



**Politecnico  
di Torino**

**Politecnico di Torino**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

A.a. 2021/2022

Sessione di Laurea marzo/aprile 2022

# **Strategie di controllo della trazione per robot mobili articolati**

Uno studio su Agri.Q

Relatore:  
Giuseppe Quaglia

Co-relatore:  
Andrea Botta

Candidato:  
Elia Giuffrida

## Abstract

L'agricoltura di precisione è una strategia di gestione dell'attività agricola atta al miglioramento della produttività, della redditività e della sostenibilità.

In questo ambito di lavoro trova la sua applicazione un robot mobile articolato ad otto ruote, realizzato dal Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale del Politecnico di Torino, caratterizzato da un modulo anteriore attivo e uno posteriore che viene trainato passivamente o che può contribuire alla trazione del veicolo quando richiesto.

L'obiettivo principale di questa Tesi è lo studio dell'effetto del modulo posteriore attivo sulla manovrabilità del robot attraverso la co-simulazione dei software Adams-Simulink e di sperimentare alcune architetture di controllo atte a trovare un compromesso tra il miglioramento della manovrabilità del robot e il contenimento dei consumi.

# Indice

Introduzione.....	4
1. Descrizione Agri.Q.....	6
1.2. Sistema di attuazione .....	11
1.3. I filari dei vigneti .....	13
1.4. Modello Cinematico.....	15
1.5. Modello Dinamico.....	22
1.5.1. Forze di contatto .....	28
1.6. Modello Adams .....	33
1.5.1. Modello della Trasmissione Anteriore .....	35
1.6.2. Modello della trasmissione posteriore .....	37
1.6.3. Saturazione di corrente degli azionamenti .....	40
2. Strategia di attuazione .....	43
2.1 Effetto del modulo posteriore attivo.....	49
2.1.1 Forze di contatto al variare del parametro $k$ .....	58
3. Sistema di controllo.....	70
4. Strategie di controllo future .....	87
5. Conclusione .....	88
Indice delle figure.....	90
Indice delle tabelle.....	93
Bibliografia .....	94

# Introduzione

L'agricoltura è una delle attività più antiche alla base della civilizzazione umana. Oggi giorno uno dei problemi mondiali dell'agricoltura è dovuto all'aumento del fabbisogno di cibo a seguito dell'incremento della popolazione. Si stima che entro il 2050 la Terra sarà popolata da circa nove miliardi di persone ed entro quella data sarà necessario aumentare la produzione agricola preferibilmente in maniera sostenibile [1]. Una via per ottenere questi risultati è l'agricoltura di precisione.

L'agricoltura di precisione è una strategia di gestione dell'attività agricola con la quale i dati vengono raccolti, elaborati, analizzati e combinati con altre informazioni per orientare le decisioni in funzione della variabilità spaziale e temporale di un terreno al fine di migliorare l'efficienza nell'uso delle risorse, la produttività, la qualità, la redditività e la sostenibilità della produzione agricola. [2]

È possibile quindi riassumere la definizione di agricoltura di precisione in un'unica frase: "fare la cosa giusta, nel posto giusto e al momento giusto". [3]

Tutto ciò è possibile solo con la cooperazione di diversi strumenti e tecnologie, sicché, spesso si parla di Agricoltura 4.0.

Gli effettivi benefici ambientali ed economici derivanti dall'utilizzo di tali strumenti di precisione sono un dato di fatto, tanto che negli ultimi dieci anni l'interesse degli investimenti privati e governativi nel settore è notevolmente aumentato. [4] La robotica e l'automazione sono di fondamentale importanza per sopperire alle esigenze tecnologiche dell'agricoltura di precisione.

I ricercatori del Politecnico di Torino hanno sviluppato e progettato un UGV (Agri.Q) su ruote, adatto allo svolgimento di attività per l'agricoltura di precisione, quali il monitoraggio e il campionamento delle colture e del suolo. [5] In particolare, hanno privilegiato l'utilizzo di una struttura articolata rispetto ad un monotelaio per la peculiare modularità adatta a superare ostacoli e a muoversi su terreni sconnessi. Agri.Q è stato costruito con il modulo anteriore attivo e il modulo posteriore trainato passivamente, il quale, in alcune situazioni, può contribuire alla trazione del veicolo.

L'obiettivo principale di questa Tesi è lo studio dell'effetto del modulo posteriore attivo sulla manovrabilità del robot attraverso la co-simulazione dei software Adams-Simulink e di sperimentare alcune architetture di controllo atte a trovare un compromesso tra il miglioramento della manovrabilità del robot e il contenimento dei consumi.

In Adams verrà implementato il modello del robot sviluppato dai ricercatori del Politecnico di Torino e con la co-simulazione con Simulink verrà sviluppato il controllo atto a trovare un compromesso tra il miglioramento della manovrabilità del robot e la riduzione dei consumi.

