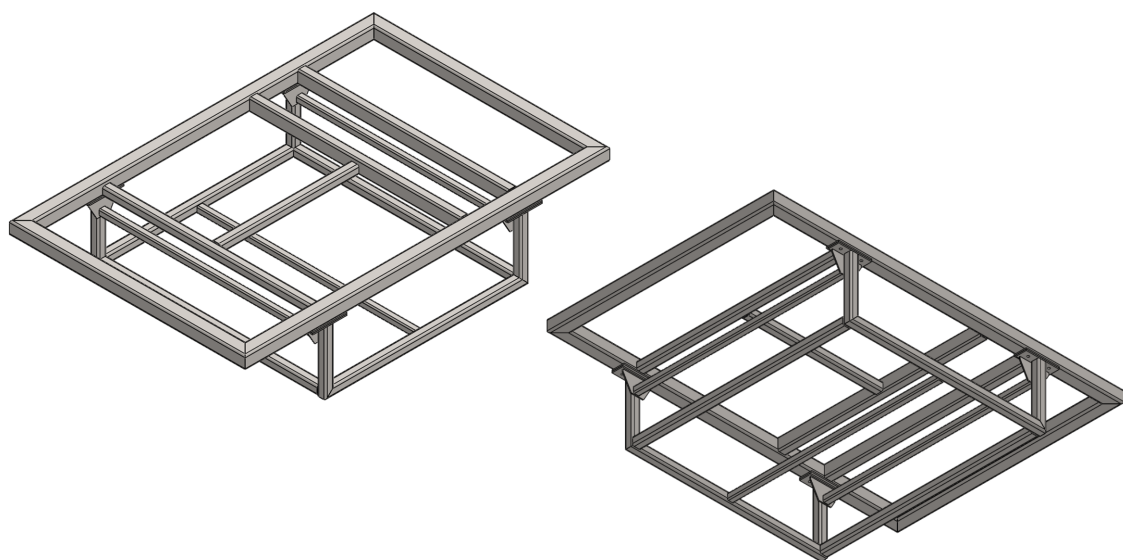


Figura 3.4: Esempio di telaio con "culla" sottostante bullonata al telaio principale

Rispetto a molti rover analizzati si è scelto di non implementare a bordo del primo prototipo delle soluzioni che permettessero il collegamento di attrezzi tradizionali. Al primo veicolo, infatti, sono state assegnate operazioni di monitoraggio e trasporto. Ovviamente, sempre secondo il concetto di modularità, il telaio è stato pensato in modo che comunque tale possibilità non sia preclusa in modo completo, permettendo in ogni momento l'installazione di un attacco a tre punti e una PTO con semplici modifiche della struttura.



Figura 3.5: Esempio di trattore con attacco a tre punti e PTO [31]

Il trasporto infatti non prevede particolari accorgimenti o consumi eccessivi. Per svolgere questa funzionalità è stato sufficiente realizzare un pianale posteriore sul quale adagiare eventuali oggetti da trasportare.

Per le operazioni di monitoraggio invece è stato necessario prevedere una struttura anteriore dove installare le telecamere e i sistemi di rilevamento. Ciò è stato ottenuto realizzando un castello in tubolare da montare sulla parte frontale, ricavando sia uno spazio interno protetto da polvere e agenti atmosferici, che un ripiano soprastante dove installare la sensoristica.

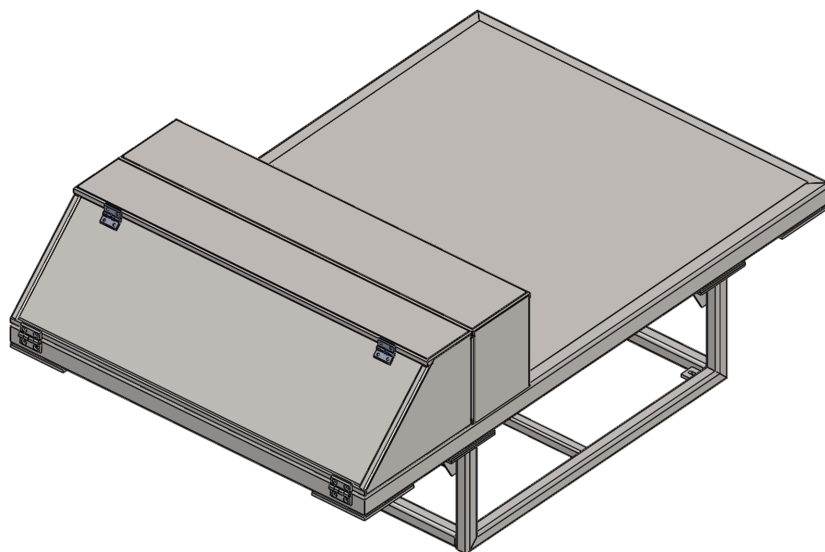


Figura 3.6: Telaio del rover con pianale posteriore e castello anteriore

Come si può notare nella figura 3.6, il castello anteriore risulta apribile mediante uno sportello. Tale implementazione è stata realizzata al fine di rendere facilmente accessibile il volume interno. Esso infatti, oltre a supportare successivamente le telecamere e i sensori, fungerà da vano per l'elettronica di comando.

A conclusione di questa parte si riporta una soluzione interessante per il montaggio dell'elettronica, essa infatti risulta essere sensibile alle vibrazioni, che devono quindi essere limitate. Nel veicolo in esame esse sono indotte sia dalla rotazione dei motori, che dall'avanzamento del veicolo. Per evitare la trasmissione di queste a tutta la parte di controllo e di gestione, sono state predisposte due superfici in grado di contenere tali vibrazioni. La prima si trova nella culla inferiore, dove, mediante quattro supporti antivibranti, viene montata una piastra sul quale verrà adagiata la batteria e ulteriori componenti che verranno citati in seguito. La seconda invece si trova collegata in modo diretto al telaio principale, protetta dal castello anteriore, sul quale verrà invece montata l'elettronica di controllo, la sensoristica e il computer di bordo.



Figura 3.7: Esempio di supporti antivibranti usati nell'industria [32][33]

3.1.2 Sistema di movimentazione

Una volta definita la struttura portante del veicolo si può procedere alla scelta dei sistemi di propulsione. Come già esplicitato nel paragrafo 2.6, per il progetto in esame si è scelto di installare delle ruote fisse, andando quindi ad effettuare la sterzata mediante torque vectoring. Questo sistema prevede la modulazione della coppia tra le ruote destre e le ruote sinistre, in modo da riuscire a generare un differenziale di momento torcente, facendo quindi curvare il veicolo.

Sebbene questo sistema causi strisciamento e consumo delle ruote, è sicuramente di semplice implementazione e quindi adatto ad un primo prototipo. Inoltre, il suolo in cui il rover si troverà ad operare sarà principalmente composto da terra oppure erba, pertanto queste problematiche risultano sicuramente accentuate.

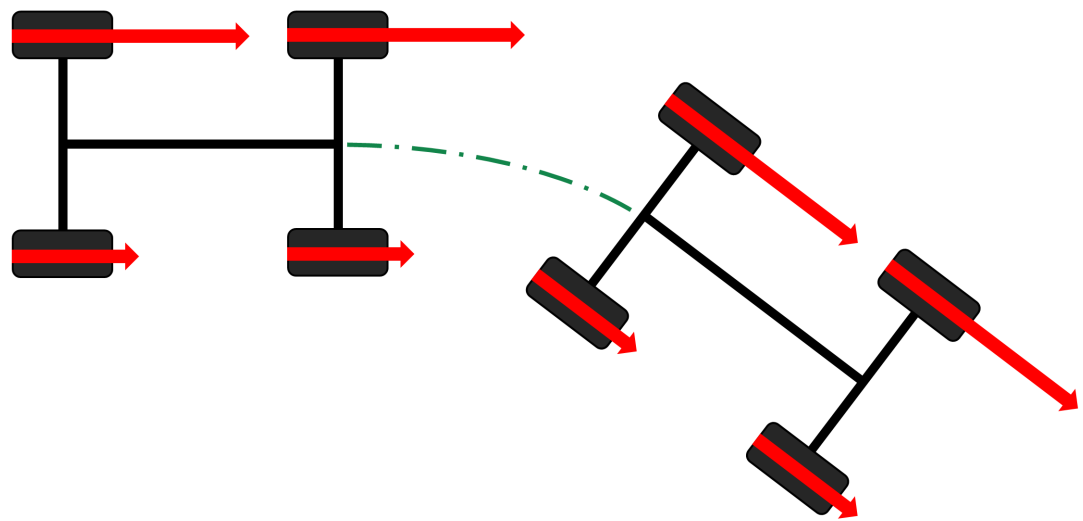


Figura 3.8: Schema rappresentativo di sterzata mediante torque vectoring

Al fine di poter realizzare tutto questo, il sistema di movimentazione deve prevedere una serie di parti essenziali:

- **Motori**, componenti fondamentali per fornire il moto alle ruote
- **Riduttori**, necessari per andare a ridurre il numero di giri del motore elettrico ed aumentare di conseguenza la coppia in uscita
- **Ruote**, con opportuno battistrada adatto ad affrontare terreni agricoli
- **Supporto**, fondamentale per andare a collegare il gruppo ruota al telaio principale
- **Inverter**, dispositivi elettronici indispensabili per l'alimentazione e la gestione dei motori

Andiamo ora brevemente a descrivere ogni singolo componente sopracitato, cercando di elencare per ognuno alcune peculiarità e considerazioni utili al fine di motivare le scelte effettuate e lo sviluppo del progetto.

Motori

Questi componenti, per definizione, riescono a trasformare una forma di energia, che può essere elettrica, chimica o di altro tipo, in energia meccanica. Nel particolare, quelli utilizzati in questo specifico caso sono motori elettrici. Questi prevedono un'alimentazione elettrica che, in generale, può essere fornita dalla rete oppure da un sistema di accumulo, generando in uscita coppia e velocità angolare, ovvero potenza meccanica. Esistono molti motori elettrici, i quali si differenziano sia per tipologia di alimentazione, corrente continua oppure alternata, che per modalità di funzionamento. Non vertendo tale trattazione su questo specifico argomento, ci si limita a considerare le soluzioni prese in esame per l'installazione sul veicolo. Le due categorie di motori adatti per tale scopo risultano essere:

- Motori Sincroni a magneti permanenti
- Motori Asincroni

Dal momento che il loro funzionamento risulta essere relativamente complesso e soprattutto poco utile per questo documento, si è scelto di realizzare un semplice confronto tra le caratteristiche peculiari dei due motori, andando per ogni soluzione a valutare i pregi e i difetti, in modo da comprendere cosa ha condotto alla scelta finale.

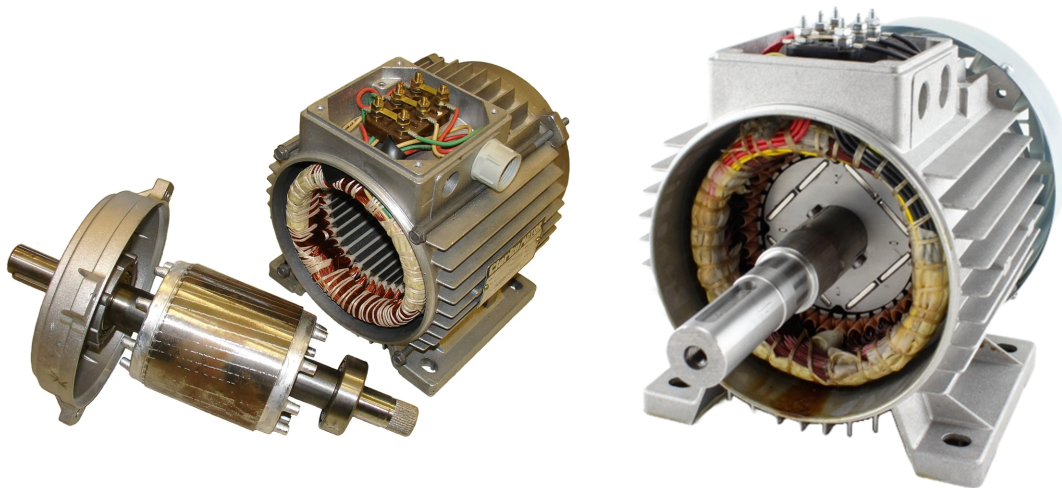


Figura 3.9: Esempio di motore asincrono (a sinistra) e sincrono (a destra) [34][35]

Motori Sincroni a magneti permanenti senza spazzole:	
<i>Vantaggi</i>	<i>Svantaggi</i>
• Gestione precisa e rapida della posizione angolare, della velocità di rotazione e della coppia • Buon rapporto peso/coppia • Buon rapporto peso/coppia • Possibilità di generazione di una coppia di stallo	• Costo mediamente più elevato • Necessità di azionamenti complessi per poter funzionare • Offerta sul mercato ridotta • Necessità di installazione di un riduttore all'uscita del motore a causa dell'elevato numero di giri

Figura 3.10: Tabella riassuntiva dei motori sincroni a magneti permanenti

Motori Asincroni	
<i>Vantaggi</i>	<i>Svantaggi</i>
• Costo inferiore rispetto ai motori a magneti permanenti • Necessità di azionamenti meno complessi o in taluni casi assenza di questi • Ampia gamma disponibile sul mercato	• Controllo difficile e per certe necessità di posizionamento impossibile • Difficoltà di generazione di una coppia di stallo • Necessità di installazione di un riduttore all'uscita del motore a causa dell'elevato numero di giri

Figura 3.11: Tabella riassuntiva dei motori asincroni

Alla luce di questo confronto si è scelto di optare per i motori sincroni, poiché il requisito di controllabilità risulta di fondamentale importanza per la gestione dell'avanzamento del rover e per la sua sterzata.

Così come i motori asincroni, anche i motori sincroni funzionano mediante corrente alternata, la cui gestione viene realizzata da un azionamento dedicato.

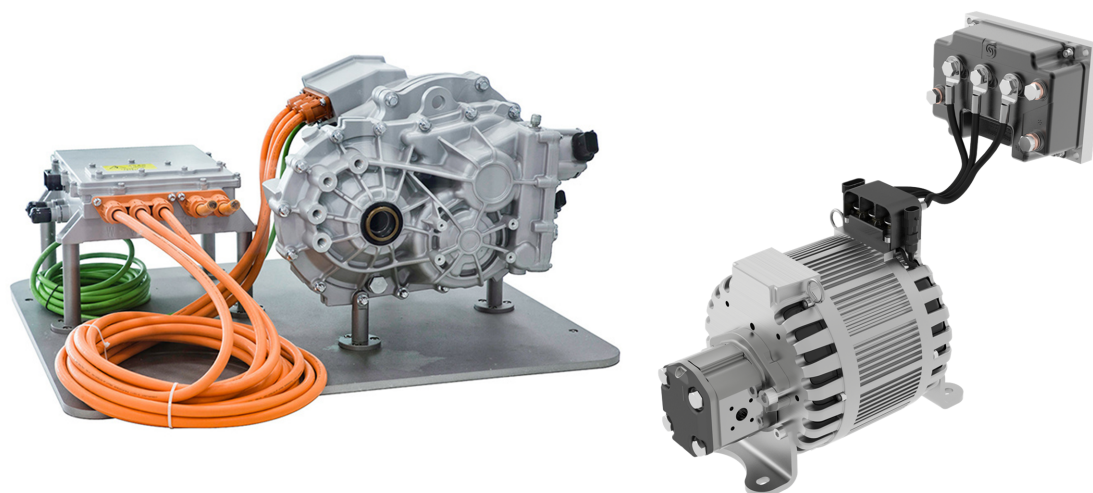


Figura 3.12: Esempi di motori sincroni collegati al loro relativo azionamento [36][37]

Questo componente è indispensabile quando si utilizzano motori sincroni, dal momento che quest'ultimi, per funzionare, richiedono un'alimentazione sincronizzata degli avvolgimenti con il rotore e non è quindi possibile collegarli in modo diretto all'alimentazione. Inoltre, essendo un veicolo mobile, la fonte di energia di tutto il sistema risulta essere una o più batterie, le quali sono in grado di fornire esclusivamente corrente continua. Un ulteriore compito di tali dispositivi, quindi, è quello di trasformare la corrente continua dell'accumulo in alternata da fornire ai motori, il tutto con opportuni parametri specifici.

Al fine di scegliere opportunamente gli inverter è stato necessario da prima dimensionare i motori, in modo da ottenere una possibile soluzione applicativa. Una volta nota la scheda tecnica dei propulsori si è valutata la corrente assorbita e la tensione di alimentazione di questi, parametri necessari per la ricerca dell'azionamento adatto. Per la definizione della taglia dei motori da implementare sul veicolo è stato necessario

eseguire un calcolo sulla potenza richiesta durante il movimento nei compiti individuati. La potenza assorbita dal sistema solitamente si suddivide in tre componenti:

- Potenza dovuta "alla salita", ovvero quella necessaria per aumentare la propria quota e per vincere l'attrito di rotolamento degli pneumatici.
- Potenza di traino, che tiene conto a sua volta di una serie di casistiche, tra le quali il peso dell'attrezzo/rimorchio trainato, la forza esercitata da questo durante la lavorazione (solo nel caso degli attrezzi) e infine la resistenza al rotolamento dell'attrezzo/rimorchio trainato.
- Potenza necessaria alla PTO, ovvero quella da fornire al fine di far funzionare l'utensile.

Tali potenze, se sommate, forniscono la potenza totale richiesta al mezzo durante il suo utilizzo. Nel caso in esame verrà trascurata la potenza necessaria alla PTO, dal momento che si è scelto di non installare tale ausilio sul veicolo e comunque, se anche fosse stata installata, tale potenza non sarebbe intervenuta nel dimensionamento dei motori atti al movimento del veicolo.

Per quanto riguarda invece il traino, anch'esso è stato in prima battuta messo da parte, dal momento che il trasporto viene fatto direttamente a bordo del veicolo e gli attrezzi non sono ancora implementabili.

Per determinare tali potenze si rende necessario, in primo luogo, calcolare la forza richiesta per l'avanzamento e successivamente andarla a moltiplicare per la velocità del veicolo, ottenendo così la potenza assorbita.

$$P_{salita} = F_{salita} \cdot v \quad (3.1)$$

La forza necessaria alla salita viene calcolata come:

$$F_{salita} = ((m + c) \cdot g \cdot f \cdot \cos pz + (m + c) \cdot g \cdot \sin pz) \cdot f_{corr} \quad (3.2)$$

Dove:

- m è la massa del veicolo in $[kg]$
- c è il carico sul veicolo in $[kg]$
- g è l'accelerazione di gravità $[m/s^2]$
- f è il coefficiente di resistenza al rotolamento $[-]$
- pz è la pendenza della salita da vincere $[^\circ]$
- f_{corr} è un fattore di correzione per andare a mediare i valori nel funzionamento $[-]$

A questo punto si può individuare la potenza complessiva da installare sul veicolo. Tale parametro svolge una duplice funzione in fase di progetto. Da un lato infatti considerando che sul veicolo saranno installati quattro motori, esso verrà utilizzato per definire la potenza minima richiesta da ognuno di essi. Dall'altra parte volendo anticipare il discorso relativo all'accumulo, la potenza sarà un parametro fondamentale durante la fase di dimensionamento della batteria.

Volendo effettuare tale valutazione, una voce incognita in tale calcolo risulta essere la massa del veicolo, poiché non essendo il veicolo ancora completamente definito, questo parametro risulta essere mancante. Tale valore dipende in maniera diretta dalla dimensione delle batterie, poiché queste risultano essere le più pesanti tra i vari componenti

considerati nel calcolo e quindi, come si vedrà successivamente, tale valutazione dovrà essere effettuata in modo iterativo. Per la stima di parametro valore si rimanda al paragrafo 3.1.3, relativo al sistema di accumulo.

Dal grafico in figura 3.13 si può individuare l'andamento della potenza necessaria al singolo motore in funzione della pendenza del terreno e della velocità effettiva considerata. In tale calcolo la massa di stima, ottenuta da varie iterazioni sul sistema di accumulo è di 350 kg, con un carico di trasporto pari a 100 kg.

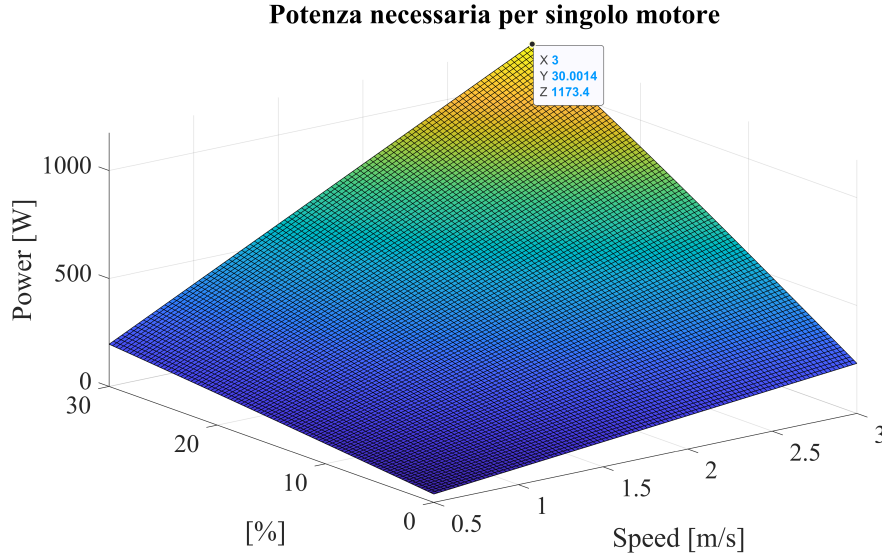


Figura 3.13: Andamento della potenza richiesta dal singolo motore in funzione della velocità e della pendenza

Per ottenere la potenza minima richiesta da ogni singolo motore è stato necessario individuare la massima potenza assorbita dal mezzo, ovvero nelle condizioni più gravose di pendenza e di carico, a quel punto, avendo deciso di realizzare un veicolo a quattro ruote motrici, è stato sufficiente dividere tale valore per il numero di motori installati. Sempre nel grafico di figura 3.13, tale valore risulta essere la potenza evidenziata nel riquadro, dove si ha una pendenza del 30% e una velocità pari a 3 m/s. Tali valori sono stati ottenuti come target in seguito ad una valutazione generica dei rover analizzati nella fase iniziale e della pendenza media dei terreni agricoli [38].

$$P_{motore} = \frac{P_{salita}}{n_{motori}} \quad (3.3)$$

Dove:

- P_{salita} è la potenza totale richiesta per il funzionamento del mezzo (per la sola parte di trasporto e monitoraggio)
- P_{mot} è la potenza che il singolo motore deve possedere per far avanzare il mezzo
- n_{motori} è il numero di motori installati sul mezzo

Una volta noti questi valori si può procedere alla scelta dei motori, avendo comunque cura di aumentare leggermente i dati di potenza. Al fine infatti di un funzionamento ottimale è sempre opportuno avere i motori leggermente sovradimensionati rispetto alla reale applicazione. Ciò comporta una condizione di lavoro inferiore a quella nominale, evitando surriscaldamenti e altre problematiche in seguito a particolari condizioni applicative.

Riduttori

Una volta effettuata la scelta dei motori e note le caratteristiche target del veicolo si può notare come si renda necessario interporre un riduttore tra il motore e la ruota, in modo da riuscire a ridurre il numero di giri ed innalzando così la coppia fino ad ottenere i valori desiderati. Nel grafico che appare in figura 3.13 si riporta la coppia necessaria nelle varie condizioni di lavoro in termini di velocità e pendenza.