## 1. Descrizione Agri.Q

Il rover Agri.Q è un veicolo elettrico, progettato per operare in terreni agricoli, muoversi tra i filari di viti e cooperare con droni aerei per la mappatura del terreno.

Esso è dotato di strumenti e sensori specifici per monitorare le colture e di un braccio robotico per lo svolgimento di attività di campionamento. Inoltre, è dotato di pannelli solari che contribuiscono ad aumentare la sua autonomia in campo e permettono l'atterraggio degli UAV (**Figura.1**).



*Figura 1: Agri.Q*

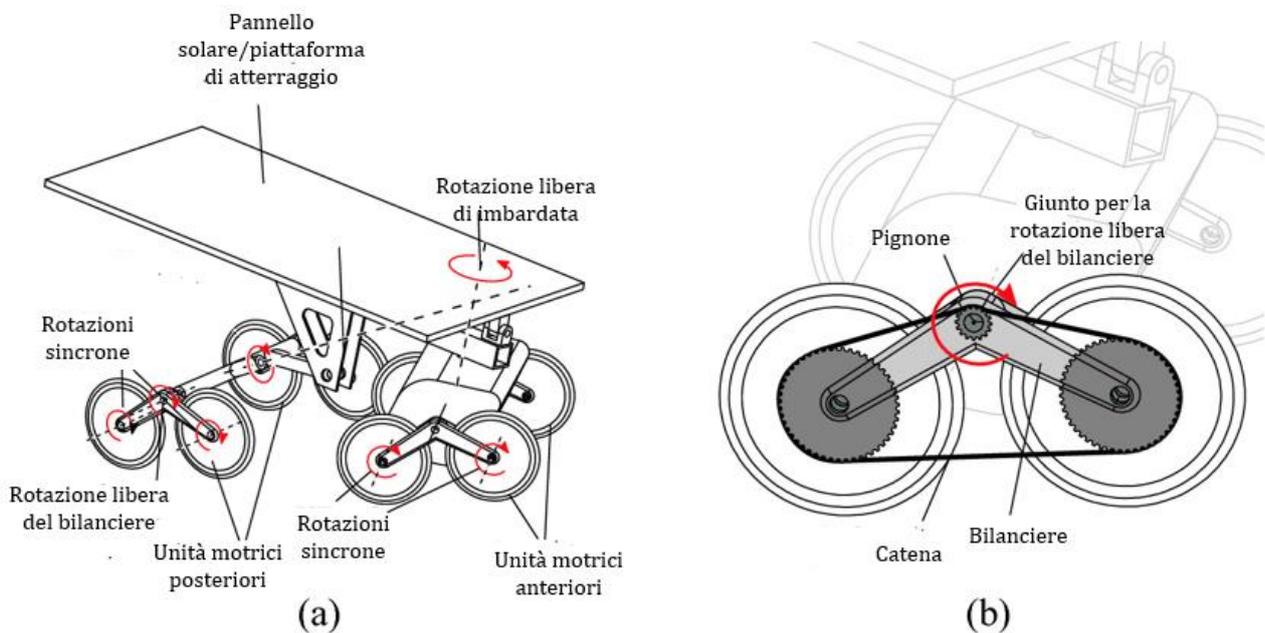
Poiché Agri.Q deve essere in grado di muoversi su terreni irregolari, uno degli approcci più efficaci sarebbe l'adozione di cingoli, i quali possiedono il vantaggio di distribuire il peso del veicolo su un'ampia superficie, in modo da affrontare le asperità del suolo anche in condizioni sfavorevoli quali: terreni bagnati e/o scivolosi. Tutto ciò però comporta uno svantaggio, infatti l'efficienza dei cingoli è estremamente ridotta rispetto a quella delle ruote.

Per ovviare al problema, Agri.Q è stato concepito al fine di trovare un punto di incontro tra l'efficienza delle ruote e l'efficacia dei cingoli su superfici irregolari, sia dal punto di vista energetico che di mobilità, optando per una soluzione ad otto ruote. [5]

Uno schema del robot è mostrato in **Figura 2** (a). Esso è dotato di quattro unità motrici, ciascuna composta da due ruote alloggiata su un bilanciante, per un totale di otto ruote.

Questa soluzione permette di distribuire le forze statiche e dinamiche agenti al suolo su un'ampia superficie di contatto, come avviene utilizzando un sistema cingolato (**Figura.2 (a)**). Di conseguenza, si evita che il veicolo stesso sprofondi, o rimanga bloccato, in un terreno cedevole e, allo stesso tempo, si evita la compattazione del terreno. L'elevato numero di punti di contatto con il suolo garantisce una distribuzione del peso simile a quella di un robot cingolato, pur mantenendo un'efficienza più vicina a quella di una macchina gommata. [5]

Il collegamento di ciascun bilanciere con il corpo principale del robot avviene tramite un giunto rotoidale passivo (**Figura.2 (b)**), la cui libera rotazione consente alle ruote di seguire le pendenze del terreno indipendentemente dalla posizione assunta dagli altri bilancieri.