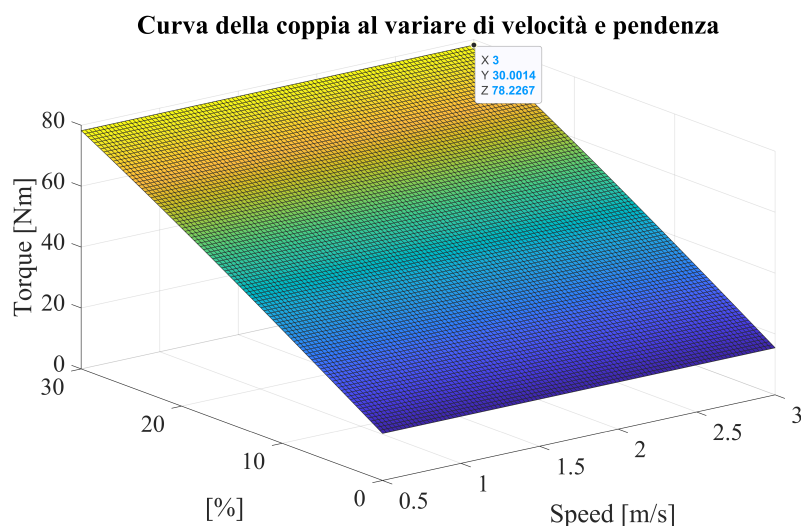


Figura 3.14: Andamento della coppia richiesta dal singolo motore in funzione della velocità e della pendenza

Noto quindi il valore di coppia richiesto dal sistema e quello fornito dal motore si può procedere nella ricerca di un riduttore adatto all'applicazione sul veicolo. Per fare questo, si è dovuto calcolare il rapporto di trasmissione necessario ad ottenere una rotazione corretta delle ruote al fine di raggiungere la velocità desiderata, ma allo stesso tempo che in tale condizione il riduttore sopporti la coppia in uscita necessaria a far avanzare il mezzo. Su questi prodotti il mercato offre una grandissima varietà di possibilità, tra le quali quelli i riduttori più adatti al presente scopo risultano essere i cosiddetti "epicicloidali".

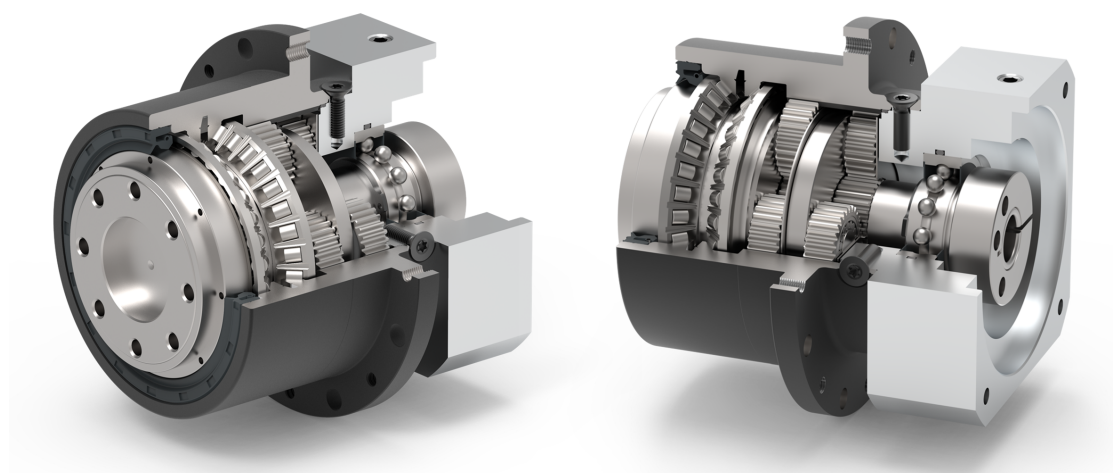


Figura 3.15: Esempio di riduttore epicicloidale [39]

Tali riduttori si basano su un ingranaggio epicicloidale per l'appunto, che riesce a garantire un ingombro ridotto anche a fronte di rapporti di trasmissione moderatamente elevati. Un'ulteriore peculiarità di tali componenti è la coassialità relativa tra l'albero di ingresso e quello di uscita, il quale permette di semplificare la progettazione e il montaggio.

Nel caso in esame, tuttavia, una coassialità diretta tra i due alberi non permetteva un montaggio agevole in quanto i motori sarebbero risultati a sbalzo rispetto al supporto e quindi poco agevoli sia in termini di montaggio che di estetica.

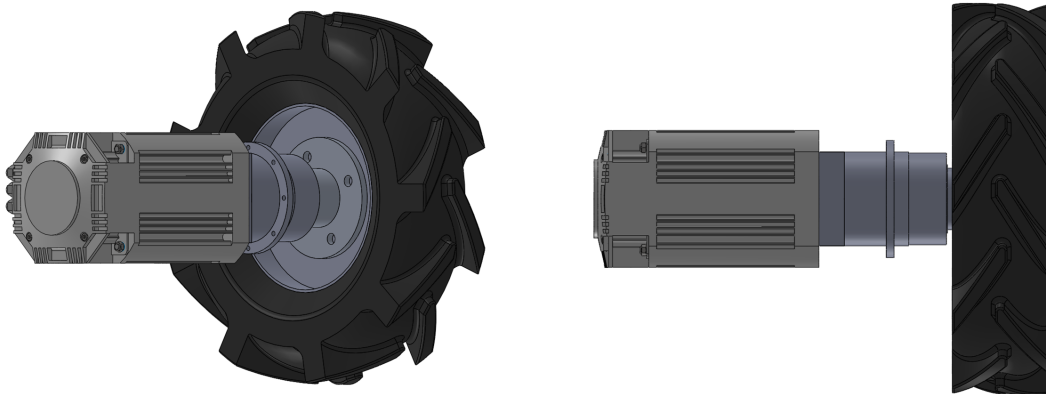


Figura 3.16: Esempio di montaggio del motore in asse con la ruota

Per tale ragione si è scelto di optare per riduttori epicicloidali con l'aggiunta di una coppia conica, la quale riesce a rendere l'albero del motore perpendicolare a quello di uscita della ruota, aumentando sì l'ingombro verticale della soluzione, ma andando a ricavare un notevole spazio nella parte centrale del veicolo. Tale volume ovviamente non verrà sfruttato in modo diretto in questa trattazione, ma è stato pensato per poter realizzare in un futuro un eventuale attacco a tre punti, potendo collegarsi in modo diretto al telaio.

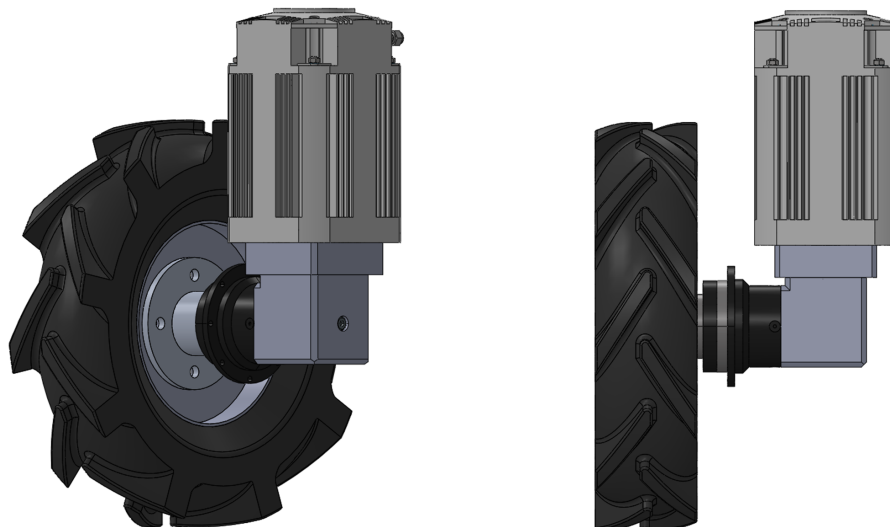


Figura 3.17: Esempio di montaggio del motore in modo perpendicolare all'asse ruota

Supporto

Questo componente svolge il compito di collegamento fisico tra il sistema precedentemente descritto (ruota-riduttore-motore) e il telaio principale. Per fare ciò è stato realizzato un supporto personalizzato che, attraverso opportune modifiche sul telaio principale, verrà poi collegato con una giunzione bullonata alla struttura principale.

Essendo tale componente relativamente sollecitato, si è cercata una forma in grado di resistere bene alle sollecitazioni esterne, ma allo stesso tempo che fosse leggera, in modo da non aggiungere eccessivo peso al veicolo. Un'altra necessità equamente importante è stata la semplicità realizzativa, in quanto un aspetto fondamentale di tale veicolo risulta essere la realizzabilità. Per raggiungere questo scopo si è optato per soluzioni commerciali e, qualora indispensabili, per le parti non commerciali si è cercato di limitare il più possibile i costi di realizzazione. Di seguito una serie di soluzioni proposte:

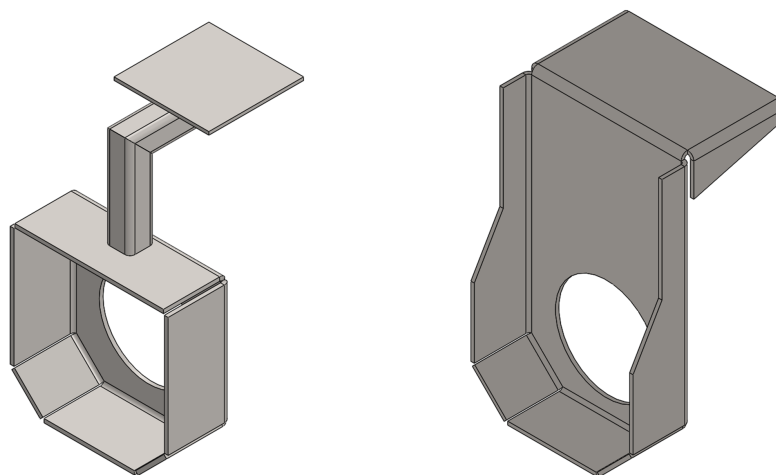


Figura 3.18: Esempio di strutture di supporto ruota proposte

Al termine di varie valutazioni si è scelto di procedere con una soluzione riportata a destra in figura 3.18. Tuttavia, è stato necessario effettuare alcune modifiche progettuali, da un lato per garantire una perpendicolarità tra la parte di collegamento al telaio ed il supporto, dall'altro sono stati aggiunti dei fazzoletti di rinforzo e al fine di aumentare la resistenza della struttura. Si riporta di seguito una forma possibile del supporto:

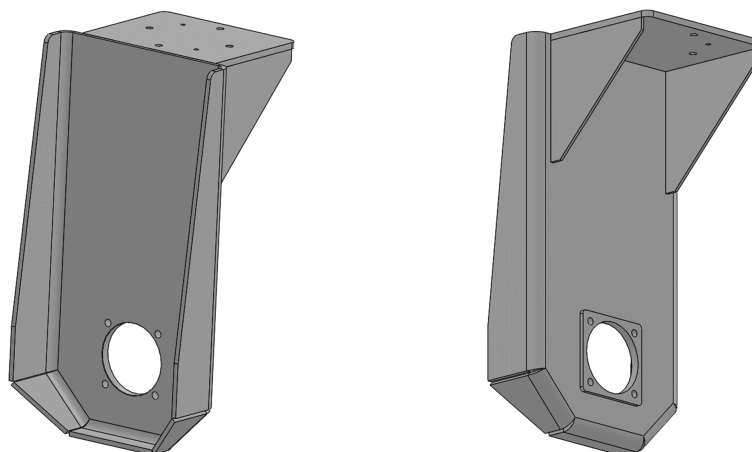


Figura 3.19: Supporto ruota nella sua versione più avanzata

Come si può notare nella figura 3.19, oltre ai quattro fori per il collegamento con bulloni sono presenti ulteriori due fori. Un problema relativo al montaggio di tali supporti, infatti, è la precisione ottenuta successivamente all'assemblaggio. Avendo previsto per questi una giunzione bullonata, non è presente alcun elemento che definisca in modo univoco l'esatta collocazione di questi.

Tale problema è molto ricorrente nella meccanica, specie in quei sistemi dove per necessità costruttive si sceglie una giunzione smontabile (solitamente poco precisa), correlata ad una precisione richiesta in fase di montaggio.

Le soluzioni possibili sono molteplici, per esempio nel caso di flange e alloggiamenti spesso si ricorre ad appositi centraggi, mentre nei componenti non assialsimmetrici si possono realizzare una o più battute.

Nel caso in esame, tuttavia, realizzare tali battute sarebbe stato complicato e soprattutto costoso, dal momento che ogni supporto sarebbe stato lavorato al fine di ottenere le geometrie volute. Per evitare questo si è ricorso all'uso di spine. Esse sono un componente simile ad un piccolo perno, che viene inserito in appositi fori ricavati su entrambe le parti da assemblare. Grazie ad opportune tolleranze, l'accoppiamento risulta essere preciso ma smontabile, in modo così da eseguire un centraggio, senza compromettere la smontabilità.

Predisponendo dunque due spine contrapposte e un piano di appoggio, il componente risulta essere completamente vincolato e quindi andando a definire la locazione di queste lavorazioni con tolleranze specifiche, si riesce ad ottenere quella precisione nel montaggio desiderata.

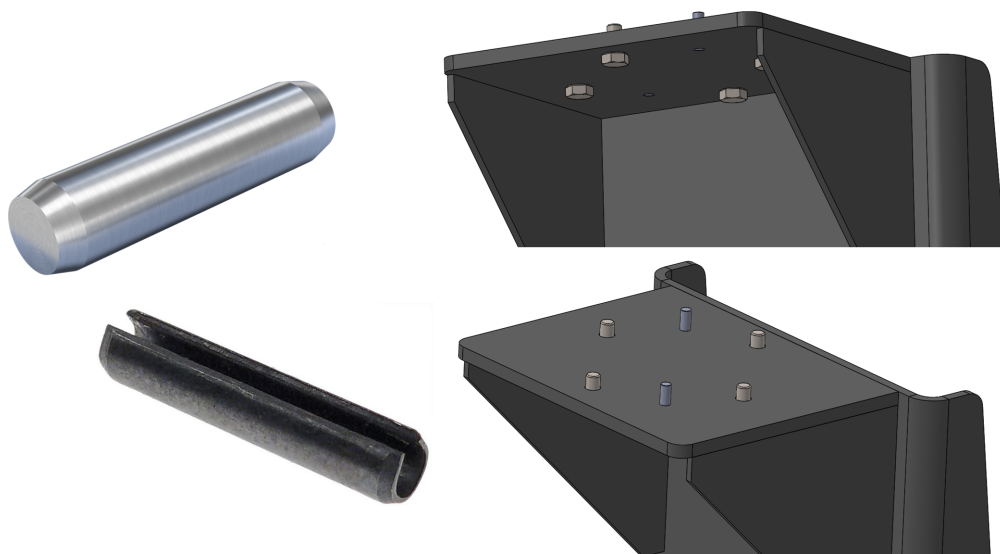


Figura 3.20: Esempio di spine commerciali (a sinistra) ed esempio del loro montaggio (a destra) [40][41]

Grazie a questi centraggi si è cercato di garantire un parallelismo tra le quattro ruote e soprattutto il loro corretto posizionamento in relazione al telaio. Questa necessità nasce dal fatto che il veicolo, per avanzare in modo corretto, dovrà possedere le ruote allineate alla direzione di movimento al fine di evitare strisciamenti e usure anomale.

Per fornire un'idea migliore dell'assieme finale si riporta una possibile soluzione di montaggio dell'intero sistema ruota-riduttore-motore-supporto:

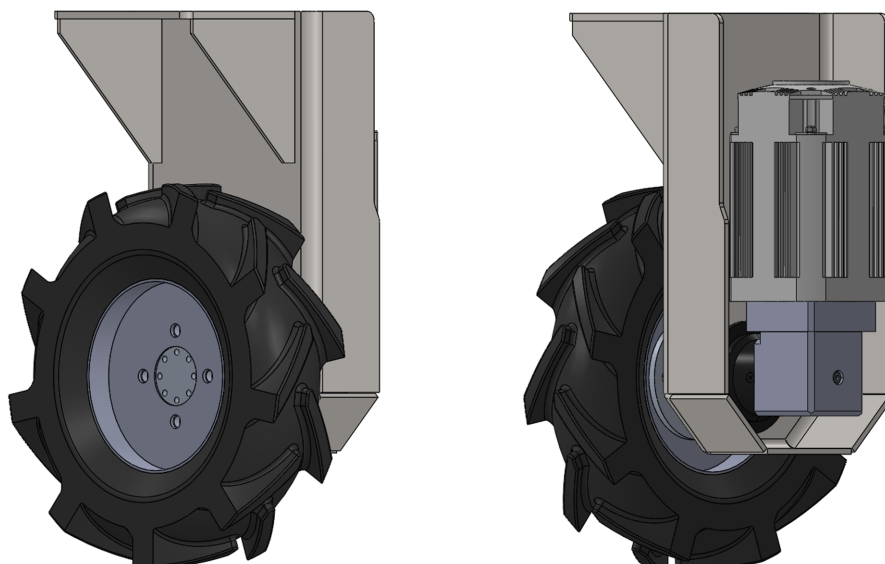


Figura 3.21: Gruppo ruota nella sua versione più avanzata

Ruote

Collegate attraverso un mozzo al riduttore si trovano poi le ruote. Tale componente è fondamentale per la corretta aderenza del veicolo sul terreno durante le fasi di avanzamento. La tipologia di ruote scelte si rifà al settore agricolo, con il classico battistrada a lisca di pesce, il quale garantisce una perfetta tenuta sui vari terreni. A causa delle dimensioni medie del rover, le ruote scelte risultano essere simili a quelle installate sulle motofrese, in modo da poter reperire sul mercato delle soluzioni commerciali, evitando quindi di ricorrere a soluzioni custom eccessivamente costose.



Figura 3.22: Esempio di motofresa Grillo con le relative ruote a lisca di pesce [42][43]

Inverter

Il montaggio di questo componente non avviene direttamente a bordo del gruppo ruota, bensì in sua prossimità. Questa scelta è stata effettuata per una questione di ingombri e di necessità, dal momento che essi devono essere posti nelle vicinanze dei motori al fine di limitare la lunghezza dei cavi di collegamento. Allo stesso tempo però la loro locazione deve garantire un certo grado di protezione e riparo da acqua e polvere. Come già esplicitato nel paragrafo 3.1.2 relativo ai motori, i parametri per il dimensionamento di tali dispositivi sono la corrente massima assorbita dal singolo motore e la sua tensione di alimentazione. Solitamente, infatti, questi dispositivi alimentano il motore con la tensione nominale modulando la coppia in uscita attraverso la corrente erogata, con un rapporto diretto tra questa e il momento torcente generato.

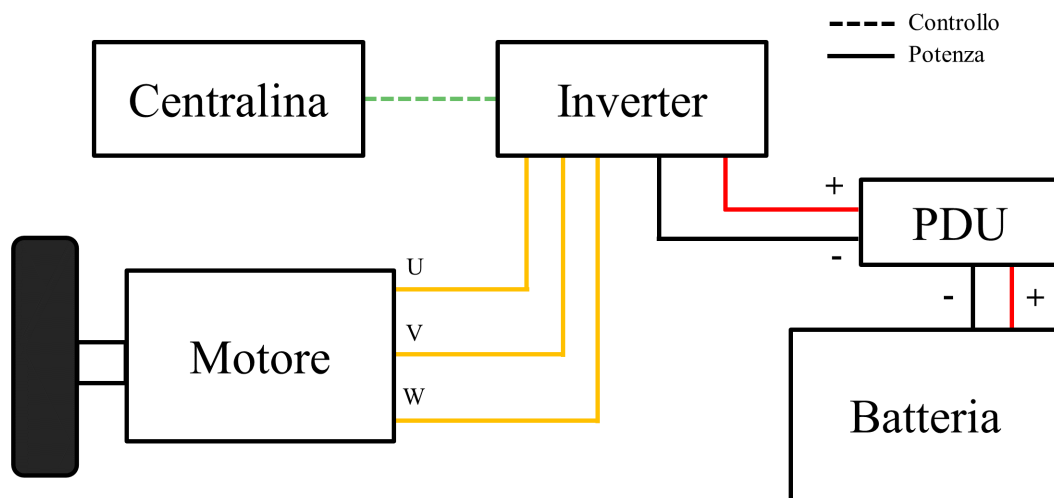


Figura 3.23: Schema rappresentativo del collegamento delle componenti elettriche all'interno del veicolo

Come si può notare nella figura 3.23, l'azionamento preleva la corrente dalla PDU (power distribution unit, vedere paragrafo 3.1.3), la quale viene alimentata in modo diretto dalla batteria attraverso due fili, un positivo, di colore rosso, ed un negativo, di colore nero. Tali cavi vengono poi collegati fisicamente sull'azionamento e rappresentano la fonte di alimentazione. Sono poi presenti tre morsetti sull'inverter, ai quali andranno collegate le tre fasi motore, u,v e w, necessarie per il funzionamento dei propulsori.

Il compito dell'azionamento è quello di prelevare la tensione continua dalla batteria e trasformarla in tensione alternata. Tuttavia, questa trasformazione deve essere opportunamente gestita in quanto le tre fasi devono essere alimentate in modo da allineare il campo elettro-magnetico generato negli avvolgimenti con quello del rotore, garantendo la sincronia tra essi in fase di rotazione, da qui deriva la dicitura "sincrono" dei motori utilizzati.

Il compito degli inverter, dunque, è proprio quello di "interfaccia" tra la parte di gestione, ovvero centralina e computer di bordo, e i motori. Una volta infatti elaborato l'algoritmo di guida autonoma e valutata la velocità necessaria delle ruote, la centralina andrà a trasmettere questo segnale agli azionamenti, i quali a loro volta, trasformeranno questo segnale "digitale" di comando, in un comando in tensione/corrente, da fornire ai propulsori.

Di seguito in figura 3.24 si riportano due soluzioni commerciali di tali dispositivi. Si noti la presenza dei collegamenti fisici precedentemente esplicitati.



Figura 3.24: Esempio di inverter commerciali [44][45]

3.1.3 Sistema di accumulo (ESS)

Il veicolo è stato pensato per essere alimentato completamente attraverso energia elettrica. Al fine di permettere un corretto funzionamento, quindi, è stato necessario installare un sistema di accumulo che fosse in grado di fornire una autonomia adeguata alla tipologia di veicolo. Per fare ciò è stato scelto di utilizzare una batteria con tecnologia ai polimeri di litio, LiFePo.

Nota la potenza complessiva necessaria ai motori (paragrafo 3.1.2) e la loro tensione di alimentazione si potrebbe valutare in modo diretto la capacità totale come:

$$C = \frac{P_{tot} \cdot at}{V} \quad (3.4)$$

Dove:

- at è l'autonomia che viene richiesta al veicolo
- V è la tensione di funzionamento del sistema
- P_{tot} è la potenza massima installata a bordo

Tale approccio, tuttavia, risulta essere fuorviante e inesatto dal momento che la scelta di una P_{tot} pari alla somma delle potenze massime erogate dai vari motori, è lontana da un utilizzo reale del veicolo, poiché implicherebbe una condizione di utilizzo in cui i motori siano sempre alla massima potenza. In figura 3.25 si riporta un grafico relativo a tale possibile calcolo.