**Figura 2:** Schema funzionale del rover Agri.q (a); collegamento bilancieri con il corpo principale del robot(b)

Un ulteriore vantaggio deriva dalla capacità del bilanciante di agire da filtro rispetto alle oscillazioni imposte dal suolo. La **figura 3 (b)** mostra che lo spostamento verticale imposto alla ruota da una notevole irregolarità del terreno si converte in uno spostamento minore del bilanciante e quindi dell'intero veicolo. La trasmissibilità delle oscillazioni risulta di conseguenza ridotta [6].

Un ulteriore miglioramento dell'efficienza è stato ottenuto dotando il robot di una rotazione libera di imbardata tra il modulo anteriore e posteriore, che garantisce una significativa riduzione delle

velocità laterali (ovvero dello slittamento laterale) delle ruote rispetto al suolo quando il robot segue una traiettoria curva e di un grado di libertà di rollio che consente la reciproca rotazione dei moduli, garantendo il contatto costante delle ruote con il suolo in un'ampia gamma di condizioni del terreno. [5]



*Figura 3: Dettaglio sulla distribuzione di forze su un'ampia superficie (a); Dettaglio sul funzionamento da filtro delle oscillazioni (b)*

I pannelli solari hanno un doppio scopo: fornire una fonte di energia e permettere l'atterraggio di droni. Per poter soddisfare entrambe le funzioni, il piano superiore del robot è in grado di auto-orientarsi in base alle necessità, in modo da massimizzare l'incidenza dei raggi solari (Fig.4 (a)) e fornire una base sempre orizzontale per permettere l'atterraggio agli UAV, anche quando il veicolo si muove su pendii ripidi, infatti, controllando l'angolo di beccheggio e l'angolo di rollio possono essere compensate sia le pendenze longitudinali che trasversali del terreno (Fig.4 (b)).



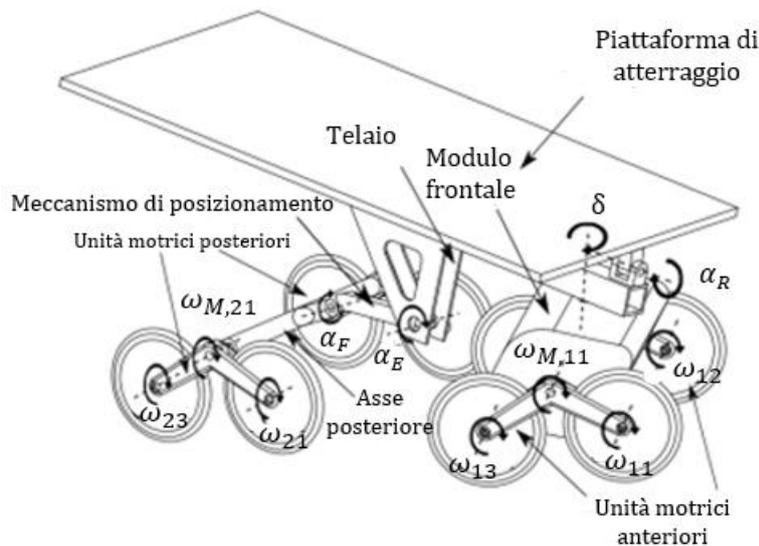
(a)



(b)

**Figura 4:** Pannelli solari (a); Piattaforma d'atterraggio (b)

Una descrizione più dettagliata sui giunti di collegamento del rover può essere osservata nella figura sottostante (**Fig.5**), in cui la rotazione del giunto rotoidale passivo di collegamento dei bilancieri con il corpo viene indicato con  $\Omega$ . La rotazione del giunto che collega il modulo anteriore al telaio è indicata con il simbolo  $\delta$  e consente al modulo anteriore e posteriore di poter effettuare un angolo di imbardata reciproco, necessario durante lo svolgimento di una traiettoria curva. Le due unità motrici posteriori vengono collegate all'asse posteriore con il giunto che compie una rotazione indicata con  $\alpha_F$ , anch'esso risulta passivo e assicura la compensazione dell'inclinazione trasversale tra le unità motrici anteriori e posteriori. I giunti attivi risultano essere quelli che compiono le rotazioni indicate in figura  $\alpha_E$ ,  $\alpha_R$  e consentono di orientare la piattaforma di atterraggio/pannelli solari.



**Figura 5:** Descrizioni giunti

Poiché il Rover è stato progettato secondo i principi dell'agricoltura di precisione, esso deve essere in grado di raccogliere campioni di terreno per analisi di laboratorio e di applicare trattamenti chimici e fertilizzanti dove e quando è necessario, pertanto, in esso è presente un braccio robotico collaborativo, a sette gradi di libertà. La base del braccio è stata montata sul telaio posteriore, in modo da aumentare lo spazio di lavoro, infatti da questa posizione, il braccio robotico può raggiungere, il suolo per raccogliere campioni di terreno (**Fig.6 (a)**) o, soprattutto, sfruttare la mobilità della piattaforma di atterraggio (rotazione giunto  $\alpha_E$ ), raggiungendo un'altezza di 2,5 m dal suolo, per prelevare possibili campioni direttamente dai filari (**Fig.6 (b)**).



(a)



(b)

**Figura 6:** Posizione del braccio robotico durante il prelievo di un campione dal suolo (a); Altezza massima raggiungibile dal braccio robotico con l'ausilio dello spostamento della piattaforma di atterraggio (b)

## 1.2. Sistema di attuazione

Agri.Q, come anticipato precedentemente, è stato progettato prevalentemente per lavorare nei vigneti; infatti, le peculiarità di questo ambiente di lavoro hanno guidato le esigenze progettuali del sistema di attuazione. Il sistema di attuazione del rover è costituito da quattro unità motrici, ciascuna della quale è composta da un motore elettrico in corrente continua, un riduttore epicicloidale e una catena di trasmissione. Poiché ad ogni motore vengono accoppiate due ruote (sistema ad otto ruote), che ruotano alla stessa velocità, è stato scelto un sistema di trasmissione a catena, per la sua robustezza e capacità di trasmissione. Esso può funzionare nelle condizioni più sporche e necessita di una manutenzione minima. La velocità massima del veicolo è stata fissata a  $5 \text{ km/h}$ .

Il rover deve superare terreni accidentati, sia in termini di pendenza che di dislivelli, il sistema di attuazione, infatti, è stato progettato per superare pendenze con un'inclinazione di  $\alpha_{\text{Terreno}} = 15^\circ$ , utilizzando solo le unità motrici anteriori [6].

Da queste considerazioni sono stati adottati i seguenti componenti meccanici i cui dettagli sono forniti nella Tabella 1 sotto riportata. Ciascun gruppo motoriduttore è inoltre provvisto di freno di stazionamento elettrico.

**Tabella 1:** *Dettagli dei componenti meccanici adottati*

Descrizione	Simbolo	Modulo Frontale	Modulo Posteriore
<b>Potenza nominale Motore elettrico</b>	$P_{M,Nom}$	160 W	120 W
<b>Coppia nominale Motore elettrico</b>	$T_N$	0,55 Nm	0,55 Nm
<b>Velocità nominale Motore elettrico</b>	$\omega_N$	3000 rpm	3000 rpm
<b>Corrente nominale Motore</b>	$I_N$	10 A	10 A
<b>Corrente massima Motore</b>	$I_P$	20 A	20 A
<b>Costante di coppia</b>	$K_I$	0,055 Nm/A	0,055 Nm/A
<b>Riduttore epicicloidale</b>	$\tau_1$	1:15,88	1:28,93
<b>Catena di trasmissione</b>	$\tau_2$	1:3	1:1
<b>Rapporto di trasmissione totale</b>	$\tau$	1:47,64	1:28,93
<b>Raggio ruote</b>	$r_w$	0,200 m	0,200 m

Il layout del gruppo propulsore, come detto anticipatamente, è composto anche da una batteria in grado di alimentare i sistemi di locomozione adottati e da un pannello solare la cui dimensione è stata ragionevolmente scelta dai ricercatori del Politecnico di Torino per garantire la ricarica della batteria durante il tempo di inattività tra le missioni.

I dettagli di tali aspetti sono riportati nella **Tabella 2**.

**Tabella 2:** *Scheda tecnica batteria*

Tensione	29,7 V	<b>Corrente massima</b>	128 A
<b>Capacità</b>	56 Ah	<b>Energia di accumulo</b>	4,84 MJ