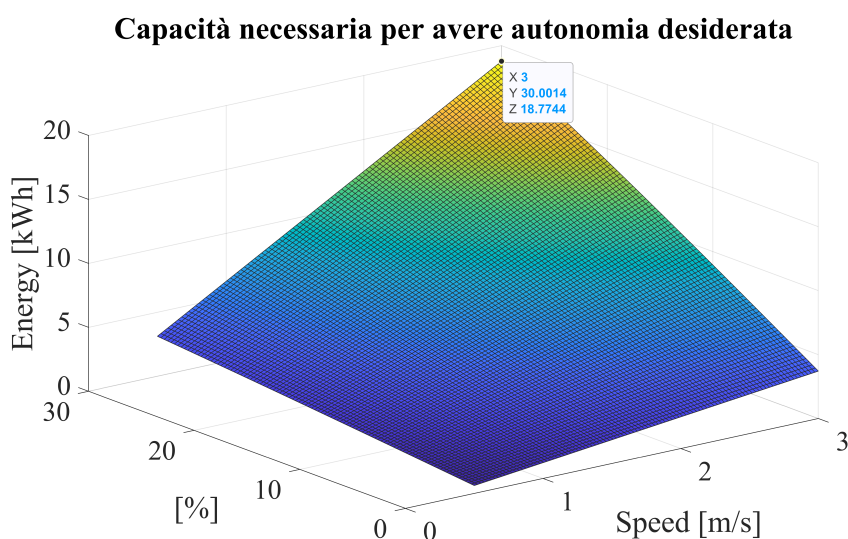


Figura 3.25: Andamento dell'energia totale richiesta, nella condizione di utilizzo continuativo alla massima potenza in funzione di velocità e pendenza

Come si può notare l'energia complessivamente richiesta per le condizioni più gravose è di circa 19 kWh, eccessivamente elevata per il rover in esame.

Per cercare di arginare tale problematica, si è pensato di calcolare una potenza media, ma anche questo metodo di calcolo potrebbe risultare inesatto in quanto comunque si porrebbero delle condizioni di lavoro del rover inesatte. Al fine quindi di ottenere una stima corretta della capacità si è scelto di non considerare valori medi o massimi, bensì di realizzare un ciclo di lavoro "caratteristico". Per fare ciò è stato elaborato un possibile

caso di utilizzo del veicolo e andando poi a ripetere tale ciclo per tutta la durata richiesta dall'autonomia, la quale risulta essere un parametro di progetto, si otterrà una stima della capacità della batteria.

Ricercando nella letteratura non è stato possibile ottenere un metodo già collaudato, pertanto, a seguito di vari tentativi è stato proposto un ciclo così strutturato:

1. Operazione di prima svolta, che viene effettuata al 50% della velocità massima imposta pari a 10 km/h, per una lunghezza complessiva di 5 m e rappresenta la manovra effettuata in cima al filare. Supponendo un campo con a doppia pendenza, 15% nella direzione perpendicolare ai filari e 10% in direzione parallela e supponendo una lavorazione dal basso verso l'alto, questa manovra viene eseguita con un pendenza del 15%.
2. Operazione di monitoraggio con prima corsa, effettuata in salita, con una pendenza del 10% e una lunghezza complessiva del filare pari a 80 m.
3. Operazione di seconda svolta, analoga alla prima, viene effettuata una volta raggiunta l'estremità del filare e serve per passare nel filare successivo. I parametri sono gli stessi dell'altra operazione precedentemente elencata.
4. Operazione di monitoraggio con seconda corsa, effettuata in discesa con una pendenza negativa pari al -10%, in tale condizione si potrebbe pensare ad un sistema rigenerativo in grado di ricaricare la batteria in discesa, tuttavia al fine di rendere il calcolo più conservativo e generico si è scelto di tralasciare tale possibilità.

Come si può notare il modello di campo utilizzato prevede una doppia pendenza. Per rendere meglio l'idea di tale concetto si riporta in figura 3.26 un'immagine esplicativa.

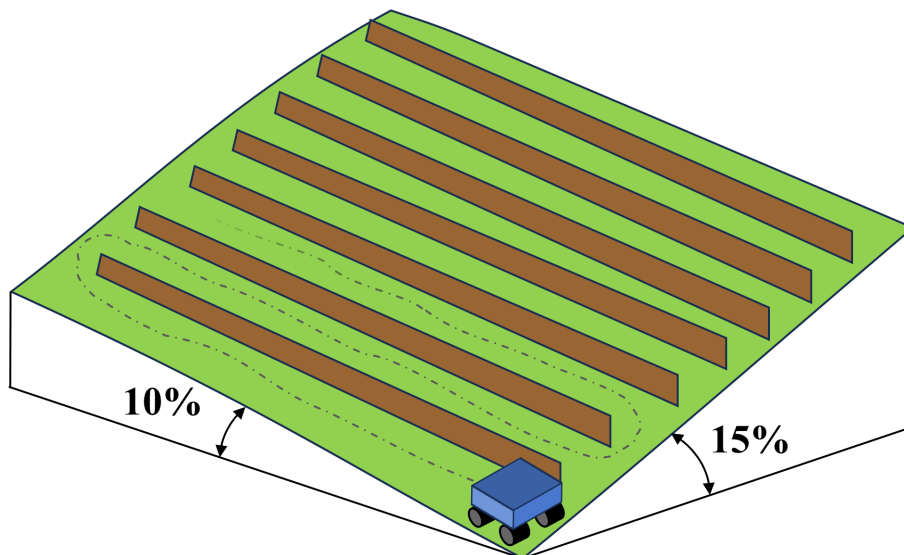


Figura 3.26: Schema rappresentativo di un terreno con doppia pendenza utilizzato per la valutazione del ciclo di lavoro

Per ogni singolo componente del ciclo prevede una specifica forza necessaria, calcolata attraverso i parametri espressi nel paragrafo 3.1.2 e una velocità di movimento. Conoscendo poi la lunghezza complessiva del tratto è possibile ottenere il tempo di durata di tale fase.

$$t_i = \frac{l_i}{v_i} \quad (3.5)$$

Dove:

- t_i è il tempo totale necessario ad eseguire il movimento i-esimo
- v_i è la velocità di movimento nel tratto i-esimo
- l_i è la lunghezza complessiva nel tratto i-esimo

Una volta noto il tempo necessario sul tratto i-esimo e la potenza necessaria in tale sezione, si può procedere in modo diretto al calcolo dell'energia necessaria.

$$E_{tot-i} = P_{tot-i} \cdot t_i \quad (3.6)$$

Dove:

- E_{tot-i} è l'energia utilizzata per percorrere il tratto i-esimo
- P_{tot-i} è la potenza utilizzata nel tratto i-esimo
- t_i è il tempo totale necessario ad eseguire il movimento i-esimo

Avendo definito in totale quattro tratti, l'energia complessivamente utilizzata in un singolo ciclo risulterà essere:

$$E_{tot-ciclo} = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 \quad (3.7)$$

Si fa notare come E_{tot} sia l'energia totale per eseguire un singolo ciclo. Al fine di una stima attendibile dell'energia totale necessaria si deve calcolare il tempo totale di un singolo ciclo:

$$t_{tot} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \quad (3.8)$$

Noto il tempo complessivo si può procedere a dividere l'autonomia desiderata per il tempo ottenuto, da tale relazione si ottengono quindi i cicli complessivamente eseguiti nel periodo complessivo di utilizzo. Moltiplicando a questo punto i cicli per l'energia $E_{tot-ciclo}$, si ottiene la capacità complessiva che la batteria deve possedere per soddisfare in modo completo il compito.

$$E_{tot} = E_{tot-ciclo} \cdot cicli \quad (3.9)$$

Dai parametri del campo generico ipotizzato, considerando una massa del veicolo di 350 kg e un carico di 100 kg, si ottiene una energia totale pari a 4300 Wh. Ovviamente questo valore viene stimato come valore, per comprendere la dimensione finale della batteria è necessario applicare la tensione a cui quest'ultima lavorerà. Nel caso del presente veicolo si è scelto di lavorare a 48V, ottenendo quindi una capacità complessiva minima della batteria pari a circa 90 Ah.

$$C_{tot} = \frac{E_{tot}}{V} \quad (3.10)$$

Dove:

- V è la tensione tipica della batteria
- C_{tot} è la capacità complessiva da installare per soddisfare il compito in modo completo.

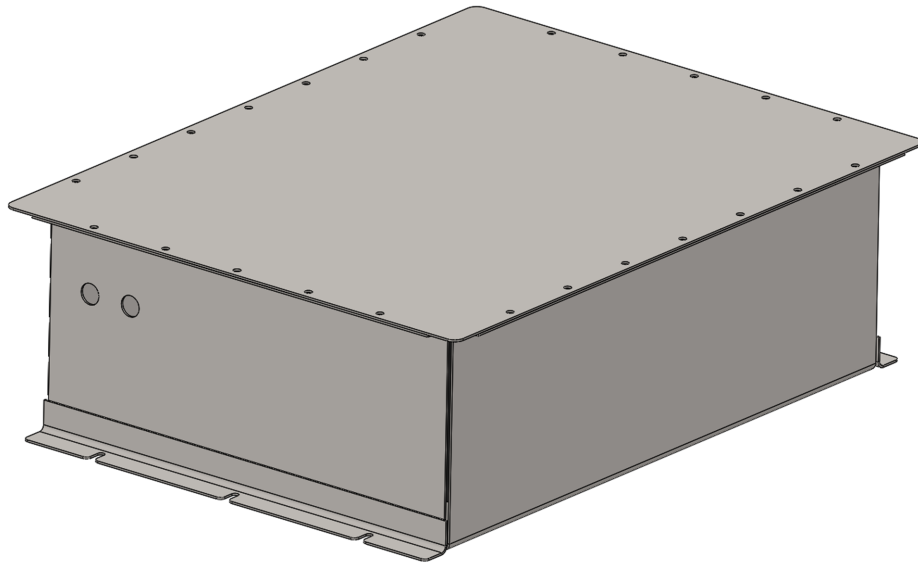


Figura 3.27: Modello CAD della batteria per la valutazione degli ingombri

Una volta definita la batteria da utilizzare è stato importante comprendere come effettuare la distribuzione di potenza tra le varie parti. Una volta scelto e dimensionato il sistema d'accumulo, è necessario scegliere una posizione centrale nella struttura del veicolo in cui installarlo. Ciò non è propriamente un vincolo progettuale, ma risulta comodo seguire tale direzione in quanto semplifica il collegamento di tensione dei vari componenti. Un ulteriore dispositivo utilizzato per facilitare il cablaggio è la cosiddetta PDU (power distribution unit). La batteria, infatti, viene predisposta una singola uscita in tensione, per esigenze di realizzazione. Dovendo però collegare più dispositivi a questa linea è necessario andare ad inserire un sistema che sia in grado di distribuire tale tensione, la PDU appunto.



Figura 3.28: Esempio costruttivo di una PDU commerciale [46]

Non è sufficiente predisporre un semplice collegamento tra i fili "tradizionale", in quanto in questa applicazione i valori di corrente sono moderatamente elevati e anche i componenti in gioco risultano essere delicati e talvolta pericolosi se non opportunamente protetti. Per fare ciò la PDU viene alimentata in modo diretto dalla batteria, grazie poi

a fusibili e relè di potenza riesce a distribuire la potenza tra le varie componenti. Il fusibile protegge in caso di corrente troppo elevata andandosi a bruciare in determinate condizioni al fine di evitare il danneggiamento di altri componenti. Il relè viene invece utilizzato per poter rimuovere tensione sui vari rami per varie necessità operative, a seguito di un comando da parte della centralina.



Figura 3.29: Esempio di un relè per alte correnti in DC (a sinistra) e due esempi di fusibili (a destra) [47][48][49]

Un ulteriore elemento che forse potrà sembrare strano ritrovare in un veicolo elettrico a batteria è un sistema di accumulo 12V ausiliario. Sebbene infatti il veicolo venga alimentato in modo completo dall'accumulo principale, è necessario inserire un secondo dispositivo che alimenti tutta l'elettronica in grado di gestire la batteria principale. Per poter avviare il sistema di distribuzione (la PDU) è opportuno che ci sia un secondo sistema autonomo in grado di lavorare in assenza di potenza da parte dell'accumulo principale, tale sistema, almeno in fase di prima accensione, preleva la tensione necessaria proprio dal sistema di accumulo 12V.



Figura 3.30: Esempio di una batteria 12V, simile a quella predisposta nel veicolo [50]

Una nota interessante da portare in esame è poi la diversa tensione di lavoro dei vari componenti. Come già specificato precedentemente infatti la tensione delle batterie è di 48V, necessaria per l'alimentazione degli inverter, mentre tutta l'elettronica di bordo necessita di una tensione inferiore, che può essere 5V, 12V o 24V. Per ottenere tale tensione si rende necessario installare un dispositivo definito DC-DC converter. Esso preleva la tensione "elevata" dalle batterie e la "abbassa" sino a quella desiderata. Tale componente tuttavia ha dimensioni limitate, poiché la potenza assorbita dall'elettronica e dal sistema di gestione è sì rilevante, ma sicuramente inferiore a quella assorbita dagli inverter. Come nel caso di quest'ultimi poi, tale dispositivo viene dimensionato sulla corrente massima che dovrà erogare durante il funzionamento. Per ottenere tale valore si deve calcolare la potenza complessivamente assorbita dai vari componenti ausiliari e, una volta divisa per la tensione nominale di lavoro, si otterrà la corrente massima da erogare per alimentare tutto il sistema. Ovviamente tale valore è da considerarsi un riferimento, in quanto sarà opportuno incrementare tale valore al fine di possibili future installazioni (ricordando la modularità inizialmente descritta) e picchi di assorbimento in situazioni particolari.

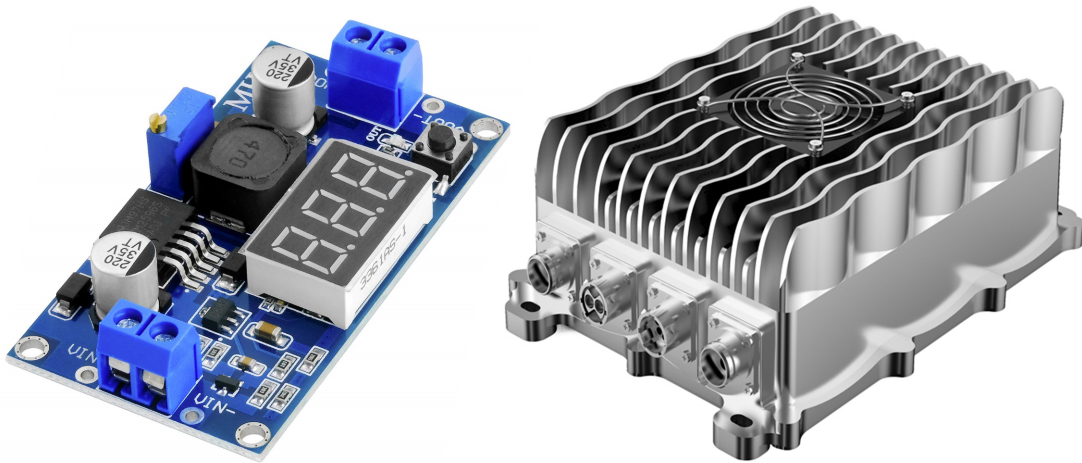


Figura 3.31: Esempio di Dc-Dc converter per basse correnti (a sinistra) e per alte correnti (a destra) [51][52]

3.1.4 Sistemi di bordo

Nella parte a "bassa tensione" troviamo tutti quei componenti che sono atti a:

- gestire il veicolo, in termini di movimenti da effettuare a seguito dei vari dati ricevuti dai sensori
- raccogliere i dati provenienti dall'interazione con l'ambiente esterno, sia quelli di monitoraggio che quelli necessari a rendere il veicolo autonomo
- Illuminare e segnalare la presenza del veicolo in movimento

Computer di bordo

Per la gestione del veicolo è stato scelto di installare un computer di bordo, sul quale verrà predisposto l'algoritmo di guida autonoma che andrà a processare i dati provenienti dai vari sensori, fornendo in output la velocità da attribuire ai vari motori, ovviamente tale output non può sicuramente essere trasmesso in modo diretto, ma dovrà essere elaborato da componenti intermedie, come per esempio gli inverter, in quali a loro volta andranno ad alimentare i motori al fine di soddisfare il segnale di comando. Alle volte in tali architetture, al fine di rendere più sicura (in termini di disturbi) la comunicazione tra le varie componenti, si può scegliere di installare anche una centralina.



Figura 3.32: Esempio di una centralina veicolo (a sinistra) e di un computer di bordo (a destra) [53][54]

Per fornire dati sufficienti e attendibili si è cercato in letteratura quale fosse il sistema migliore di acquisizione. Nell'articolo [55] è stato possibile individuare le tipologie di sensori presenti sul mercato. Da un'analisi preliminare delle tecnologie interessanti per la presente applicazione, emergono principalmente le tecnologie radar, LiDAR, telecamere e sensori di contatto.



Figura 3.33: Vari esempi dei sensori presi in esame per l'installazione sul veicolo [56][57][58][59]

Dall'articolo [60] si può notare come ogni tecnologia adottabile presenta dei punti di forza e altri di debolezza. Non è quindi possibile scegliere la tecnologia “migliore” per l'acquisizione, bensì si possono scegliere le tecnologie migliori che, una volta combinate, restituiscono le informazioni dell'ambiente circostante il più realisticamente possibile. Ovviamente tale trattazione non si vuole addentrare nel funzionamento specifico di ogni tecnologia utilizzata e pertanto ci si limita a riportare un breve commento su ogni soluzione proposta.

LiDAR

È una tecnologia che, sfruttando la luce, garantisce una precisione molto elevata nel rilevamento della distanza del sensore dall'oggetto considerato, combinata ad un range di lavoro che può essere in alcuni casi anche molto elevato. Per fare questo viene utilizzato un laser, il quale colpisce il corpo e viene in parte riflesso. Dal tempo di volo necessario a compiere il tragitto oppure in funzione dell'angolo di riflessione di tale fascio, questo dispositivo è in grado di valutare la sua distanza da eventuali ostacoli e impedimenti.

RaDAR

Questa tecnologia è simile al LiDAR, ovvero sfrutta sempre la riflessione sui corpi, ma in questo caso anziché la luce vengono utilizzate onde radio. La precisione risulta inferiore rispetto a quella precedente e soprattutto è molto suscettibile ai disturbi, tuttavia viene comunque utilizzata per i costi ridotti rispetto alla tecnologia laser.

Telecamere

Questi tipi di sensori sfruttano l'immagine catturata per estrapolare informazioni. Esistono varie tecnologie per realizzare lo stesso fine, come per esempio la luce strutturata, il ToF (time of flight) e la combinazione di due camere (stereo camere). In generale la precisione è buona, ma su piccole distanze e soprattutto in condizioni di illuminazione e disturbo contenute (nebbia, luce intensa, ecc. non sono ottimali). Come per le due precedenti tecnologie, esse forniscono in output una nuvola di punti che indica per ogni punto la distanza dal sensore.

Bumper

Questi sono sicuramente tra i più semplici ed economici tra i vari sensori analizzati, ma sono anche tra i più “sicuri”. Essi infatti rilevano la presenza di un corpo mediante un contatto fisico e, pertanto, forniscono una lettura sempre molto attendibile e veritiera. Ovviamente possiedono un range di misurazione praticamente pari a zero, poiché la rilevazione avviene a seguito “dell'impatto”. Per tale motivo sono solitamente utilizzati come sicurezza, andando a bloccare il veicolo non appena rilevano qualcosa.

Quelli citati fin'ora assolvono il compito di collegare in modo virtuale il rover con l'ambiente esterno. Il loro compito è infatti quello di rilevare anomalie nella zona circostante del rover, al fine di renderlo autonomo nei movimenti. Vediamo ora ulteriori sistemi di bordo utilizzati da una parte per rilevare il posizionamento del rover nel sistema terrestre, dall'altra per assolvere i compiti di segnalazione e monitoraggio:

RTK e GPS

Tale tecnologia si differenzia dalle precedenti elencate poiché non è fine all'acquisizione di dati sull'ambiente circostante del rover, bensì cerca di identificare la posizione generale del veicolo nello spazio. Il sistema è simile a quello utilizzato dai cellulari o dalle auto per definire la loro posizione, tuttavia se andiamo a considerare la tecnologia "tradizionale", essa possiede una precisione piuttosto elevata, di circa 10m. Ovviamente al fine di movimentare un veicolo autonomo nello spazio tale valore non risulta sicuramente accettabile. Per cercare di superare questo problema è possibile adottare un sistema definito RTK, ovvero "real-time cinematic". Esso è un sistema di posizionamento satellitare avanzato, utilizzato per ottenere misurazioni di posizione estremamente precise in tempo reale. Sfrutta segnali GPS, GLONASS o altri sistemi di navigazione satellitare per calcolare la posizione con precisione centimetrica o addirittura millimetrica. È ampiamente impiegata in settori come l'agricoltura di precisione, la topografia e la navigazione autonoma, dove è necessario conoscere con una elevata certezza la posizione del veicolo.



Figura 3.34: Esempio di funzionamento di un sistema RTK con relativo hardware [61][62]

Telecamere di monitoraggio

Queste non risultano utili in termini diretti durante il funzionamento, bensì vengono utilizzate durante le fasi di monitoraggio. Per fare questo vengono utilizzate le cosiddette telecamere multispettrali. Tali dispositivi catturano immagini in diverse lunghezze d'onda, oltre a quelle visibili, come infrarosso e ultravioletto. Questa raccolta di dati multispettrali permette agli agricoltori di monitorare la salute delle coltivazioni, rilevare lo stress delle piante e ottenere informazioni dettagliate sulle condizioni del suolo. L'analisi delle immagini multispettrali consente di prendere decisioni informate per ottimizzare l'uso di acqua, fertilizzanti e pesticidi, contribuendo così a migliorare la resa delle coltivazioni in modo sostenibile.

Un particolare interessante di queste camere è la modularità. Per percepire infatti le varie lunghezze d'onda, con varie precisioni, non è tecnologicamente possibile realizzare una singola telecamera e pertanto è necessario accoppiarne due o più. Il punto interessante è che molte case produttrici prevedono soluzioni personalizzate dei loro prodotti, andando

ad installare sul dispositivo finale diverse camere. Così facendo è possibile adattare il dispositivo alla propria coltura, andando a scegliere le lunghezze d'onda da rilevare.

Luci

Si divide tale sezione in due sottoparti a causa dei differenti scopi. Da una parte troviamo le luci di segnalazione, necessarie per rendere visibile il veicolo in condizioni di scarsa illuminazione o condizioni meteo avverse, mentre dall'altra troviamo le luci di "lavoro", ovvero dei dispositivi più potenti dei precedenti, che posso essere accesi solo quando necessario e vengono utilizzati per illuminare meglio la coltura in fase di monitoraggio, al fine di rendere migliori le condizioni di acquisizione dei dati.



Figura 3.35: Esempio di telecamere multispettarli (a sinistra) e di luci proposte (a destra)
[63][64]

Capitolo 4

Simulazione multibody

4.1 Introduzione alle simulazioni multibody

Avendo precedentemente definito una possibile struttura del rover, si procede ora ad una simulazione del sistema in esame mediante software multibody. Essi costituiscono una componente cruciale nell'ambito della simulazione dei veicoli, cambiando in modo sostanziale l'approccio all'ingegneria e al design veicolistico.