### 1.3. I filari dei vigneti

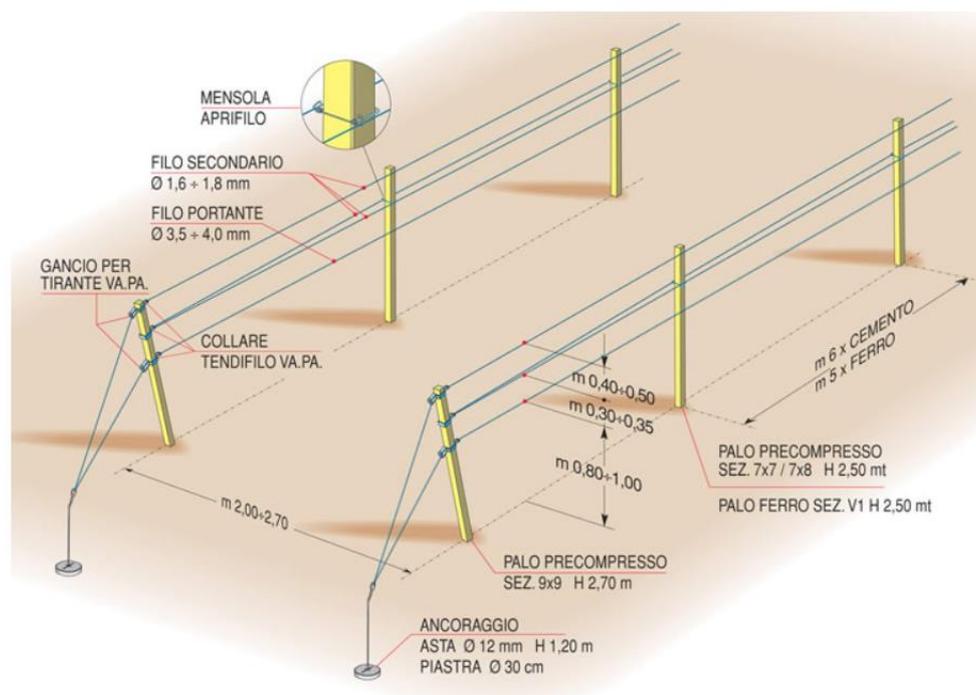
Agri.Q è un robot realizzato e progettato per svolgere attività nell'ambito dell'agricoltura di precisione. Precisamente esso è stato progettato per operare tra i filari dei vigneti.

In questo capitolo vengono descritte due tipologie di vigneti che possono essere meccanizzati.

- Vigneto a Spalliera:

Vengono utilizzati **pali in cemento precompresso**, posti a distanze che non superano i 6 metri o **pali in ferro** che non devono superare intervalli tra loro di 5 metri, infissi nel terreno per almeno 70-80 cm, e una parte fuori terra di almeno 170-180 cm. Il capo a frutto viene appoggiato ad un filo "portante", con dimensioni che vanno da 2.00 mm fino a 3.15 mm, a seconda del materiale utilizzato. Sopra il filo "portante" vengono posizionate una o due coppie di fili, poste a distanza di circa 30-40 cm: serviranno a raccogliere la vegetazione facendola sviluppare sempre verso l'alto. In alcuni casi si può posizionare, alla fine del palo, un filo per offrire ai tralci un ulteriore appoggio [7].

Lo schema del vigneto viene riportato nell'immagine sotto stante (**Figura 7**).

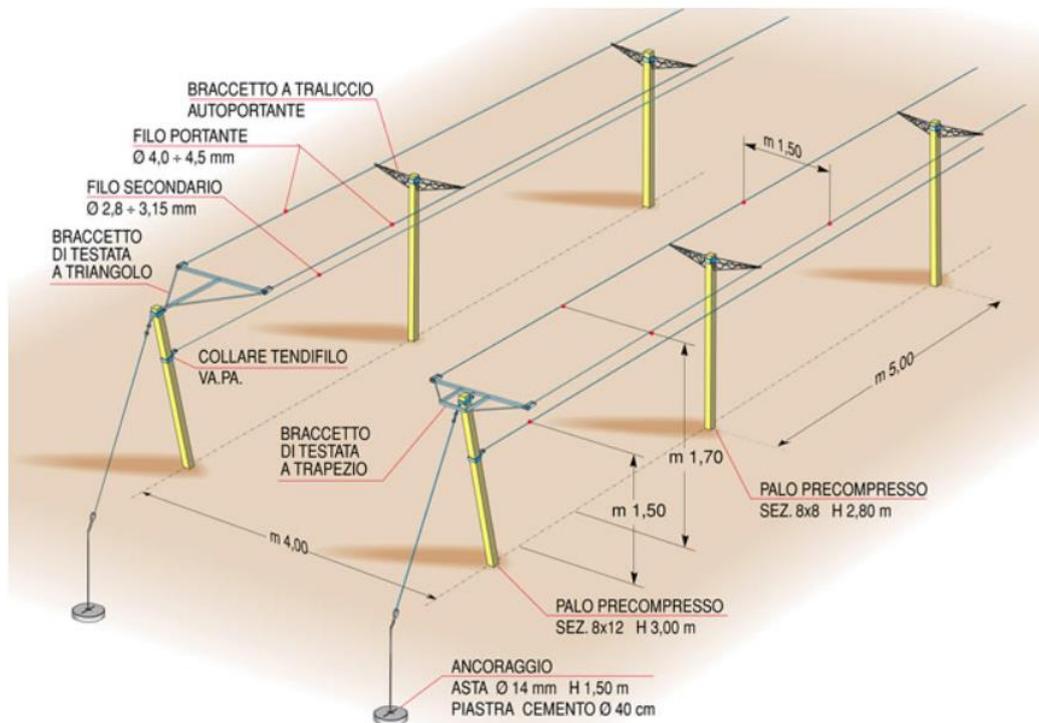


**Figura 7:** Vigneto a spalliera [7]

È importante osservare, per la manovrabilità di Agri.Q che la distanza tra i filari in questo tipo di vigneto, è tra i 2 e i 2.70 m.

- Vigneto a pergola:

I pali utilizzati devono essere necessariamente in cemento precompresso, delle sezioni di 8x8 cm per i pali intermedi ed infissi ad una profondità minima di 80 cm, e di sezione 8x10x12 cm per i pali di testata, infissi ad una profondità minima di 90-100 cm. I due cordoni permanenti corrono su due fili, che misurano almeno 4.00 mm di diametro, tenuti equidistanti da braccetti autoportanti di 70 cm di larghezza ciascuno [7]. La distanza tra i filari è di 4 m (**Figura 8**).



**Figura 8:** *Vigneto a pergola* [7]

## 1.4. Modello Cinematico

Il modello cinematico del robot Agri.Q viene mostrato nella figura sotto riportata (**Figura 7**) in una rappresentazione planare semplificata.

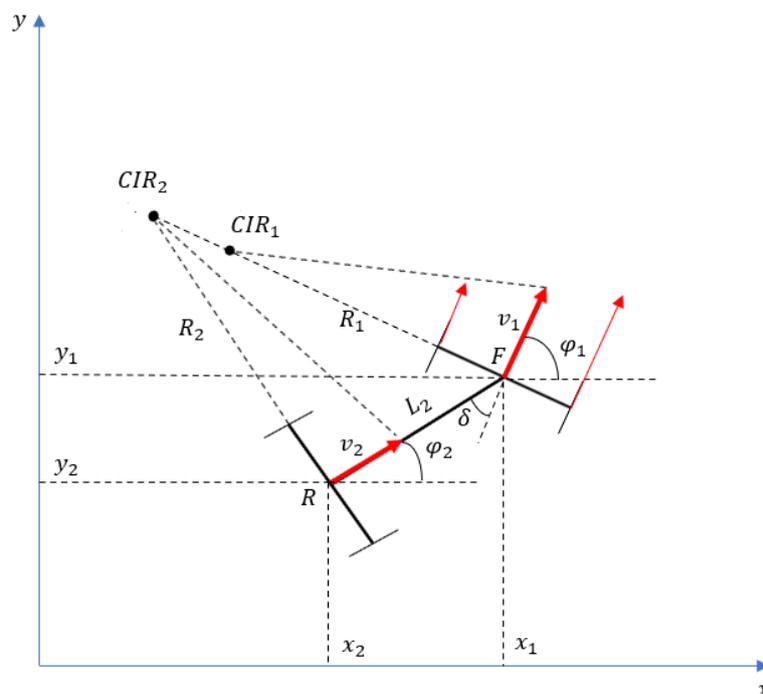
Questo modello cinematico consiste nell'esprimere lo spazio delle configurazioni del robot mobile, vale a dire l'insieme degli stati necessari per esprimere la configurazione del robot sul piano euclideo  $(x_0, y_0)$ .

Il modello cinematico si basa sulle seguenti ipotesi:

- Il modello considera solo i movimenti piani su una superficie piana.
- Le unità di locomozione sono semplificate, considerando una singola ruota equivalente per lato con l'asse passante per il baricentro del modulo (**Figura 9**), in questo modo non si considera l'effetto della velocità laterale dei moduli che si avrebbe se si considerasse il sistema con otto ruote (**Figura 10**).
- Ogni ruota rotola senza strisciare, cioè senza slittare né longitudinalmente né trasversalmente.