Questi strumenti consentono di creare rappresentazioni virtuali complesse dei mezzi, modellando in modo dettagliato le interazioni tra le diverse parti in movimento. Ciò consente agli ingegneri di esaminare e prevedere con buona precisione il comportamento dinamico dei veicoli in condizioni varie, quali accelerazione, frenata, curvatura e non per ultimo le correlazioni con la superficie stradale.

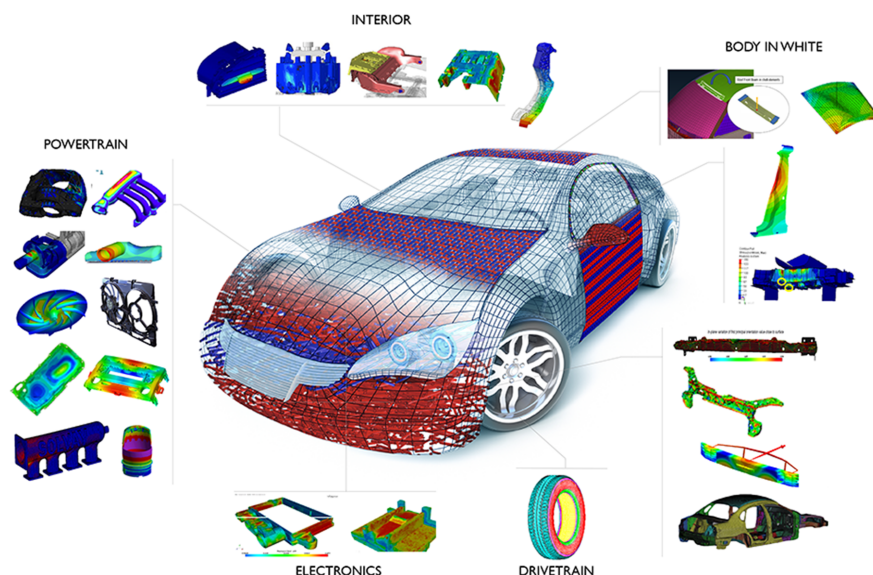


Figura 4.1: Esempio di applicazioni di un sistema multibody [65]

I software multibody operano attraverso la definizione di modelli dettagliati delle parti mobili del veicolo, come sospensioni, pneumatici, telaio e organi di trasmissione. Questi sono dotati di proprietà fisiche e parametri specifici e, una volta definita la simulazione da effettuare, il software calcola le forze, le accelerazioni e le reazioni in base alle interazioni tra le parti stesse e tra queste e l'ambiente circostante. Inoltre, questi programmi consentono di simulare varie condizioni, fornendo un'ampia gamma di dati di output utili per l'analisi.

L'utilizzo di questi programmi presenta una serie di vantaggi notevoli. Innanzitutto, riduce la dipendenza dai costosi prototipi fisici, accelerando il processo di sviluppo e consentendo una maggiore flessibilità nella fase di progettazione. Inoltre, la capacità di simulare una vasta gamma di scenari aiuta gli ingegneri a individuare potenziali problemi e a ottimizzare la progettazione, migliorando la sicurezza e le prestazioni dei veicoli. Con l'evoluzione continua di tali software, l'ingegneria dei veicoli è in grado di raggiungere nuovi livelli di efficienza, sicurezza e innovazione.

4.2 La simulazione

Nel caso del rover progettato nel paragrafo precedente (3) risulta interessante utilizzare un software multibody al fine di comprendere il comportamento del veicolo durante le fasi di lavorazione e soprattutto valutare le sue prestazioni in caso di terreno in pendenza.

Un aspetto molto discusso e importante in questo campo risulta essere il fenomeno del ribaltamento. Numerosi sono i casi di decesso o di gravi ferite a seguito del ribaltamento di mezzi agricoli quali cingoli e trattori. L'INPS nel 2018 ha calcolato che il 49% degli incidenti mortali che avvengono durante l'utilizzo delle trattrici è proprio dovuto al fenomeno del ribaltamento [66].

Pertanto, in tale trattazione si è cercato di realizzare un modello che approssimasse il veicolo finale, andando poi a sottoporlo ad una serie di prove al fine di valutare la sua dinamica rispetto al ribaltamento.



Figura 4.2: Esempio di due casi di ribaltamento in agricoltura [67] [68]

Ovviamente si è consapevoli che al fine di valutare una reale condizione di utilizzo si dovrebbe eseguire una simulazione completa del ciclo di lavoro in campo, tuttavia a causa di risorse hardware limitate, ci si è limitati a semplificare i passaggi chiave del rover in tre simulazioni distinte.

1. Tilt Test, ovvero un test statico in cui il modello del veicolo viene posto su un piano che, con l'avanzare del tempo, aumenta la sua inclinazione, fin a raggiungere il ribaltamento;
2. Ramp Test, un test dinamico, in cui vengono valutate le prestazioni del rover durante una salita a pendenza crescente, al fine di valutare la massima pendenza affrontabile;
3. Overturn Test, un test anche questa volta dinamico in cui al veicolo viene fatta eseguire un'operazione di svolta durante la quale incontra un possibile ostacolo, il cui impatto pone l'intero mezzo nella possibile condizione di ribaltamento.

Come si potrà apprezzare successivamente, le tre simulazioni si differenzieranno non soltanto per il tipo di prova effettuata, ma anche per il tipo di controllo utilizzato. Nel

primo caso analizzato il veicolo è considerato fermo, pertanto non intervengono controlli sulla gestione del suo avanzamento.

Nei restanti due casi il veicolo dovrà procedere nella direzione desiderata. In tale situazione esiste la possibilità di controllare le ruote, quindi il movimento, attraverso due approcci distinti. Il primo risulta essere la gestione della coppia fornita mentre il secondo la modulazione della velocità di rotolamento degli pneumatici.

Volendo anticipare quanto ottenuto, considerando le condizioni di contatto ruota-terreno, sicuramente un controllo in coppia risulta essere più preciso rispetto al controllo in velocità, in quanto va a simulare la fornitura di coppia dei motori sulle ruote. Tuttavia, a causa della notevole necessità di controlli, misurazioni e calcoli, il modello ottenuto risulta essere molto pesante dal punto di vista computazionale, di conseguenza il tempo necessario ad una singola simulazione diventa moderatamente elevato.

Il controllo in velocità invece risulta essere meno preciso dal punto di vista fisico, in quanto andando ad impostare come vincolo la velocità delle ruote, non viene considerata in nessun modo la coppia necessaria per ottenere tale accelerazione. Il costo computazionale tuttavia è inferiore al precedente, permettendo quindi di ottenere i risultati delle simulazioni in tempi inferiori.

Si procederà ora ad una descrizione generica del modello virtuale utilizzato, andando ad analizzare come esso è stato pensato e successivamente implementato sul software. Al fine di rendere generico tale capitolo, verranno proposte tutte le soluzioni adottate in fase di sviluppo, tuttavia nelle tre simulazioni si ritroveranno solamente le parti attinenti a quest'ultime. Volendo fare un esempio esplicativo, durante la definizione si ritroverà la parte di "inseguimento della traiettoria", che ovviamente risulterà inutile nella parte di Tilt Test.

4.3 Il modello

Per effettuare queste simulazioni è stato necessario realizzare un modello che fosse il più vicino possibile al veicolo pensato nella parte di progettazione. Pertanto si è cercato di comprendere quali fossero le parti principali costituenti il rover finale, in modo da poterle approssimare con dei solidi più semplici che, una volta combinati insieme, potessero risultare simili al mezzo ottenuto nella parte precedente.

Bisogna tuttavia ricordare che un modello è per definizione una descrizione "intelligente" della realtà, ovvero non necessita di essere accurato in ogni sua parte, ma deve essere il più rappresentativo possibile del sistema che si vuole studiare.

Le sottoparti in cui il veicolo è stato suddiviso da modellizzare risultano essere:

- Telaio
- Montanti
- Ruote
- Pacco Batterie

Per ognuna di esse si andrà ora a commentare brevemente la loro realizzazione e quali approssimazioni si è scelto di effettuare per evitare di rendere troppo complesso il modello.

4.3.1 Realizzazione modello del veicolo

Telaio

Questa parte, a causa della sua struttura, è risultata essere la più complessa da implementare e da approssimare. Come già esposto nel paragrafo 3.1.1, per realizzare tale componente sono stati utilizzati dei profilati saldati, in modo da alleggerire la struttura e irrigidirla. Come geometria dei vari elementi costituenti il telaio sono stati scelti dei profili cavi, utilizzando dei semplici quadrati senza raccordi.

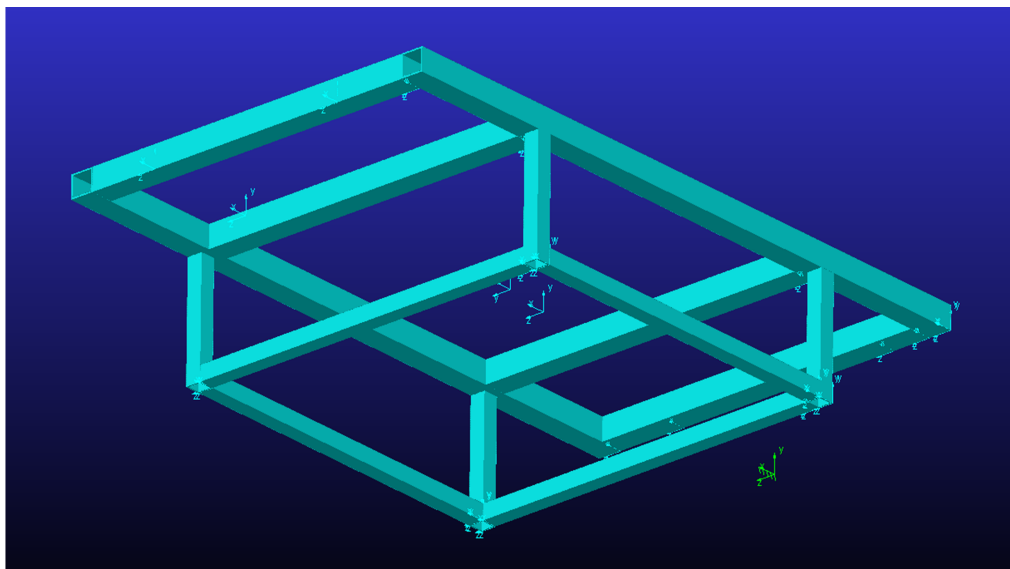


Figura 4.3: Telaio realizzato su Adams con profili cavi

Dal momento che il multibody non analizza gli sforzi interni della struttura, bensì va ad individuare le relazioni tra i vari componenti realizzati e tra questi e l'ambiente esterno, durante la realizzazione del modello che approssimasse il telaio "reale" è stata privilegia-

ta la direzione della semplicità rispetto a quella della accuratezza. La geometria è stata infatti semplificata al fine di rendere la sua realizzazione più semplice. Dovendo però rispettare masse ed inerzie per la simulazione dinamica, questi parametri sono stati imposti una volta terminata la modellizzazione dell'elemento.

Ogni singolo oggetto presente nel modello può essere infatti modificato, andando ad adattare per esso i valori di massa e inerzia ottenuti in fase di progetto dal modello CAD, così facendo è possibile attribuire valori specifici, senza che siano correlati in modo diretto alla geometria. Di seguito, in figura 4.4, si riporta un esempio di semplificazione realizzata durante l'implementazione del modello.

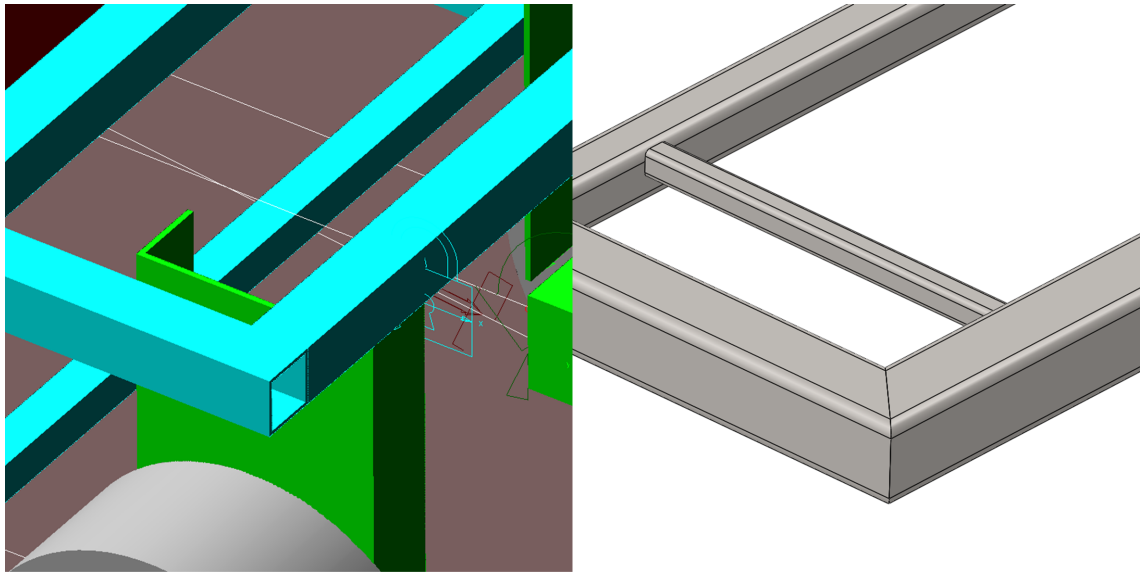


Figura 4.4: Giunzioni tra i profilati realizzate su Adams (a sinistra) e su Solidworks (a destra)

Sempre per una motivazione di semplicità di realizzazione si è scelto di non realizzare un telaio disgiunto tra la parte superiore e la parte inferiore, unito successivamente mediante bulloni, bensì un componente unico, in modo da avere un solo oggetto che descrivesse l'intero telaio. Volendo comunque rispettare quanto pensato in fase di progetto, le due parti sono state realizzate mediante profili cavi di dimensioni maggiori sulla parte "principale" ed inferiori nella "culla" sottostante.

Al fine di realizzare tale struttura il software non prevede l'utilizzo di profili cavi, ma si rende necessario andare ad inserire un parallelepipedo a base quadrata pieno e successivamente, mediante il comando di rimozione, andare ad asportare la parte centrale.

Montanti

Collegati direttamente al telaio troviamo poi i cosiddetti montanti, ovvero quei componenti che fungono da collegamento tra le ruote e il telaio, portando la struttura sino all'altezza desiderata. Come nel caso precedente, il componente progettato nel paragrafo 3.1.2 è stato semplificato ed adattato, per essere poi realizzato in ambiente multibody.

La struttura finale viene realizzata con un profilato a "C" estruso per la lunghezza complessiva del montante. Come nel caso del telaio precedente anche in questo caso è stato necessario inserire un blocco completo, andando poi a rimuovere la parte centrale, al fine di ottenere la forma voluta.

Come nel caso precedente del telaio, il componente realizzato in virtuale risulta avere

caratteristiche differenti in termini di massa e inerzia. Per correggere tale situazione quindi si sono valutati i precedenti parametri su software CAD e successivamente sono stati inseriti nel modello, ottenendo dei componenti equivalenti in termini di massa ed inerzia.

Al fine tuttavia di considerare anche la presenza del motore in vincolo rigido con il montante, evitando di aggiungere un'ulteriore componente, è stato scelto di attribuire al montante la componente di massa ed inerzia dovuta a quest'ultimo. Ovviamente si è consapevoli dell'approssimazione effettuata, ma dal momento che i due elementi sono ravvicinati nel veicolo finale, tale scelta non influenza in modo eccessivo la simulazione.

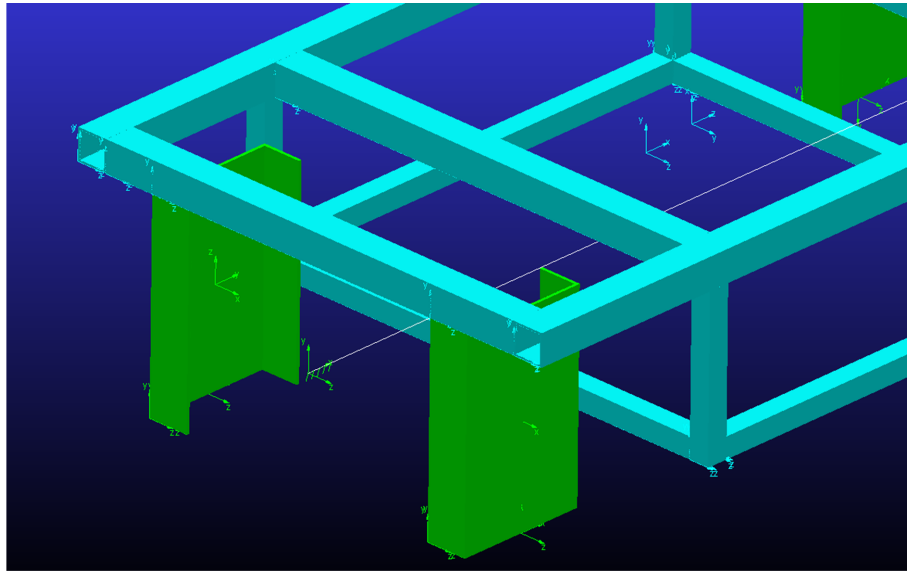


Figura 4.5: Montanti realizzati su Adams e inseriti nel modello

Ruote

Nella presente trattazione le ruote sono state approssimate con dei cilindri pieni, a cui, sempre mediante variazione dei valori di massa e di inerzia, sono stati assegnati i parametri corretti, al fine di rendere quanto più veritiero possibile il modello.

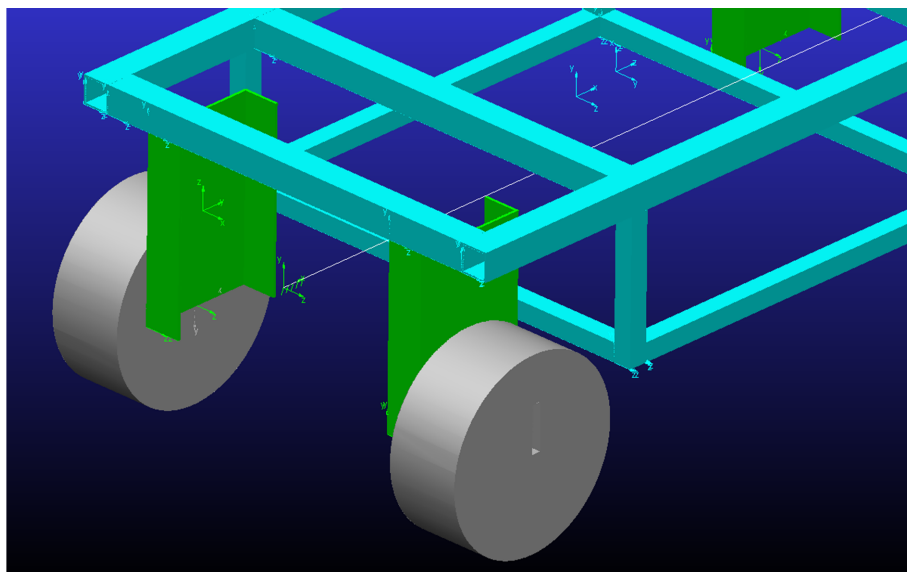


Figura 4.6: Modello delle ruote inserite su Adams

Per quanto riguarda invece il modo con cui le ruote sono state collegate al telaio si rimanda al paragrafo 4.3.2, dove si tratteranno i vincoli utilizzati. Si anticipa soltanto che, come in uno dei metodi riportati nell'articolo [69], si è scelto di considerare sia il terreno che la ruota come corpi rigidi, andando ad attribuire tutta la deformabilità al giunto deformabile che collega ruota e montante.

Batteria e componenti ausiliari

Essendo ancora in fase progettuale, risulta difficile poter determinare in modo preciso ed esaustivo le componenti presenti a bordo. Al fine comunque di tenere in considerazione tali parti all'interno della simulazione, si è scelto di inserire una massa rappresentativa al centro del veicolo, attribuendo ad essa tutto ciò che non ricadeva nei componenti precedentemente descritti.

La componente principale in termini di peso e inerzia risulta essere sicuramente la batteria. Il suo peso, infatti, rappresenta un fattore molto importante nel calcolo della massa complessiva del veicolo. Seguendo questa filosofia si è scelto di modellare questo componente attraverso un parallelepipedo che simulasse il posizionamento della batteria, in cui, oltre alla massa di quest'ultima, fosse attribuita una parte dovuta ai restanti componenti quali inverter, PDU e sistemi di rilevamento.

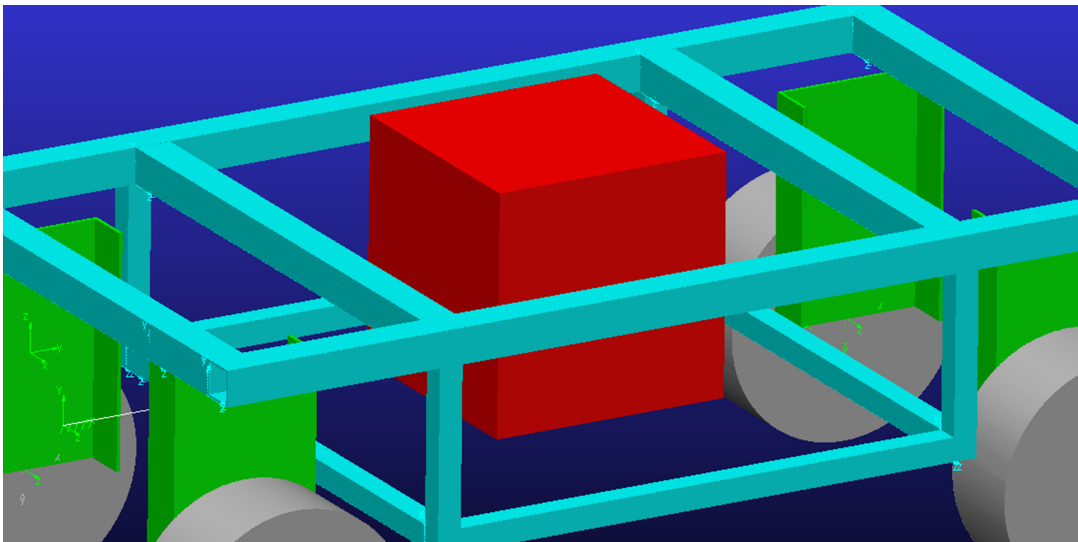


Figura 4.7: Modello della batteria montato sul telaio

Come si può notare in figura 4.7, la batteria potrebbe sembrare "fluttuante" rispetto al telaio, ma questo è un classico aspetto dei software multibody. Come si vedrà infatti nel paragrafo 4.3.2, i componenti all'interno del modello possono essere vincolati in modo rigido reciprocamente, anche senza la necessità di un effettivo contatto.

4.3.2 Modello complessivo e vincoli

Per poter legare insieme le varie componenti il software mette a disposizione una serie di vincoli, i quali cercano di approssimare un comportamento quanto più possibile reale. Ovviamente essi risultano essere delle approssimazioni, poiché nella realtà non esistono vincoli perfettamente rigidi o con caratteristiche definite in modo esatto e costante, tuttavia per un'analisi preliminare quale questa che si sta realizzando sono più che sufficienti. Come già precedentemente descritto, il telaio è stato realizzato in un

unico componente e pertanto non è stato necessario implementare nessun vincolo per realizzare la sua descrizione.

Per quanto riguarda invece i montanti essi sono stati realizzati separatamente dal telaio. Nel progetto essi vengono collegati al telaio mediante una giunzione bullonata che, nel software multibody, è stata approssimata con un vincolo rigido. Tale vincolo rende impossibile il moto relativo tra due corpi vincolando tutti e 6 i corrispettivi gradi di libertà.



Figura 4.8: Simbolo del vincolo rigido

Per simulare la deformabilità delle ruote, come suggerito in uno degli approcci utilizzati nell'articolo [69], si vuole consentire uno spostamento relativo tra la ruota ed il supporto lungo gli assi perpendicolari all'asse di rotazione, secondo una rigidezza definita. A tale scopo si introdurrà un valore di rigidezza che rappresenti il comportamento dello pneumatico nei campi che nelle direzioni in cui è permesso il movimento, mentre un valore di parecchi ordini di grandezza superiore per quanto riguarda la rigidezza lungo l'asse di rotazione, in modo da approssimarlo a rigido.

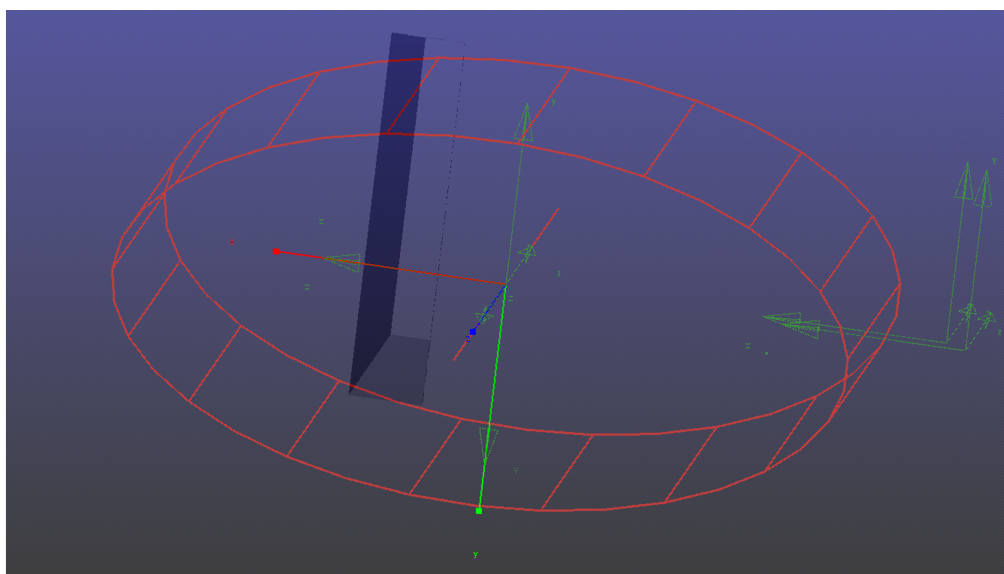


Figura 4.9: Simbolo rappresentativo del Bushing Joint

Lo stesso ragionamento deve essere seguito anche per la compilazione dei campi che si riferiscono allo smorzamento. Passando alle rotazioni attorno agli assi principali, è evidente che l'unica rotazione che si vuole lasciare libera è quella lungo l'asse del mozzo. Le restanti due rotazioni devono essere bloccate in quanto le ruote non possono ruotare su assi differenti a causa del vincolo con il mozzo. Per realizzare tutto questo il software mette a disposizione il cosiddetto "bushing joint", il quale permette la realizzazione di un vincolo secondo i parametri precedentemente elencati. Tale vincolo infatti, rispetto al vincolo rigido, non rimuove in modo completo i gradi di libertà, bensì associa ad ogni singolo grado una specifica condizione, specificata in fase di definizione. Come valori da attribuire a tale vincolo sono stati utilizzati quelli proposti nella tesi [70], nella quale dopo aver analizzato l'interazione ruota terreno sono stati proposti dei valori ottimali per la simulazione di un terreno cedevole.

Parametri Bushing Joint	
<i>Traslazioni</i>	
Rigidezza principale	500 N/mm
Rigidezza secondaria	10^6 N/mm
Smorzamento principale	4 N·s/mm
Smorzamento secondario	10^3 N·s/mm
<i>Rotazioni</i>	
Rigidezza principale	10^8 N·mm/°
Rigidezza secondaria	0 N·mm/°
Smorzamento principale	10^8 N·mm·s/°
Smorzamento secondario	0 N·mm·s/mm

Figura 4.10: Tabella riassuntiva dei parametri assegnati al bushing joint

Infine, per vincolare il box rappresentativo della batteria e delle restanti parti non considerate, si è scelto di trascurare la presenza di supporti antivibranti, con la loro relativa cedevolezza, andando a considerare un collegamento rigido solidale con il telaio. Andando opportunamente ad assemblare i componenti precedentemente descritti si ottiene il modello finale:

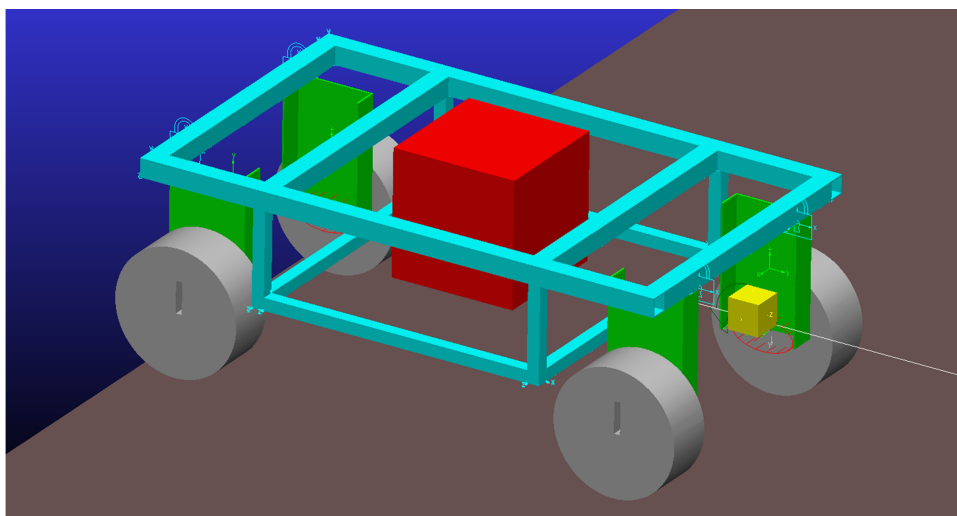


Figura 4.11: Modello del veicolo completo realizzato su Adams

4.3.3 Contatti

Dopo aver definito il modello fisico con cui realizzare la simulazione, è necessario fornire al software le informazioni sui vari contatti tra i corpi realizzati. In particolare, nella presente trattazione sono presenti due casi di contatto, il primo tra le ruote e il terreno, mentre il secondo tra le ruote e gli eventuali ostacoli presenti. Al fine di realizzare questi contatti il software, all'interno della sezione "Special Forces", mette a disposizione la funzione "Create Contact". Attraverso tale comando si va a creare un'interazione tra due corpi quando entrano in contatto, potendo tarare numerosi parametri al fine di caratterizzare in modo esatto il contatto desiderato. È possibile infatti modellizzare l'interazione tra i due corpi andando a variare la rigidezza, l'esponente della forza e la profondità di penetrazione del contatto. A questi poi, se necessario, è anche possibile aggiungere un coefficiente di smorzamento e la presenza di attrito nel contatto. Questi ultimi due parametri servono per rendere più reale il contatto. Nella pratica, infatti, difficilmente si ritroveranno dei contatti perfettamente elastici. L'attrito invece è necessario per avere aderenza tra i corpi, fondamentale nel caso in cui si debba realizzare un moto relativo tra i corpi a contatto. Nel caso in esame si vanno quindi a creare i contatti relativi terreno-ruote e terreno-ostacolo, andando a settare i vari parametri secondo quanto riportato nello studio [70]. Ovviamente non è sufficiente definire un singolo contatto sull'oggetto come se dovessimo attribuirgli una rigidezza, ma è necessario definire una serie di contatti per ogni coppia di elementi che entra in interazione.

Parametri Forza Contatto	
<i>Forza di contatto</i>	
Rigidezza	300
Esponente della forza	2,0
Smorzamento	0
Profondità di penetrazione	0,01

Figura 4.12: Tabella dei valori di contatto utilizzati

4.3.4 Definizione della traiettoria e Dummy Body

Al fine di assegnare una traiettoria predefinita al rover, è necessario stabilire un percorso da seguire. Per fare questo il software mette a disposizione un generatore di polilinee, che, associato ad un cosiddetto "Dummy Body", verrà utilizzato per fornire la direzione all'interno della simulazione. Questo non è altro che un corpo senza massa e senza inerzia, vincolato in modo rigido a seguire la traiettoria definita dalla polilinea.

Per fare questo il software mette a disposizione il comando "Point-Curve Constrain", che vincola un punto a muoversi su una curva predefinita. Andando poi a correlare in modo opportuno il Dummy Body con il veicolo, si riesce ad ottenere un moto del veicolo che ripercorra la traiettoria tracciata. Durante l'avanzamento quindi il veicolo si muove in modo "indipendente" rispetto al Dummy Body, poiché in realtà sarà quest'ultimo ad assecondare il rover nel movimento, rimanendo sempre e comunque sulla traiettoria assegnata. Questo rispecchia il problema fisico di partenza, dove il rover non deve essere vincolato in modo assoluto a seguire la traiettoria, ma attraverso la gestione della coppia o della velocità, tenderà a cercare di seguirla.

Grazie a questo sistema, è possibile stabilire, sia che ci si trovi in controllo coppia che in controllo velocità, una traiettoria di test, che verrà utilizzata come riferimento dal veicolo.

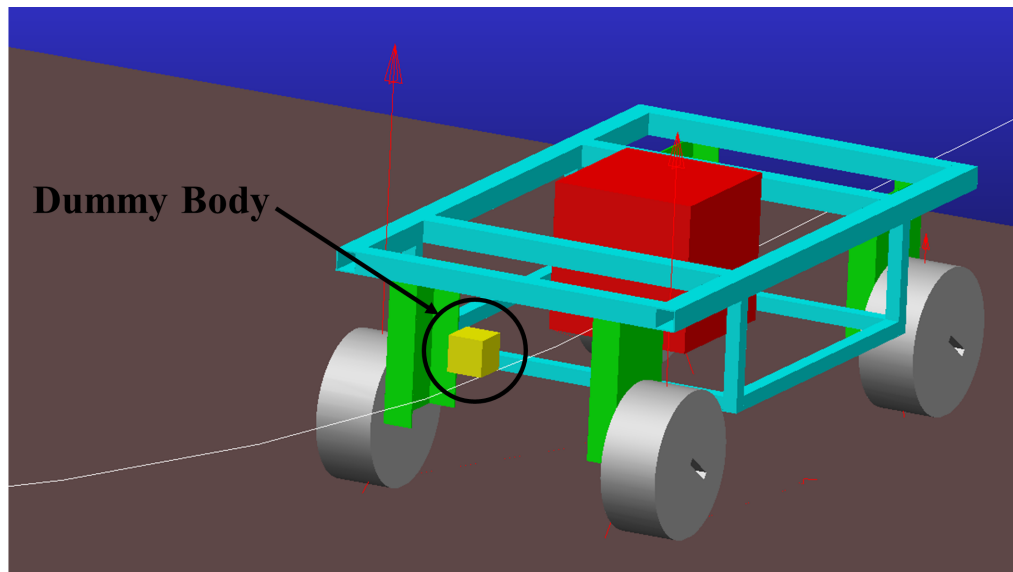


Figura 4.13: Modello del Dummy Body realizzato sul software Adams

4.3.5 Terreno e Ostacoli

Al fine di rendere possibile la simulazione è necessario implementare, oltre al modello del veicolo, anche il terreno sul quale svolgere la prova. Per fare questo, seguendo l'approccio esposto nel paragrafo relativo alle ruote, il fondo è stato implementato come un parallelepipedo rigido, vincolato in modo fisso al ground, ovvero all'ambiente base della simulazione. Attraverso poi un vincolo rigido sono stati inseriti gli ostacoli, in modo da poter simulare le asperità del terreno. In questo caso la massa e l'inerzia degli oggetti inseriti può essere trascurata, dal momento che non vengono interessati dalla dinamica della simulazione.

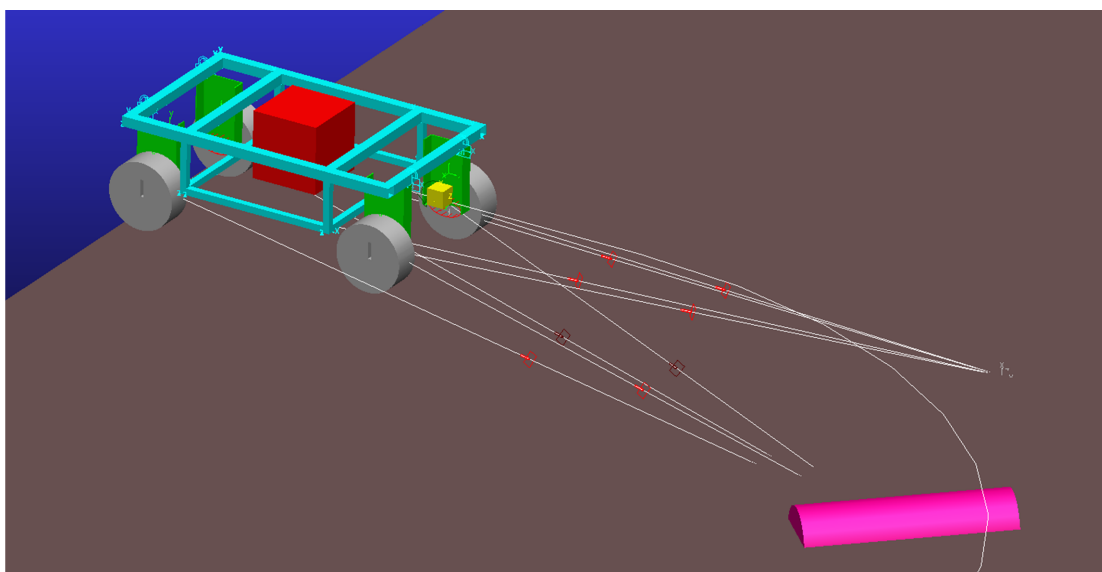


Figura 4.14: Modello della simulazione con presenza di ostacolo e traiettoria

Come ostacoli sono stati utilizzati dei cilindri opportunamente piazzati, al fine di realizzare un'approssimazione di un eventuale ostacolo o avvallamento del terreno, come è stato realizzato nella simulazione dell'articolo *Dynamic behaviour of a battery pack for agricultural applications* [71] . Come si può notare dalla figura 4.14 il cilindro è stato sistemato in modo che soltanto una parte di esso si elevi dalla superficie. Questo è stato realizzato al fine di realizzare un impedimento che comunque potesse essere superato dal rover. La quota di "fuoriuscita" del cilindro può essere variata in modo semplice, ciò, come si vedrà successivamente, verrà utilizzato nel modello dinamico di ribaltamento, al fine di valutare le condizioni di ribaltamento. Esso sarà un parametro fondamentale per l'analisi, in quanto tale valore influenza in modo importante la dinamica e la risposta del veicolo.

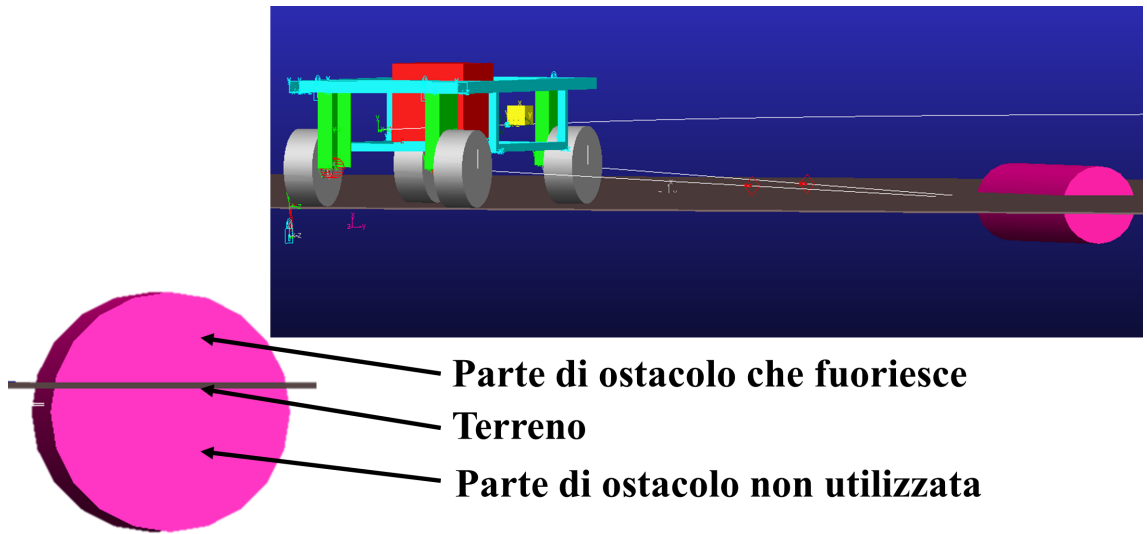


Figura 4.15: Posizionamento dell'ostacolo sul terreno nel modello

4.3.6 Controllo del veicolo

Come già anticipato nel paragrafo precedente (4.3.4), il controllo del veicolo viene eseguito andando a valutare la differenza di posizione tra la traiettoria desiderata (riferimento ottenuto dal Dummy Body) e la posizione del veicolo. Le possibilità di correzione e di gestione del movimento sono sostanzialmente due, la prima è un controllo velocità, la seconda, un controllo coppia. Al fine di esplicitare successivamente in modo comprensivo le strategie di controllo adottate in questa trattazione, si riporta brevemente la teoria del Torque Vectoring [72]. Tale metodo di sterzata prevede l'applicazione di un differenziale di coppia tra ruote destre e sinistre che permette di far ruotare il veicolo, allineandolo con la direzione desiderata. Per fare questo devono essere noti la velocità del veicolo, $\dot{x}$, e la velocità di imbardata, ovvero di rotazione lungo l'asse perpendicolare al terreno, che si intende realizzare $\dot{\theta}$. Di solito tali valori nei veicoli a guida autonoma sono ottenuti per mezzo di algoritmi di inseguimento della traiettoria. Una volta scritte queste grandezze rispetto alle velocità angolari delle ruote destre e sinistre, ω_l e ω_r , è possibile, attraverso l'inversione delle formule, ricavare proprio queste ultime grandezze:

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{r \cdot (\omega_l + \omega_r)}{2} \\ \dot{\theta} = \frac{r \cdot (\omega_l - \omega_r)}{2l} \end{cases} \implies \begin{cases} \omega_r = \frac{\dot{x}}{r} - \frac{\dot{\theta} \cdot l}{r} \\ \omega_l = \frac{\dot{x}}{r} + \frac{\dot{\theta} \cdot l}{r} \end{cases} \quad (4.1)$$

Dove:

- $\dot{x}$ è la velocità di avanzamento del veicolo;
- $\dot{\theta}$ è la velocità angolare di imbardata;
- ω_l è la velocità angolare delle ruote sinistre;
- ω_r è la velocità angolare delle ruote destre;
- r è il raggio delle ruote;
- l è il passo del veicolo.

Noto ora il comportamento cinematico che il veicolo dovrà possedere per eseguire la sterzata desiderata si può realizzare il calcolo della coppia da fornire alle ruote al fine di realizzare tale manovra. Per fare questo è sufficiente andare a valutare la velocità angolare della singola ruota, confrontarla con quella ottenuta dal calcolo cinematico e in base a questo fornire oppure rimuovere coppia.

$$C_i = K \cdot (\omega_{r/l} - \omega_i) \quad (4.2)$$

Dove:

- C_i è la Coppia da applicare alla ruota i -esima di avanzamento del veicolo;
- K è un fattore correttivo proporzionale che necessita di taratura;
- $\omega_{r/l}$ è la velocità angolare delle ruote destre/sinistre;
- ω_i è la velocità angolare attuale della ruota considerata.

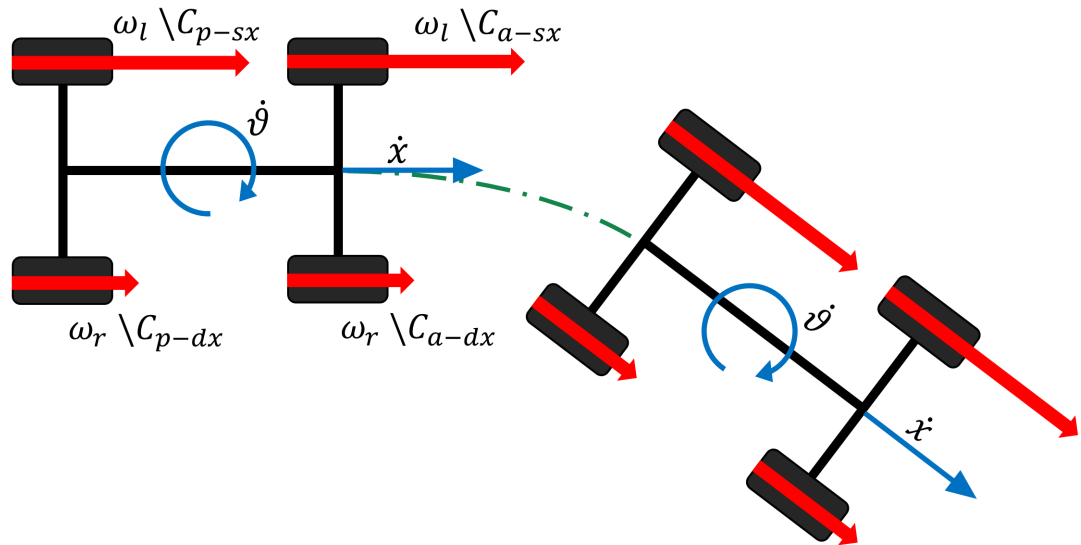


Figura 4.16: Schema esemplificativo dell'applicazione del torque vectoring

Compreso ora come opera la sterzata mediante differenziale di coppia è possibile descrivere brevemente i due differenti approcci considerati.

Nel controllo eseguito mediante la modulazione della coppia si è seguito in modo rigoroso quanto riportato nella teoria. Avendo imposto una velocità $\dot{x}$ al veicolo (variabile a discrezione dell'utente), si procede a calcolare la grandezza $\dot{\theta}$ del veicolo rispetto al Dummy Body, secondo la necessità di mantenimento della traiettoria. Una volta note questi parametri, attraverso la formula 4.1, si valuta la velocità angolare delle ruote e a quel punto è possibile eseguire il calcolo della coppia da applicare mediante la formula 4.2. La velocità attuale della ruota viene ottenuta andando ad effettuare una misurazione ed oltre a questo, al fine di rendere veritiera la simulazione, è stata imposta una velocità

massima attribuibile alle ruote, dal momento che nel reale esiste un limite massimo a cui i motori possono ruotare. Per quanto riguarda invece il controllo velocità si è utilizzata sempre la teoria precedente, ma limitandola al calcolo delle ω_l e ω_r .

Anche in questo caso è possibile impostare la velocità target desiderata $\dot{x}$ e, mediante la valutazione del valore di $\dot{\theta}$ attraverso il riferimento del Dummy Body, secondo la formula 4.1 si calcolano agevolmente le velocità da assegnare alle ruote.