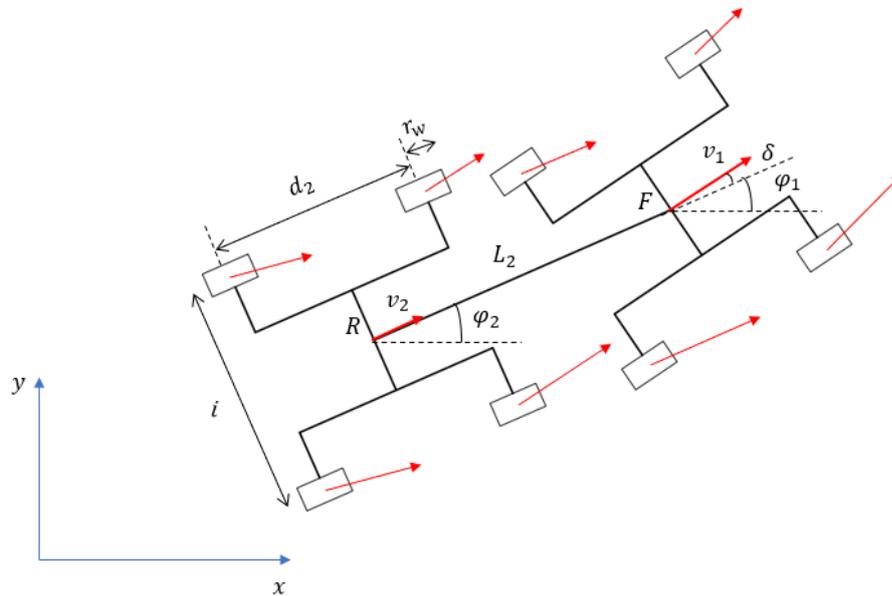
La posizione di un modulo è definita da  $(x_j, y_j, \varphi_j)$ , dove  $j$  indica il modulo a cui si sta facendo riferimento: 1 per il modulo frontale, 2 per il modulo posteriore.

$\delta$  è l'angolo di imbardata relativo tra i moduli,  $i = 0,44 \text{ m}$  (**Figura 10**) è la carreggiata del modulo,  $d_j = 0.44 \text{ m}$ ,  $r_w = 0.2 \text{ m}$  è il raggio della ruota mentre  $L_2$  è la distanza tra i moduli ( $L_2 = 1,3 \text{ m}$ ) [8].



**Figura 9:** modello cinematico semplificato con quattro ruote virtuali senza velocità laterale

La **figura 9** rappresenta un caso generico, infatti nella condizione di curva in stazionario i due centri di istantanea rotazione coincidono.



**Figura 10:** Modello cinematico con velocità laterale

Data l'architettura del robot, si possono definire i seguenti vincoli:

$$x_2 = x_1 - L_2 \cos \varphi_2 \tag{1.4. 1}$$

$$y_2 = y_1 - L_2 \sin \varphi_2 \tag{1.4. 2}$$

$$\delta = \varphi_1 - \varphi_2 \tag{1.4. 3}$$

Ogni ruota non consente una traslazione normale alla direzione di rotolamento (non scorrere lateralmente), per questo motivo la velocità normale al verso di rotolamento è nulla ed è possibile aggiungere due ulteriori vincoli olonimi:

$$\dot{x}_1 \sin \varphi_1 - \dot{y}_1 \cos \varphi_1 = 0 \quad (1.4.4)$$

$$\dot{x}_2 \sin \varphi_2 - \dot{y}_2 \cos \varphi_2 = 0 \quad (1.4.5)$$

Dove  $\dot{x}$  e  $\dot{y}$  sono le derivate temporali di  $x$  e  $y$ , ossia la velocità di ogni modulo nel sistema di riferimento globale. Tali velocità possono essere definite anche in funzione della velocità longitudinale del modulo generico  $v_j$ :

$$\dot{x}_j = v_j \cos \varphi_j \quad (1.4.6)$$

$$\dot{y}_j = v_j \sin \varphi_j \quad (1.4.7)$$

Quindi, il modello cinematico del sistema può essere definito come:

$$\dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \\ \dot{\varphi}_1 \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{kin} \begin{bmatrix} v_1 \\ \dot{\varphi}_1 \end{bmatrix} \quad (1.4.8)$$

La funzione che mette in relazione  $\dot{\delta}$  con  $v_1$  e  $\dot{\varphi}_1$  può essere facilmente derivata differenziando le equazioni (1.4.1), (1.4.2), (1.4.3) e sostituendo i risultati in (1.4.5).

$$\dot{\delta} = \dot{\varphi}_1 - \frac{v_1}{L_2} \sin(\delta) \quad (1.4.9)$$

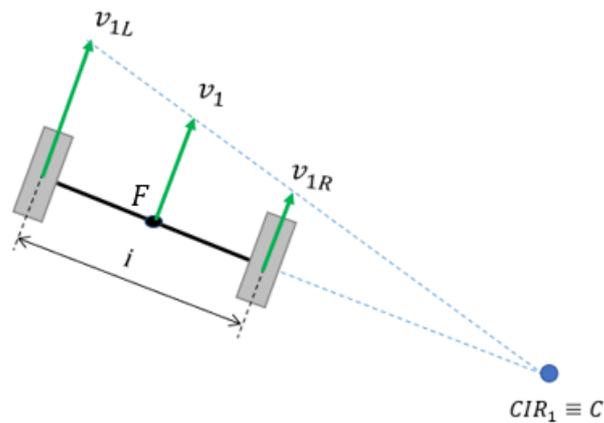
Di conseguenza, il modello cinematico indicato da (1.4.8) può essere scritto come:

$$\dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \\ \dot{\phi}_1 \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi_1 & 0 \\ \sin\varphi_1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -\frac{1}{L_2}\sin\delta & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ \dot{\phi}_1 \end{bmatrix}$$

(1.4.10)

Dato che il modulo anteriore è sostanzialmente un robot a sterzata differenziale con due sole ruote, è possibile ricavare le seguenti relazioni che legano  $v_1$  e  $\varphi_1$  alla velocità angolare delle ruote anteriori  $\omega_{11}$  e  $\omega_{12}$ , in cui il pedice 1 indica la ruota destra ed il pedice 2 la ruota sinistra [8].