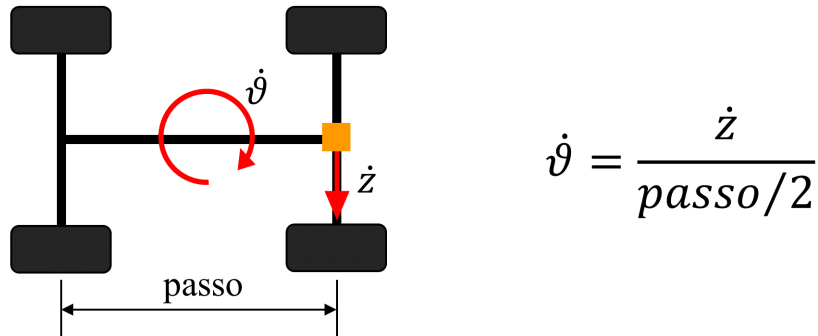


Figura 4.17: Schema esemplificativo del calcolo di $\dot{\theta}$

Ovviamente dal punto di vista fisico, il controllo velocità risulta essere sicuramente meno preciso e veritiero, dal momento che non considera l'inerzia della ruota durante la fase di accelerazione. Dovendo infatti imporre una velocità calcolata, le fasi di accelerazione e decelerazione vengono eseguite senza tenere presente la coppia da fornire per eseguire tale passaggio.

Tuttavia, dopo aver realizzato sul software entrambi i modelli e aver valutato il tempo di calcolo di entrambi, è stato scelto di limitare l'utilizzo del controllo coppia al ramp test, dal momento che esso richiede un numero di prove limitato. Nel test di ribaltamento invece, come già anticipato precedentemente, si è scelto il controllo velocità al fine di velocizzare il processo di costruzione dei grafici, i quali richiedevano un numero elevato di prove.

4.4 Tilt test

In questa prima prova si è scelto di realizzare un test al fine di stabilire l'angolo di ribaltamento del mezzo con velocità nulla, ovvero quando il mezzo risulta essere fermo. Ovviamente tale condizione risulta essere difficile da ritrovare durante le condizioni lavorative, ma è rappresentativa del comportamento del veicolo rispetto alla pendenza del terreno in cui esso andrà a lavorare. Volendo generalizzare, i risultati di tale test forniscono un "benchmark", nel quale questa risulta essere la condizione di inclinazione massima in cui il rover potrà trovarsi.

Come si effettuerà successivamente, andando ad aggiungere una componente dinamica al sistema, si otterranno dei risultati inferiori in termini di inclinazione massima, dovuti proprio alla velocità del veicolo, alla sua inerzia e ad eventuali disturbi presenti sul terreno (eventuali dossi o asperità).

Per determinare quindi l'angolo massimo di pendenza del terreno che non causa il ribaltamento è stato utilizzato il modello di veicolo definito in precedenza e posto su un terreno che è stato reso mobile. Nel particolare è stata attribuita al suolo una velocità di rotazione, opportunamente tarata al fine di non influire sui risultati finali. Avendo poi realizzato una serie di misurazioni, in particolare sulla posizione angolare e sulla velocità angolare relativa al rollio del veicolo, si è andati a valutare dove fosse presente una discontinuità di tali funzioni, tale punto corrisponde all'innescamento del ribaltamento e quindi la condizione critica del sistema. Di seguito in figura 4.18 si riporta la prima prova effettuata.

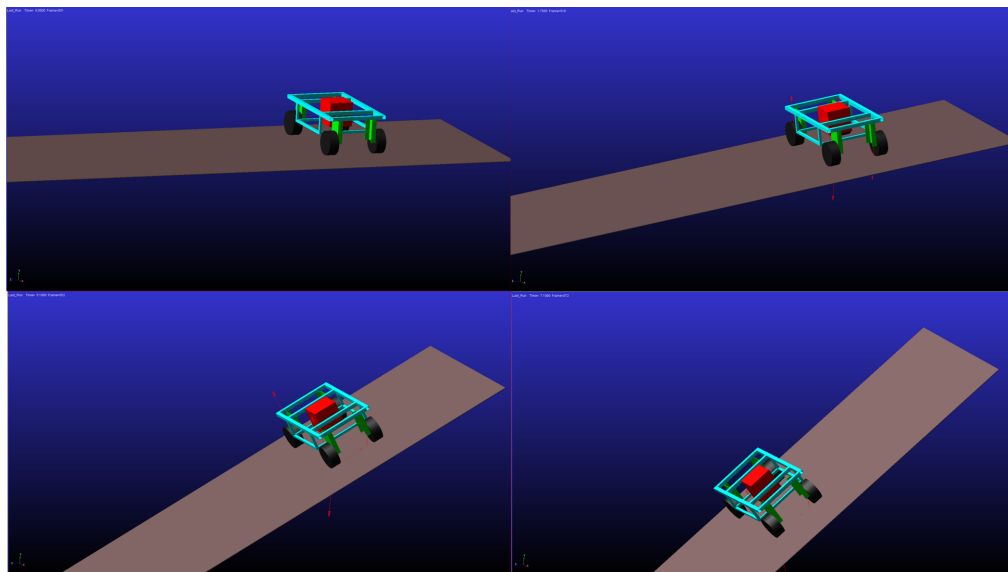


Figura 4.18: Istanti relativi alla prima simulazione

Come si può notare, in questa prima valutazione del modello non è stata raggiunta la fase di ribaltamento in quanto prima che ciò avvenisse il rover ha perso aderenza ed è quindi scivolato verso il basso senza una variazione significativa dell'angolo di rollio.

Ciò è visibile anche dai dati ottenuti dove si può notare come per tutta la durata della simulazione l'angolo aumenti in modo costante (questo aumento è dovuto alla rotazione del terreno sul quale il rover è posto), senza una variazione brusca, la quale sarebbe un sintomo di un ribaltamento. Oltre all'angolo, anche la velocità di rotazione del mezzo risulta essere praticamente costante, si notano però delle oscillazioni dall'istante relativo a 5 secondi in poi. Tale oscillazione potrebbe essere dovuta all'inizio dello scivolamen-

to e quindi ad una "vibrazione" indotta dall'attrito delle ruote sul terreno. In ogni caso la variazione di tale grandezza risulta essere molto contenuta e non caratteristica di un ribaltamento. Questi dati sono in linea con quanto atteso in quanto questa prima analisi è stata effettuata come test del modello e soprattutto non tiene conto delle asperità del terreno.

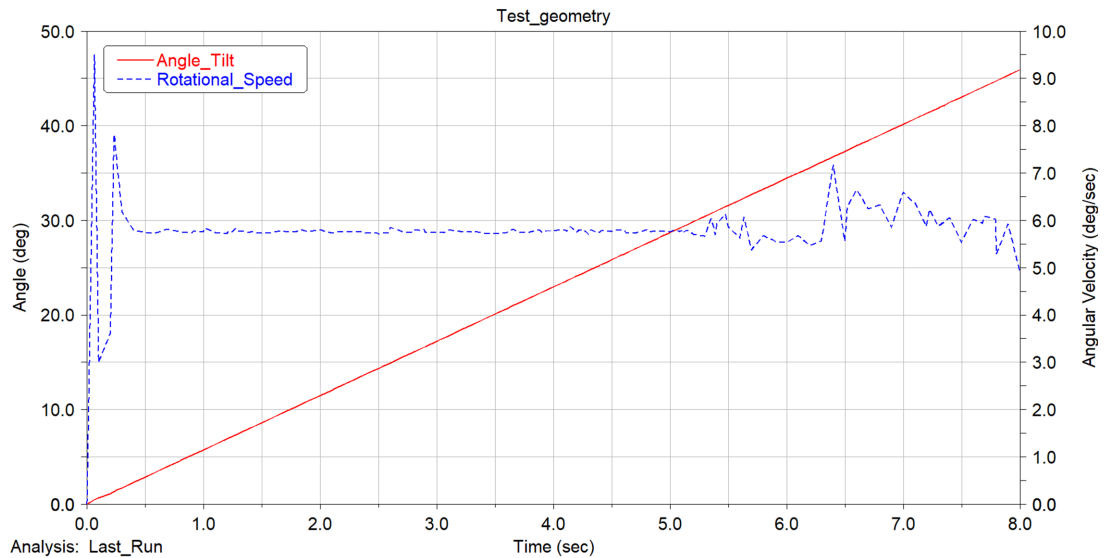


Figura 4.19: Grafico relativi alla posizione angolare e alla velocità di rotazione del rover nella prima prova

Il risultato ottenuto tuttavia non è rappresentativo di una condizione "reale", poiché non tiene conto di eventuali asperità che, in seguito all'inclinazione, causerebbero il ribaltamento. Volendo ricreare dunque tali condizioni, si è deciso di andare a realizzare un piccolo "gradino" che fosse in grado di impedire al veicolo di scivolare, raggiungendo così la condizione limite. Per fare ciò è stato implementato un blocco direttamente in prossimità delle ruote rivolte "a valle" che, con le relative forze di contatto, blocchi le ruote, ma che sia anche sufficientemente basso da non influenzare i risultati.

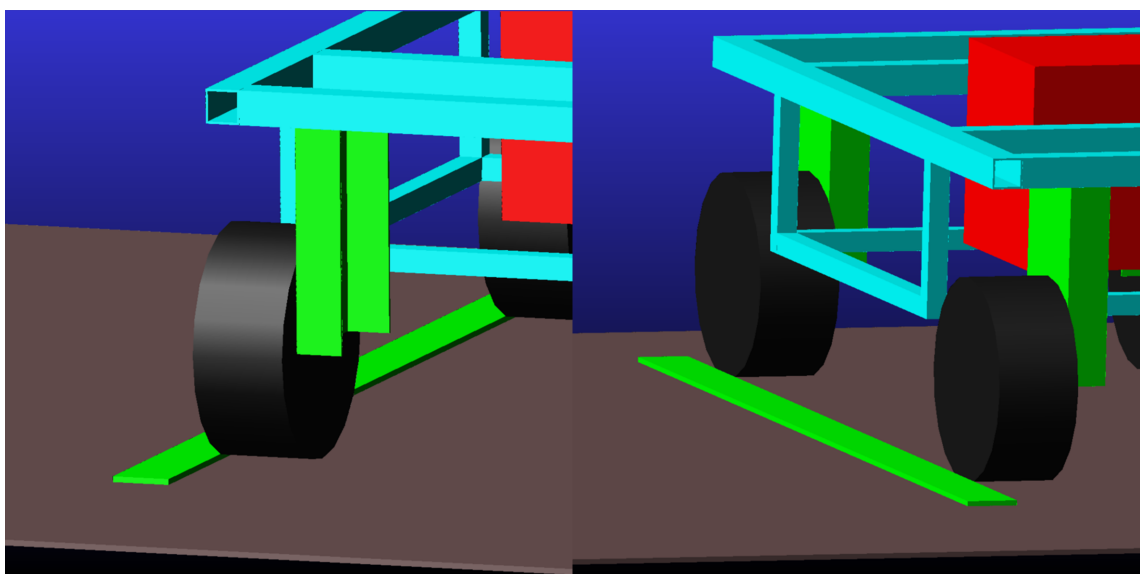


Figura 4.20: Blocco inserito nel modello al fine di eliminare la traslazione verso il basso del rover

Così facendo la simulazione ha permesso di valutare in modo esatto la reale condizione limite relativa al ribaltamento del mezzo. Tale risultato tuttavia deve essere analizzato in modo opportuno, in quanto fornisce un parametro utile ma relativo ad una situazione probabile nella realtà, ma non molto frequente. Esistono infatti dei casi in cui la traslazione potrebbe essere impedita da eventuali pietre o eventuali solchi nel terreno, tuttavia rimane sempre presente l'ipotesi di una condizione statica in cui il terreno varia pendenza, la quale è ovviamente difficile da ritrovare nel caso pratico. Al fine di comprendere meglio l'esecuzione della prova si riportano di seguito alcuni frame relativi ad essa.

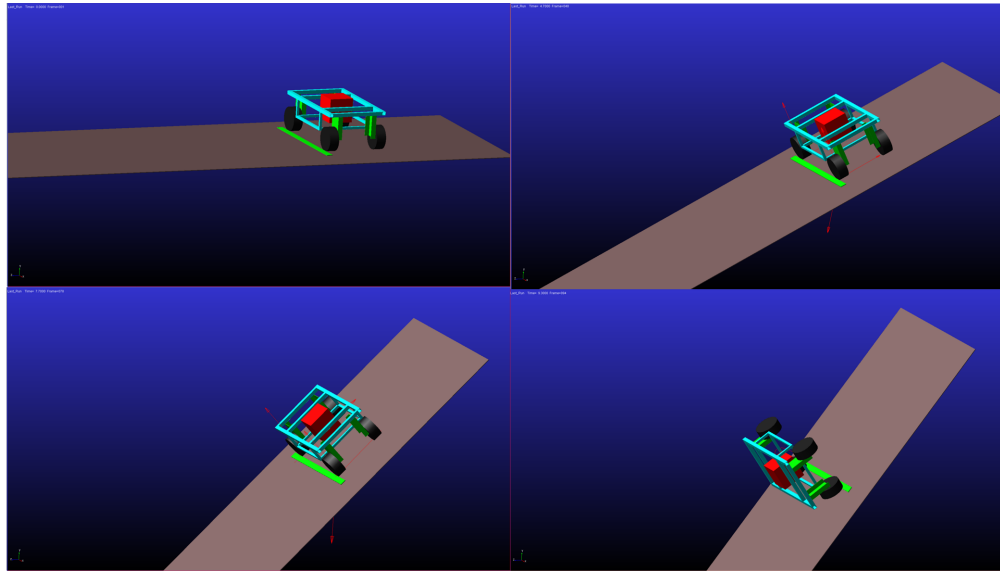


Figura 4.21: Istanti relativi alla simulazione con il blocco alla traslazione delle ruote

Come si può notare dalla figura 4.21, il ribaltamento del mezzo risulta essere ben individuabile mediante l'analisi grafica della simulazione, tuttavia, al fine di definire l'angolo esatto in cui avviene ciò è necessario analizzare i grafici. I grafici utili a comprendere tale parametro sono l'angolo di Tilt e la velocità di rotazione.

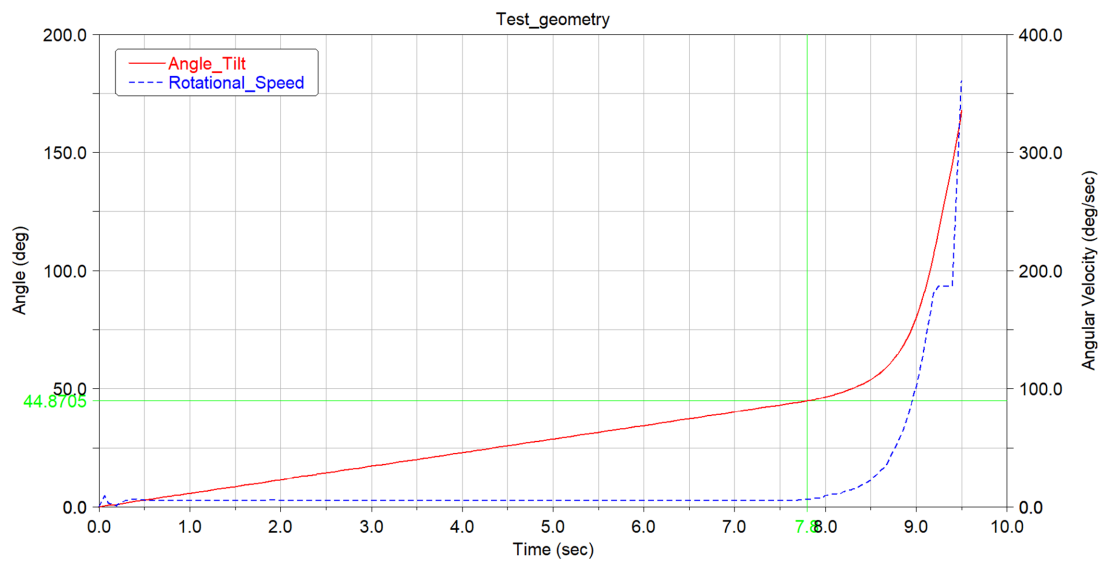


Figura 4.22: Grafico relativi alla posizione angolare e alla velocità di rotazione del rover nella seconda prova

Dal grafico ottenuto si è evidenziato un possibile istante di inizio della fase di ribaltamento. Dal momento che il software non prevede uno strumento per analizzare in modo esatto la curva, si è cercato di individuare tale condizione in modo approssimativo. Per fare questo si è cercata una variazione pronunciata della velocità angolare del veicolo, sintomo di un'imminente ribaltamento.

A questo punto noto l'istante, è stato sufficiente valutare la posizione angolare in tale ascissa, ottenendo così l'angolo massimo in cui il veicolo rimane stabile.

Come si può notare il valore ottenuto è di circa 45° , che riportato in termini percentuali corrisponderebbe ad una salita del 100%. Tale pendenza risulta essere sicuramente interessante dal punto di vista dello studio e della simulazione, ma perde di effettiva utilità dal momento che tali valori di inclinazione difficilmente vengono raggiunti in campo[73].

Al termine quindi si può indicare questo parametro come un limite superiore che in ogni caso non potrà mai essere superato con il presente design del rover, tuttavia al fine di definire una situazione di sicurezza durante delle fasi di lavoro non è sufficiente ed occorre procedere ad una simulazione dinamica.

4.5 Ramp Test

Durante questa simulazione si è andati ad utilizzare il modello precedentemente esposto, a cui è stata attribuita la capacità di avanzamento mediante il controllo della coppia.

Si è scelto di procedere con questa valutazione al fine di comprendere la massima pendenza risalibile dal veicolo, in modo da poterla confrontare con quella precedentemente stimata. Si ricorda infatti come nel paragrafo 3.1.2 si fosse imposta per la valutazione dei motori una pendenza massima del 30%. Ovviamente tale valore risulta essere maggiore della pendenza media dei terreni agricoli tradizionali [73], tuttavia è stato preso come valore di riferimento al fine di un contenuto sovradimensionamento dei propulsori. Come target prestazionale invece si è posto come obiettivo una pendenza di circa il 20%.

Lo svolgimento di tale prova verrà effettuato su un terreno la cui pendenza tende ad aumentare in modo progressivo. Si trova un primo tratto a pendenza nulla, nel quale il rover accelera sino alla velocità impostata nella prova, successivamente troviamo tre tratti distinti, con pendenza pari rispettivamente a α , $2 \cdot \alpha$ e $4 \cdot \alpha$.

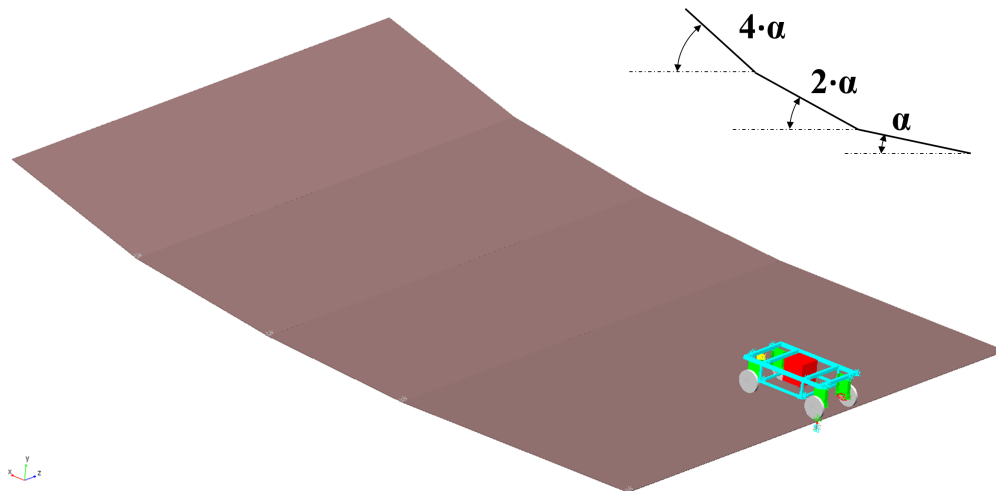


Figura 4.23: Modello a pendenza crescente del terreno

Il parametro α è stato definito come variabile durante la realizzazione del modello, in modo da rendere agevole un'eventuale necessità di variazione dell'inclinazione del terreno.

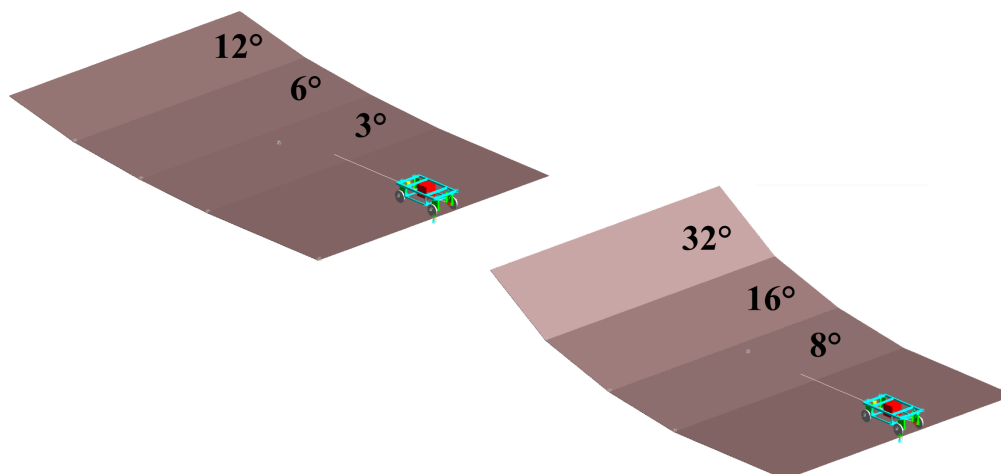


Figura 4.24: Esempio di variazione del parametro α

La prova si svolge andando ad assegnare una velocità imposta come target al veicolo, il quale cercherà di raggiungerla e, una volta raggiunta, di mantenerla. Durante questo processo il mezzo tenderà ad avanzare, prima con una fase di accelerazione e successivamente a velocità costante.

Durante il suo avanzamento la traiettoria rettilinea viene mantenuta grazie all'interazione tra il veicolo e il dummy body, permettendo così al mezzo di affrontare la salita progressiva del terreno. In tale simulazione ci si aspetta che ad un certo valore di inclinazione il rover non sarà più in grado di proseguire, essendo insufficiente la potenza erogata oppure venendo meno la condizione di attrito che garantisce l'aderenza delle ruote.

In ogni caso è da ricercare nei vari dati ottenuti la condizione di massima pendenza ammissibile e per farlo si è scelto di proporre una serie di grafici rappresentativi di tali prove. Come analisi significative vengono riportate le forze di contatto di una delle ruote anteriori, la velocità del veicolo, l'angolo di beccheggio, l'angolo di imbardata e la coppia applicata alla ruota.

Al fine di valutare varie casistiche, si riportano i grafici relativi a tre differenti velocità di spostamento, 10 km/h , 5 km/h , 2 km/h . Tali velocità sono state scelte a seguito della consultazione del libro *Fundamentals of Tractor Design* [74], in quanto la più elevata costituisce una velocità accettabile in fase di spostamento, mentre le altre due si riferiscono al target tipico per eseguire lavorazioni a media e bassa velocità. Non tutte le operazioni agricole infatti devono essere svolte alla stessa velocità in quanto necessitano di parametri su misura in funzione del compito svolto.

Di seguito si riportano i grafici ottenuti nelle varie prove, in particolare verranno confrontate una prova in cui il rover riesce a risalire la pendenza imposta, con la prova della pendenza minima che il rover non è più in grado di risalire.

Di seguito le prove eseguite a 2 km/h :

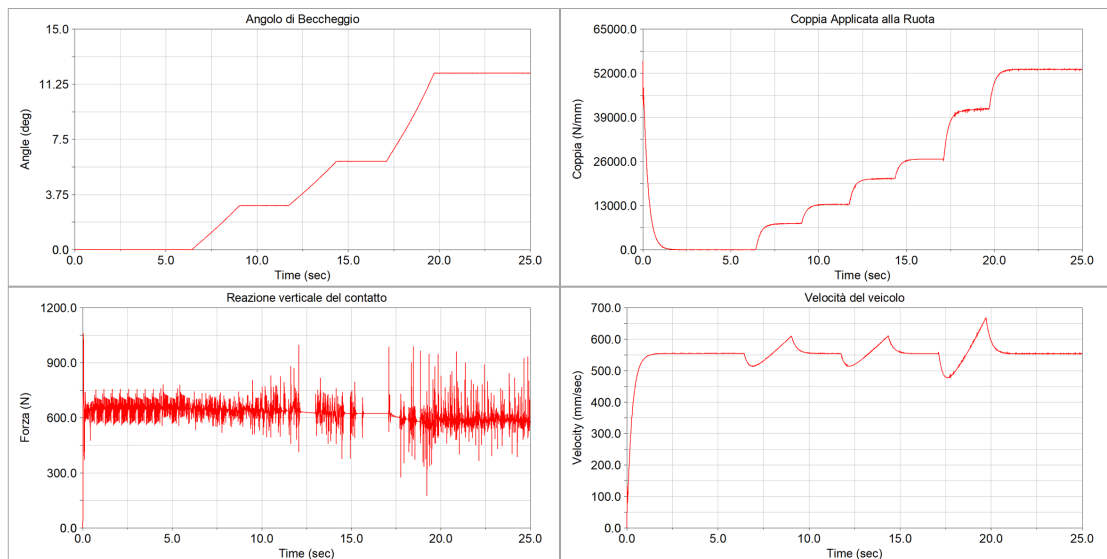


Figura 4.25: Test eseguito a 2 km/h , pendenza 22%

Come si può notare dai grafici riportati, il rover, dopo una fase di accelerazione iniziale, tende a muoversi a velocità circa costante nel primo tratto, che si deduce essere quella in piano dal grafico del beccheggio. Sempre da quest'ultimo si nota l'inizio della prima salita. A causa di questa prima variazione di pendenza, come per le successive, si ha un incremento della coppia richiesta al veicolo per procedere nella salita e una piccola

oscillazione di velocità. Si noti come nell'aumento della coppia non venga mai raggiunto e saturato il valore massimo di 60 N/m , pertanto il veicolo riesce a salire mantenendo la velocità desiderata.

Dal grafico della forza di contatto invece, sebbene sia molto disturbata a causa del movimento, si nota come ci sia un generale decremento dovuto all'aumento dell'angolo di beccheggio e quindi alla diminuzione della forza normale. Si riportano ora invece le prove eseguite a 5 km/h e 10 km/h :

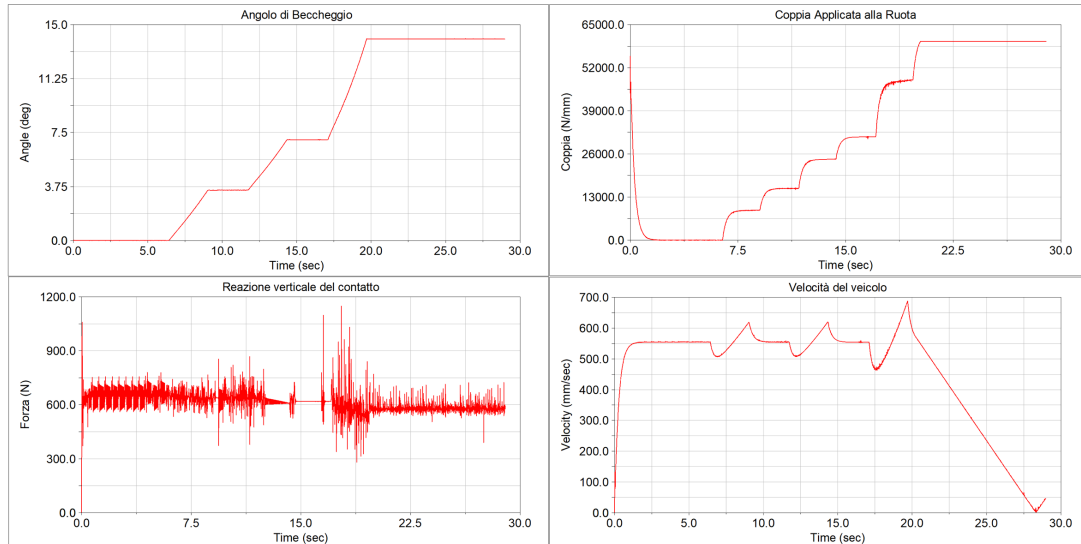


Figura 4.26: Test eseguito a 2 km/h , pendenza 25%

Nel grafico sopra invece si riporta la condizione in cui il veicolo non riesce a risalire la pendenza. Ciò si vede molto bene dal repentino decremento di velocità del veicolo fino al suo annullamento. Oltre a questo è interessante notare la saturazione della coppia al valore massimo ammissibile. In tale condizione infatti la necessità di coppia per eseguire tale risalita dovrebbe essere superiore, ma non disponendo di tale surplus il rover è costretto a rallentare sino a fermarsi, anche a causa di un possibile strisciamento delle ruote, che iniziano a ruotare alla loro velocità massima consentita, ma senza riuscire a far avanzare il mezzo.

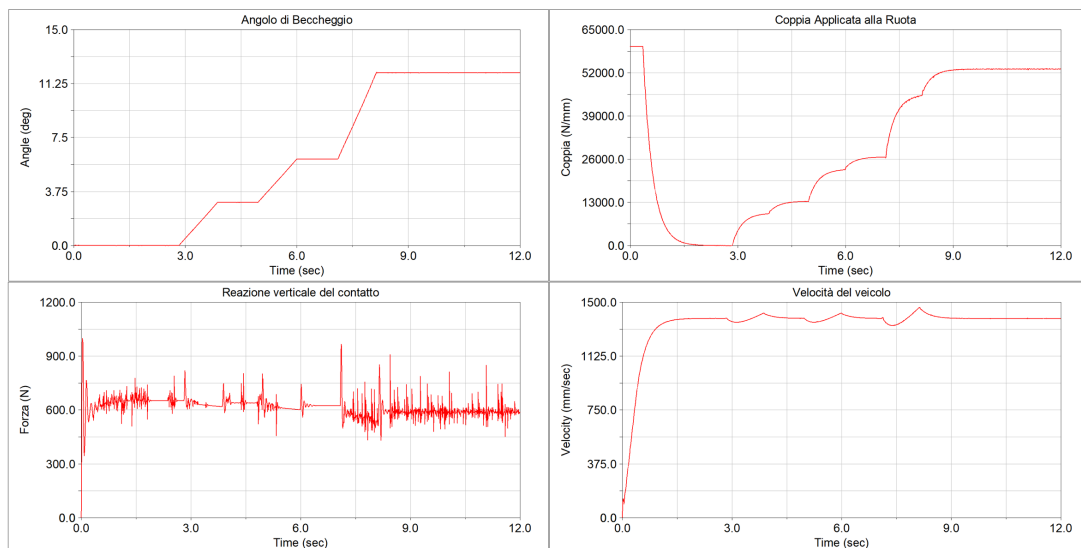


Figura 4.27: Test eseguito a 5 km/h , pendenza 22%

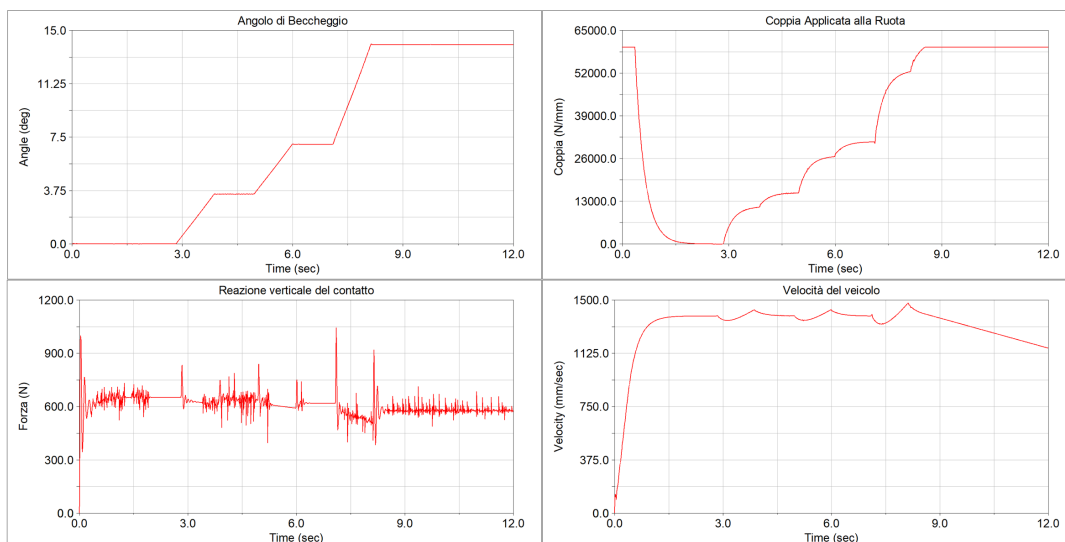


Figura 4.28: Test eseguito a 5 km/h , pendenza 25%

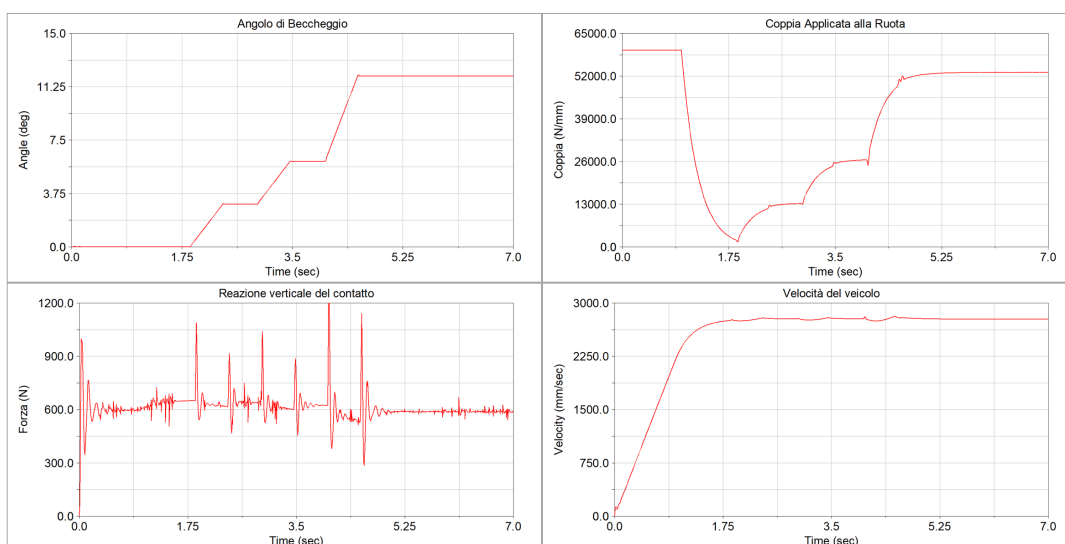


Figura 4.29: Test eseguito a 10 km/h , pendenza 22%

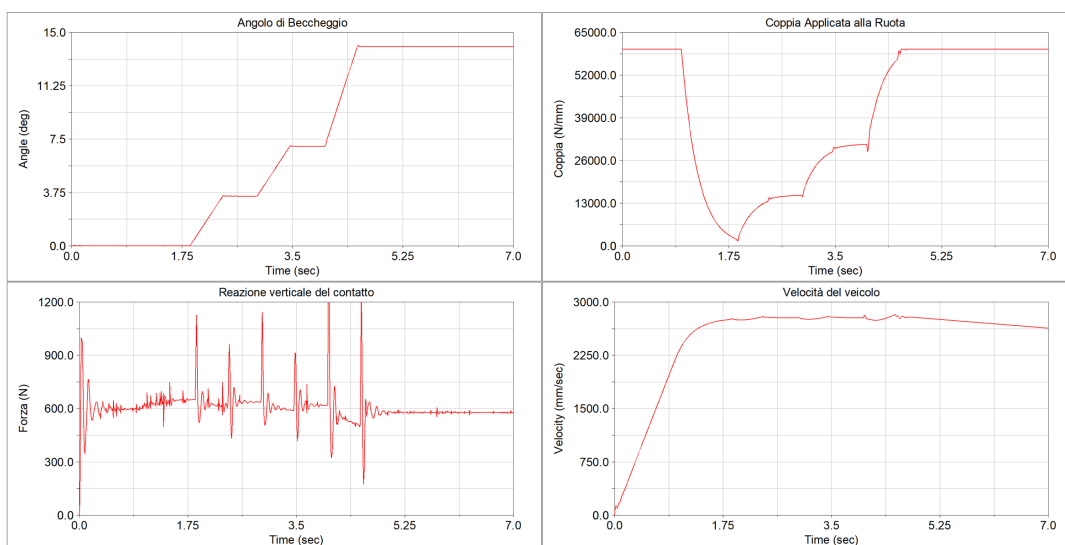


Figura 4.30: Test eseguito a 10 km/h , pendenza 25%

Dalle prove svolte si nota come la pendenza massima percorribile senza alcun tipo di difficoltà è pari a 12°, ovvero una salita di circa il 22%, già molto elevata e difficilmente raggiunta sulla maggior parte dei terreni.

Nel caso invece di una pendenza pari a 14, ovvero pari a circa il 25% il rover inizia ad avere difficoltà nell'avanzare. Nelle tre prove effettuate a questa pendenza si nota come per velocità maggiori il rover tende a comportarsi "meglio", poiché comunque riesce a proseguire. Ciò tuttavia è dovuto principalmente all'inerzia, che contribuisce a far procedere in avanti il mezzo. In tale condizione infatti si nota molto bene la saturazione della coppia con un rispettivo decremento di velocità, che non riesce tuttavia a fermare il mezzo nella seconda e terza prova, ma ciò è dovuta alla velocità iniziale maggiore che quindi funge da "slancio" per il mezzo.

Di seguito la tabella riassuntiva dei risultati ottenuti:

Risultati	
<i><u>Velocità</u></i>	<i><u>Pendenza massima</u></i>
2 km/h	22%
5 km/h	22%
10 km/h	22%

Figura 4.31: Tabella riassuntiva dei risultati del Ramp Test

4.6 Overturn Test

In tale simulazione si andrà a verificare l'attitudine del rover al ribaltamento durante una ipotetica fase di lavorazione. Come già anticipato nell'introduzione, per eseguire questo studio verrà utilizzato un modello in cui è stato predisposto un terreno solido sul quale il rover andrà ad eseguire un'operazione di inversione tra i filari.

In tale prova, come anticipato nella parte introduttiva, verrà utilizzato il controllo velocità, dal momento che questo risulta essere più rapido nelle simulazioni e comunque una buona approssimazione della realtà. Tale terreno è stato pensato in modo da poter essere inclinato a piacimento, al fine di eseguire delle prove in varie condizioni differenti. Volendo però creare una condizione pericolosa per il ribaltamento, sul tragitto da seguire è stato inserito un ostacolo, realizzato secondo quanto riportato nel paragrafo 4.3.5, in cui l'altezza di fuoriuscita dal terreno è un parametro che potrà essere modificato al fine di valutare diversi possibili impedimenti e soprattutto l'influenza di questo rispetto al ribaltamento.

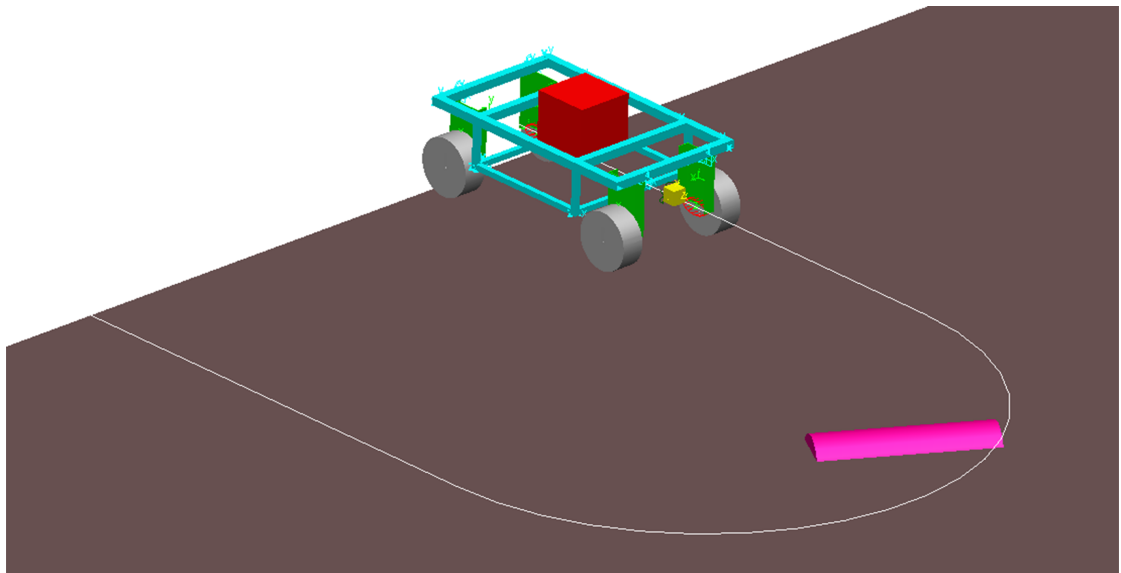


Figura 4.32: Modello utilizzato per l'overturn test

In particolare il suo posizionamento è stato scelto in modo che esso possa essere colpito solo dalle ruote interne. Questa scelta è stata fatta poiché la condizione più critica per il ribaltamento è il caso in cui il rover si trovi in discesa e, durante la fase di inversione per portarsi a risalire, incontri un ostacolo che ne causi un'improvvisa accelerazione sull'angolo di rollio. Tale accelerazione, combinata con la velocità di sterzata del veicolo, tenderà a porlo in condizioni critiche rispetto al ribaltamento. Per comprendere meglio quali grandezze influiscano sul ribaltamento e come la loro variazione causi l'instaurarsi di tale fenomeno, si è scelto di eseguire una serie di prove dove si è andati a valutare la velocità necessaria perché si abbia tale manovra, andando di volta in volta a variare i restanti parametri.

Volendo descrivere brevemente come le prove sono state svolte, si è scelto di operare su altezze di ostacoli definite e fissate in tre diverse casistiche, $h = 50mm, 100mm, 200mm$, per ognuna delle quali si è valutato il comportamento del mezzo per una serie di pendenze che variavano dallo 0% sino al 20%. Tale limite superiore è stato scelto poiché era l'obiettivo di salita, verificato anche nel "Ramp test" (4.5). Avendo quindi imposto nella simulazione il valore di inclinazione del terreno, si è andati a trovare la velocità minima

necessaria affinché si verificasse la condizione di ribaltamento.

Le curve realizzate e riportate di seguito riporteranno sulle ascisse la pendenza del terreno, mentre sulle ordinate la velocità. Al fine di ottenere i punti che realizzano la curva rappresentano la velocità che causa il ribaltamento del mezzo in quella condizione specifica di pendenza. Ogni grafico verrà realizzato con un'altezza dell'ostacolo fissata, in modo da poter valutare il comportamento del veicolo rispetto a differenti impedimenti.

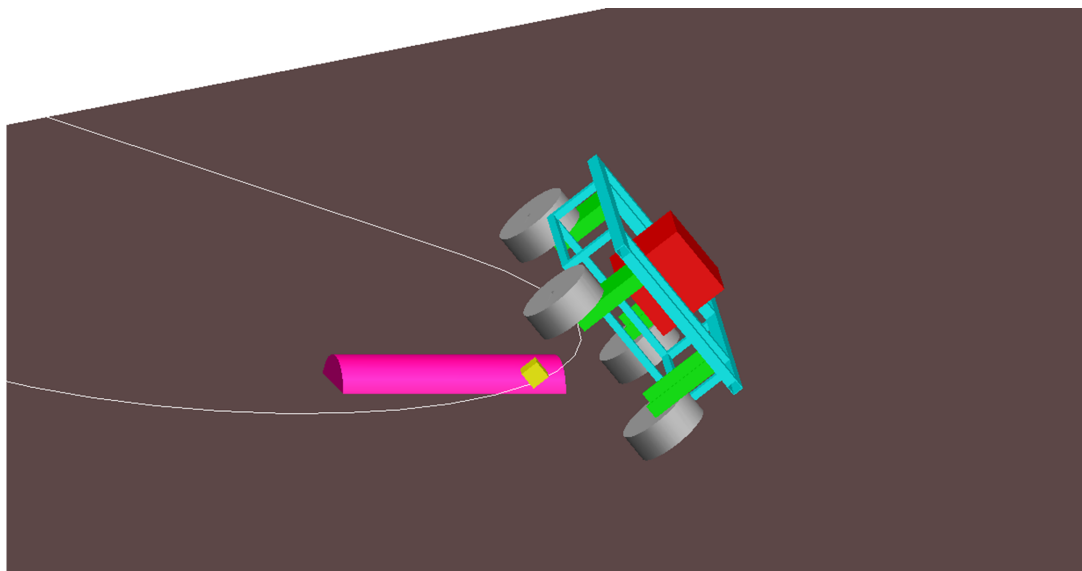


Figura 4.33: Esempio di una prova con veicolo in incipiente ribaltamento

Il raggio di curvatura è anch'esso fisso e posto pari a $4m$, tale valore è stato scelto poiché la larghezza media dei filari di una coltura tipo vigneto è di circa 2 metri [75], tuttavia una svolta di tale valore, ovvero necessaria per passare da un filare al successivo, viene eseguita solitamente andando a frenare in modo completo la macchina su uno dei due lati e mantenendo la trazione sul lato opposto.

Ovviamente in tale condizione il ribaltamento difficilmente può instaurarsi, pertanto si è scelto di eseguire una sterzata "continua" che può invece essere eseguita andando ad eseguire un compito ogni due filari. Con questo tipo di movimento inoltre si va a stressare meno il terreno che altrimenti, nel caso di una sterzata molto stretta, viene eroso in grande entità dalle ruote.

Durante le varie simulazioni, specie nel caso di velocità elevate, è accaduto che il veicolo perdesse aderenza lateralmente, causando quindi uno scivolamento. Tali episodi, in fase di realizzazione dei grafici, verranno conteggiati come ribaltamenti.

Questo potrebbe sembrare eccessivo dal punto di vista logico, ma tale scelta è stata effettuata poiché comunque una fase in cui il veicolo tende a scivolare, risulta essere un movimento nel quale il controllo effettivo viene a mancare e quindi potrebbero instaurarsi comunque condizioni pericolose di ribaltamento o altra natura in seguito all'interazione con un ambiente reale.

Si riporta ora il grafico relativo alla possibilità di ribaltamento del mezzo. La costruzione di questo è stata effettuata andando a valutare la velocità minima al fine di avere ribaltamento in funzione della pendenza del terreno e dell'altezza dell'ostacolo.

Per ogni quota di fuoriuscita dell'impedimento, infatti, sono state eseguite una serie di prove a differenti pendenze, in modo da valutare la velocità minima da assegnare al rover per instaurare il ribaltamento.

Questi grafici devono essere interpretati a zone, ovvero se i valori caratteristici ricadono al di sopra delle curve, allora molto probabilmente potrebbe instaurarsi il fenomeno del ribaltamento, viceversa se si rimane al di sotto questa probabilità risulta essere sensibilmente inferiore.

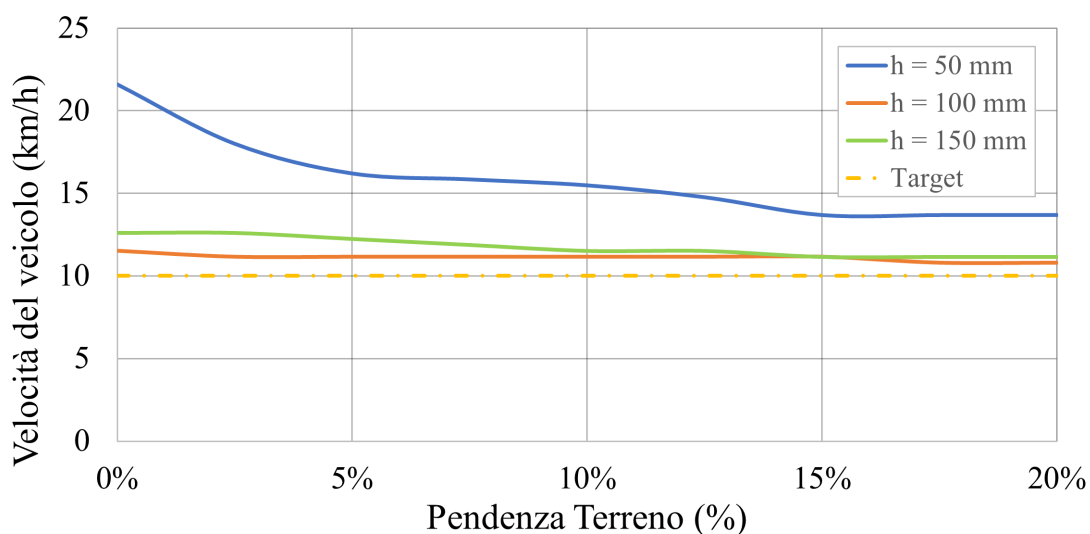


Figura 4.34: Curve relative alla prove di ribaltamento a differenti altezze di ostacolo

Dall'analisi dei risultati si può supporre come sia la pendenza del terreno che l'altezza dell'ostacolo influiscano sulla condizione di ribaltamento. Un aspetto interessante, tuttavia, è rappresentato dal confronto della curva realizzata ad $h = 100 \text{ mm}$ con quella $h = 150 \text{ mm}$. Si nota infatti come quella che vede l'ostacolo fuoriuscire maggiormente, richieda una velocità del rover tendenzialmente maggiore, rispetto a quella dove l'impedimento ha un'altezza inferiore. Ciò è spiegabile poiché nel caso $h = 100 \text{ mm}$, l'ostacolo viene impattato, senza però costituire un vero e proprio blocco, bensì funge da "rampa" che tende a far procedere in avanti e in alto il rover. Nella situazione invece in cui $h = 150 \text{ mm}$, l'altezza dell'impedimento è tale da non permettere un superamento agevole da parte del rover, il quale invece tende a ribaltarsi per una proiezione verso l'alto, con un'influenza inferiore della proiezione nella direzione del moto.

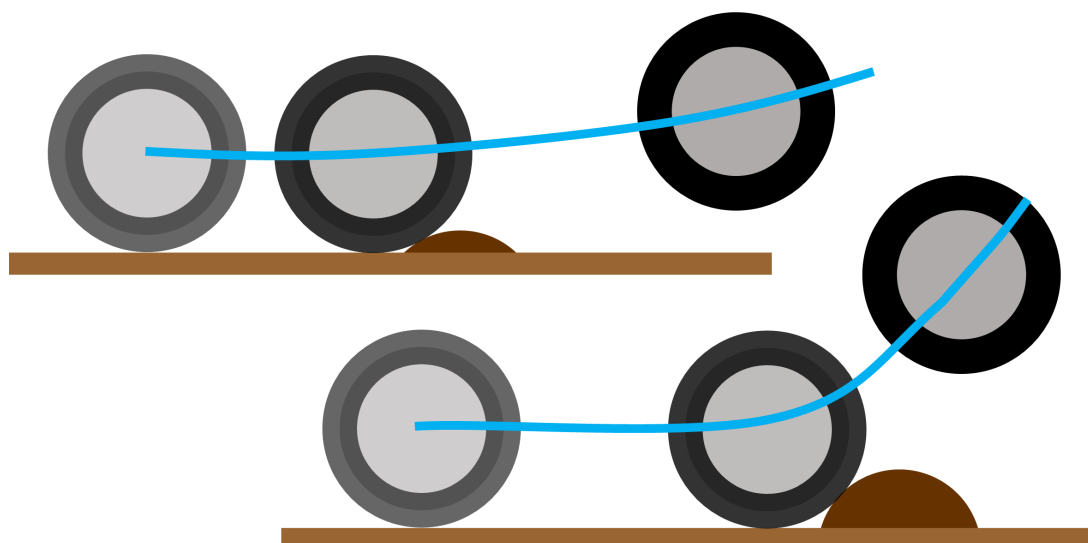


Figura 4.35: Schema dei due impatti

Dalle simulazioni infatti si sono potuti apprezzare due tipologie di ribaltamento, la prima nel quale il rover durante il suo avanzamento incontra l'ostacolo il quale, praticamente senza subire rallentamento, gli fornisce un'accelerazione sull'asse di rollio tale che, combinata con l'operazione di sterzata, lo porta al ribaltamento. Il secondo caso invece il rovesciamento è avvenuto sempre con le condizioni precedentemente esposte, ma in questa modalità, ha prevalso l'accelerazione sull'angolo di rollio rispetto a quella dovuta alla sterzata. Tale causa è anche da attribuire alla mancanza di un sistema di sospensioni del rover, che non essendo quindi in grado di assorbire eventuali urti, è soggetto a queste criticità.

L'analisi ultima dei risultati tuttavia, espone come ogni ribaltamento sia avvenuto a velocità superiori ai 10 km/h , ovvero la velocità target del veicolo che si voleva raggiungere durante gli spostamenti.

Inoltre, bisogna considerare il fatto che la valutazione del ribaltamento è stata eseguita nella parte iniziale della curva. Andando infatti a rimuovere l'ostacolo si apprezza come nella realtà una curva non potrà mai essere effettuata con quelle grandezze imposte, dal momento che interverrebbe il fenomeno dello scivolamento laterale.

Alla luce di ciò e delle evidenze fisiche che portano a dire che una curva di tale raggio non potrà mai essere affrontata nella sua interezza a velocità così sostenute, si può assumere che il veicolo sia soggetto a ribaltamento solo in rari ed eccezionali casi.

Capitolo 5

Conclusione e Sviluppi futuri

A fronte di un'analisi iniziale dello stato dell'arte dei veicoli agricoli autonomi attualmente sviluppati, si è cercato di definire una linea di sviluppo che l'azienda Ecothea potrà percorrere per realizzare il rover.

Secondo questo percorso, è stato poi realizzato il progetto di una possibile configurazione del rover, andando a definire nello specifico le varie componenti, sia che esse debbano essere realizzate, sia che debbano essere acquistate. Il veicolo infatti è stato pensato per essere prodotto, pertanto è stato necessario individuare i componenti "commerciali" destinati all'acquisto e realizzare le tavole esecutive per la realizzazione delle componenti strutturali.

Avendo suddiviso il rover nelle sua quattro sotto-parti, il telaio, il sistema di movimentazione, la sensoristica e gli altri sistemi di bordo, è stata portata avanti la progettazione di ognuna di queste, sino a raggiungere uno stadio in cui il passo successivo potesse essere la realizzazione fisica di un primo prototipo.



Figura 5.1: Esempio di struttura possibile del rover

Dopo aver quindi definito la struttura di massima, si è passati alla fase di simulazione, in cui si voleva andare a valutare il comportamento del veicolo in varie situazioni ritenute "critiche".

Si è quindi realizzato il modello del mezzo sul software multibody, andando successivamente ad eseguire tre prove distinte.

La prima è stata il *Tilt Test*, una prova statica dove, attraverso un piano con inclinazione variabile crescente, si è valutata la massima pendenza che il rover riesce a raggiungere attorno all'asse di rollio senza avere ribaltamento durante il suo stazionamento, ottenendo una pendenza massima di 45°, ovvero del 100%.

La seconda ha riguardato invece il *Ramp Test*, una prova dinamica in cui si è valutata la massima pendenza percorribile dal rover, ottenendo un valore massimo del 22%, molto elevata considerando che l'obiettivo di progetto era di circa il 20%.

Infine la terza prova ha riguardato il cosiddetto *Overturn Test*, sempre una prova dinamica nel quale si è andati a valutare l'attitudine del ribaltamento del rover durante le fasi di svolta. I risultati ottenuti evidenziano come, per il modello analizzato, il ribaltamento si verifica a velocità superiori a quelle raggiungibili dal rover, pertanto si potrebbe concludere che il rover progettato, a meno di particolari casi specifici, possiede un rischio di ribaltamento in tale condizione molto limitato.

Con la presente trattazione si è andati a definire la struttura principale del rover e le sue componenti fondamentali al fine di garantire un utilizzo base. Tale progetto risulta essere un importante punto di partenza per l'implementazione di future tecnologie, poiché durante le sue fasi di idealizzazione esso è stato concepito come "scheletro" sul quale andare ad eseguire test di vari sensori e componenti. Ciò rispecchia l'ideale iniziale di veicolo modulare, in quanto permette l'implementazione di più tecnologie a bordo della stessa macchina, al fine di comprendere quale sia più adatta allo scopo, permettendo quindi di realizzarle su altre strutture e macchinari.

In questa direzione quindi, in un possibile futuro, Ecothea si pone come obiettivo la realizzazione di una versione più avanzata del rover, andando ad inserire per esempio la possibilità di installare attrezzi agricoli a bordo. Tale possibilità ampliirebbe sicuramente il campo di utilizzo del mezzo, in quanto sarebbe possibile eseguire differenti lavorazioni tradizionali mediante un mezzo autonomo. Tale idea è stata più volte ritrovata nell'analisi iniziale dello stato dell'arte del rover, dove quindi si può ritrovare un importante interesse commerciale e di ricerca.



Figura 5.2: Esempio di rover autonomo prodotto dalla AgXeed [76]

Ovviamente ciò comporterebbe tutta una serie di migliorie, che vanno dalla necessità di un sistema di guida sicuramente più avanzato, in grado di gestire non solo la guida ma anche la lavorazione, ma soprattutto un incremento di potenza installata a bordo, con

opportuno accumulo. Le lavorazioni infatti sono operazioni che richiedono un grande utilizzo di energia, con la conseguente richiesta di motori più preformanti e batterie (nel caso di veicoli elettrici) di capacità superiore.

Non per ultimo, un passo molto importante nello sviluppo sarebbe l'implementazione a bordo di ruote sterzanti in modo autonomo. Nel rover pensato durante la presente trattazione infatti, sono state implementate quattro ruote fisse, sia per una semplicità realizzativa, che di gestione. Ovviamente, si è consci del fatto che tale soluzione è limitativa dal punto di vista delle manovre e delle possibilità di movimento. Pertanto in un possibile futuro si dovrebbe sicuramente installare a bordo un sistema di guida più avanzato, al fine di rendere più adatto a qualsiasi condizione di lavoro [77].



Figura 5.3: Esempio di rover con ruote indipendenti della Exxact Robotics [78]

Per quanto riguarda la parte di simulazione, è stato molto utile eseguire un modello virtuale, al fine di comprendere alcune dinamiche caratteristiche di un veicolo agricolo, potendo quindi capire eventuali comportamenti prima della realizzazione fisica.

Ogni test eseguito è stato interessante sia dal punto di vista realizzativo, poiché ha permesso la comprensione di un software multibody, sia di quello esecutivo, poiché il modello potrà essere riutilizzato per comprendere ulteriori fenomeni.

Oltre al veicolo in se, si potrà poi approfondire in maniera dettagliata la questione del ribaltamento, in quanto oltre ad essere un argomento molto rilevante nell'attualità, potrebbe essere studiato industrialmente al fine di realizzare sistemi che prevengano l'instaurarsi di condizioni critiche che portano ad un ribaltamento, come per esempio la riduzione forzata di velocità durante la fase di sterzata, oppure la gestione attiva della coppia in caso in cui il veicolo si trovi in un incipiente ribaltamento, al fine di cercare di riportarsi in una condizione di equilibrio.

Bibliografia

- [1] URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Tractor>.
- [2] URL: [https://www.treccani.it/enciclopedia/rivoluzioni-agricole_\(Enciclopedia-delle-scienze-sociali\)](https://www.treccani.it/enciclopedia/rivoluzioni-agricole_(Enciclopedia-delle-scienze-sociali)).
- [3] URL: <https://www.pinterest.it/pin/302937512429667459/>.
- [4] URL: https://www.richfieldhistoricalsociety.org/story_a_generation_of_oxen.html.
- [5] URL: <https://ecuflash.co/how-does-tractor-remapping-work/>.
- [6] URL: <https://www.agrifood.tech/digital-farming/agricoltura-4-0-cose-incentivi-e-tecnologie-abilitanti/>.
- [7] U. Nations. “World population projected to reach 9.8 billion in 2050”. In: <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/world-population-prospects-2017.html> (2020).
- [8] Manuel F. Silva Luiz F. P. Oliveira e Antonio P. Moreira. “Agricultural robotics: a state of art survey”. In: *23rd International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines* (2020).
- [9] Lorenzo Scalera et all Renato Vidoni. “An agricultural mobile robot prototype for proximal Sensing and precision farming”. In: *International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (2017).
- [10] URL: https://www.freepik.com/free-vector/modern-agricultural-machinery-isometric-composition-with-remote-controlled-automatic-powered-by-solar-panels-machines-working-field-vector-illustration_37420669.htm.
- [11] URL: <https://www.fao.org/3/i4691e/i4691e.pdf>.
- [12] E. Jay Williams Paul E. Sumner. “What size farm tractor do I need?” In: *University of Georgia* (2007).
- [13] URL: <https://www.kelvin.it/prodotti-kelvin/motoruote>.
- [14] URL: <https://www.fieldrobotics.it/division-agriculture-v2>.
- [15] URL: <https://robotnik.eu/>.
- [16] URL: <https://www.naio-technologies.com/en/home/>.
- [17] URL: https://www.aigro.nl/index_en.html.
- [18] URL: <https://e-terry.de/>.
- [19] URL: <https://www.swarmfarm.com/>.
- [20] URL: <https://www.monarchtractor.com/>.

- [21] URL: <https://www.roboticsplus.co.nz/>.
- [22] URL: <https://www.insighttrac.com/>.
- [23] URL: <https://autoagri.no/>.
- [24] URL: <https://vitibot.fr/?lang=it>.
- [25] URL: <http://atti.asita.it/Asita2007/Pdf/185.pdf>.
- [26] URL: <https://burro.ai/>.
- [27] URL: <https://milremrobotics.com/>.
- [28] Hermann Auernhammer. "Precision farming – the environmental challenge". In: *Elsevier Science* (2001).
- [29] URL: <https://it.freepik.com/autore/vectorpouch>.
- [30] URL: https://www.xa.com/en/xauv_r150.
- [31] URL: <https://www.landwirt.com/en/used-farm-machinery,3651803,Antonio-Carraro-TRX-7800-S-CabJoy.html>.
- [32] URL: <https://forniturenauticheitaliane.oltrevela.com/supporto-antivibrante-ancor-pcg-fn2727850>.
- [33] URL: <https://www.leroymerlin.it/prodotti/stufe-climatizzatori-e-idraulica/condizionatori-e-ventilatori/telecomandi-e-accessori-condizionatori/ormant-supporto-antivibrante-in-kit-antivibranti-cilindrici-per-staffe-climatizzatori-30-m8-in-cfz-da-4-pz-88662687.html>.
- [34] URL: <https://circuitcellar.com/resources/quickbits/induction-motors/>.
- [35] URL: <https://www.zpmotori.it/en/ipm-motors/>.
- [36] URL: <https://www.danatm4.com/products/systems/>.
- [37] URL: <https://laque.vn/san-pham/banh-dau-xanh-trai-cay/highly-integrated-electric-drive-system-for-power-transmission-system-ee-8jWWkha>.
- [38] Marta Debolini et al. "Changes in agricultural land use affecting future soil redistribution patterns: a case study in southern tuscany (italy)". In: *Wiley Online Library* (2013).
- [39] URL: <https://www.neugart.com/it-it/riduttori/riduttori-specifici-per-lapplicazione/ngv#NGV110>.
- [40] URL: <https://www.mbo-osswald.de/it/shop/spine-cilindriche-din-en-iso-8734>.
- [41] URL: <https://horecatiger.eu/it-it/shop/spina-elastica-3mm-1-16mm-692013>.
- [42] URL: <https://www.amazon.it/Bricoferr-pt40326p-agr%C3%ADcolasinistro-motozappa/dp/B01FXMFWXY>.
- [43] URL: <https://www.agrimeccaniche.it/prodotto/motocoltivatore-grillo-g110/>.
- [44] URL: <https://www.curtisinst.it/it/products/motor-controllers>.

- [45] URL: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/en/Industrial-Automation/Drives/Electric-Mobility/Light-Vehicles---Material-Handling-and-Golf-Cars/Inverters-CVW300-Series/Electric-Traction---CVW300-Frequency-Inverter/p/MKT.WDC.BRAZIL.ELECTRIC-TRACTION-FREQUENCY-INVERTER-CVW300>.
- [46] URL: <https://www.businesswire.com/news/home/20191022005209/en/Eaton%E2%80%99s-New-Flex-Power-Distribution-Unit-Delivers-Safer-Power-for-Commercial-Electric-Vehicles>.
- [47] URL: <https://it.rs-online.com/web/p/contattori/7827082>.
- [48] URL: <https://www.amazon.it/Auprotec%C2%AE-MIDI-fusibile-corrente-avvitarsi/dp/B017XDIREW>.
- [49] URL: <https://it.rs-online.com/web/p/fusibili-con-linguette/0418984>.
- [50] URL: <https://www.amazon.it/Bosch-S4E10-Batteria-Auto-h-730A/dp/B00WOLYFGI>.
- [51] URL: <https://www.amazon.it/AZDelivery-LM2596S-Converter-Display-voltmetro/dp/B08T158WPS?th=1>.
- [52] URL: <https://www.ovartech.com/product/1-5kw-dcdc-converter-ev-hev-dc-dc-converter/>.
- [53] URL: <https://gomechanic.in/blog/ecu-electronic-control-unit-explained/>.
- [54] URL: <https://7starlake.com/products/transportation/autonomous-driving/cpt330b-8c8p-g1660s>.
- [55] Francisco Valero Francisco Rubio e Carlos Llopis-Albert. "A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications". In: *International Journal of Advanced Robotic Systems* (2019).
- [56] URL: <https://www.autonomousvehicleinternational.com/features/avt-expo-interview-why-lidar-technology-is-the-way-forward.html>.
- [57] URL: <https://uniquesafetyproducts.com/products/safety-radar/>.
- [58] URL: <https://www.mouser.it/new/intel/intel-realsense-depth-camera-d455/>.
- [59] URL: <https://gamma-system.com/paraurti-sensibili-bumper/>.
- [60] Peide Wang. "Research on Comparison of LiDAR and Camera in Autonomous Driving". In: *Journal of Physics* (2021).
- [61] URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Real-time_kinematic.svg.
- [62] URL: <https://rtkgpssurveyequipment.com/rtk-gps-system/>.
- [63] URL: <https://www.dronezone.it/66157/maia-m2-la-camera-multispettrale-italiana-ottima-per-i-droni>.
- [64] URL: <https://eoptis.com/it/prodotti/standard/camera-multispettrale>.
- [65] URL: <https://diyguru.org/p/msc-adams-car/>.

- [66] URL: <https://www.inail.it/cs/internet/docs/all-informo-factsheet-12.pdf?section=attivit>.
- [67] URL: <https://daily.veronanetwork.it/news/news-verona/cellore-muore-per-il-ribaltamento-del-trattore/>.
- [68] URL: <https://www.lanazione.it/empoli/cronaca/ortimino-incidente-c2c6bb47>.
- [69] Mocera F. Sivo S. Stio A. e Somà A. “A study of a rover wheel for Martian explorations, based on a flexible multibody approach. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers”. In: *Journal of Multi-body Dynamics* (2020).
- [70] Costamagna Matteo. *Studio comparativo di un modello di contatto ruota-terreno per una trattore agricola in ambiente multibody*. 2021.
- [71] S. Martelli F. Mocera. e M. Costamagna. “Dynamic behaviour of a battery pack for agricultural applications”. In: *Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 1214 012032 (2022).
- [72] Roland Siegwart, Illah Reza Nourbakhsh e Davide Scaramuzza. *Introduction to autonomous mobile robots*. MIT press, 2011.
- [73] Marco Marchetti et al. “Rural areas and urbanization: analysis of a change”. In: *Scienze del Territorio* (2014).
- [74] Karl Theodor Renius. *Fundamentals of Tractor Design*. Springer, 2020.
- [75] URL: <https://www.mondomacchina.it/it/la-distanza-tra-filari-nel-vigneto-quando-la-qualit-questione-di-spazio-c988>.
- [76] URL: <https://www.agxeed.com/>.
- [77] Quanyu Wang Qimeng Xu Hongwen Li e Chunlei Wang. “Wheel Deflection Control of Agricultural Vehicles with Four-Wheel Independent Omnidirectional Steering”. In: *MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations* (2021).
- [78] URL: <https://fruitgrowersnews.com/news/french-company-testing-hydrogen-fueled-vineyard-tractor/>.

Ringrazio il Professore Aurelio Somà per questa opportunità che mi ha offerto, per avermi reso partecipe in questa collaborazione e per avermi seguito in questo percorso. Con lui, voglio ringraziare tutto il gruppo di ricerca, in particolare Salvatore, che con molta pazienza mi ha seguito in questi mesi, e Francesco.

Ringrazio poi Ecothea e i suoi dipendenti, in particolare Andrea, per il tempo che mi hanno dedicato e per tutto ciò che mi hanno insegnato in questi mesi.

Ringrazio la mia famiglia, Mamma, Papà, Nico e Aky, insieme alle nonne Carla e Angela. Grazie per avermi sostenuto in questi anni, per avermi dato forza nei momenti più difficili e per aver gioito con me dei traguardi.

Ringrazio anche tutti i miei amici che mi sono stati accanto in questo percorso, quelli del gruppo Rancido, quelli del ex-Vallauri, quelli del Poli e tutti quelli con cui ho condiviso un pezzetto della mia vita.

Ringrazio tutti i professori che ho incontrato sul mio percorso, in particolare ci tengo a ringraziare Antonio Briatore, se la mia passione è la meccanica, lo devo anche a lui.

Grazie a tutte quelle persone che in questi anni mi hanno insegnato qualcosa, che mi hanno aiutato a crescere, sia professionalmente che umanamente.

Grazie a tutti.