Si procede col determinare la relazione che lega le velocità  $v_{1L}$  e  $v_{1R}$ , rispettivamente della ruota sinistra e destra del modulo frontale, alla velocità longitudinale  $v_1$  (**Figura 11**).



**Figura 11:** Schematizzazione del modulo frontale e delle corrispondenti velocità

$$v_1 = \frac{1}{2}(v_{1L} + v_{1R})$$

(1.4.11)

Conoscendo la distanza  $i$  e ricordando che le velocità delle ruote sono assunte positive se in avanti e che il verso positivo dell'angolo  $\varphi_1$  è antiorario, si ricava la velocità angolare  $\dot{\phi}_1$ :

$$v_{1L} = -\left(\overline{CO_1} + \frac{i}{2}\right)\dot{\phi}_1$$

(1.4.12)

$$v_{1L} = -\left(\overline{CO_1} - \frac{i}{2}\right) \dot{\phi}_1 \quad (1.4.13)$$

$$v_{1L} = v_{1R} - i\dot{\phi}_1 \quad (1.4.14)$$

Ottenendo:

$$\dot{\phi}_1 = \frac{1}{i}(v_{1R} - v_{1L}) \quad (1.4.15)$$

L'ipotesi di ridurre le ruote ad una per ogni lato è di fondamentale importanza in quanto, se non venisse introdotta, bisognerebbe considerare anche la componente laterale di velocità delle ruote. Conoscendo il raggio delle ruote  $r_w = 0.2 \text{ m}$  è possibile legare le velocità longitudinali delle ruote alle velocità angolari delle ruote, ottenendo le relazioni sotto riportate:

$$v_1 = \frac{r_w}{2}(\omega_{11} + \omega_{12}) \quad (1.4.16)$$

$$\dot{\phi}_1 = \frac{r_w}{i}(\omega_{11} - \omega_{12}) \quad (1.4.17)$$

Con le due relazioni (1.3.16) e (1.3.17) è possibile ricavare il raggio di curvatura del modulo frontale:

$$R_1 = \frac{v_1}{\dot{\phi}_1} \quad (1.4.18)$$

Questa relazione è estremamente importante in quanto permette di legare la velocità longitudinale alla velocità angolare del modulo anteriore mediante il raggio di curvatura di quest'ultimo. Noto il raggio di curvatura, la curvatura riferita al modulo anteriore è esprimibile come:

$$\rho_1 = \frac{1}{R_1} \quad (1.4.19)$$

Osservando la (1.3.19) è possibile fare una considerazione sul segno della curvatura  $\rho_1$ , infatti, la convezione adottata per ricavare questa formula prevede: una curvatura positiva se  $|\omega_{11}| > |\omega_{12}|$ , ossia se il robot ruota in senso antiorario in marcia avanti, una curvatura negativa se  $|\omega_{11}| < |\omega_{12}|$ , ossia se il robot ruota in senso orario in marcia avanti e una curvatura nulla se il robot percorre una traiettoria rettilinea, quindi se le due velocità angolari delle ruote risultano uguali ( $|\omega_{11}| = |\omega_{12}|$ ). Poiché il robot può essere studiato pensando ad esso come un sistema formato da due corpi rigidi tra loro articolati, bisogna considerare che nel caso più generale, durante il moto essi percorreranno due traiettorie distinte. Ciò significa che ogni modulo è caratterizzato da un suo raggio di curvatura, rispettivamente  $R_1$  e  $R_2$  e da un determinato centro di istantanea rotazione  $CIR_1, CIR_2$  (**Figura 9**). Per ricavare un'espressione che leghi i raggi di curvatura dei due moduli del robot Agri.Q bisogna partire da una considerazione geometrica di (**Figura 9**), infatti:

$$v_2 = R_2 \dot{\phi}_2 = v_1 \cos(\delta) \quad (1.4.20)$$

Sostituendo la (1.4.18) nella (1.4.20) si ottiene che:

$$R_2 = \left( \frac{\dot{\phi}_1}{\dot{\phi}_2} \right) R_1 \cos(\delta) \quad (1.4.21)$$

ma, poiché:

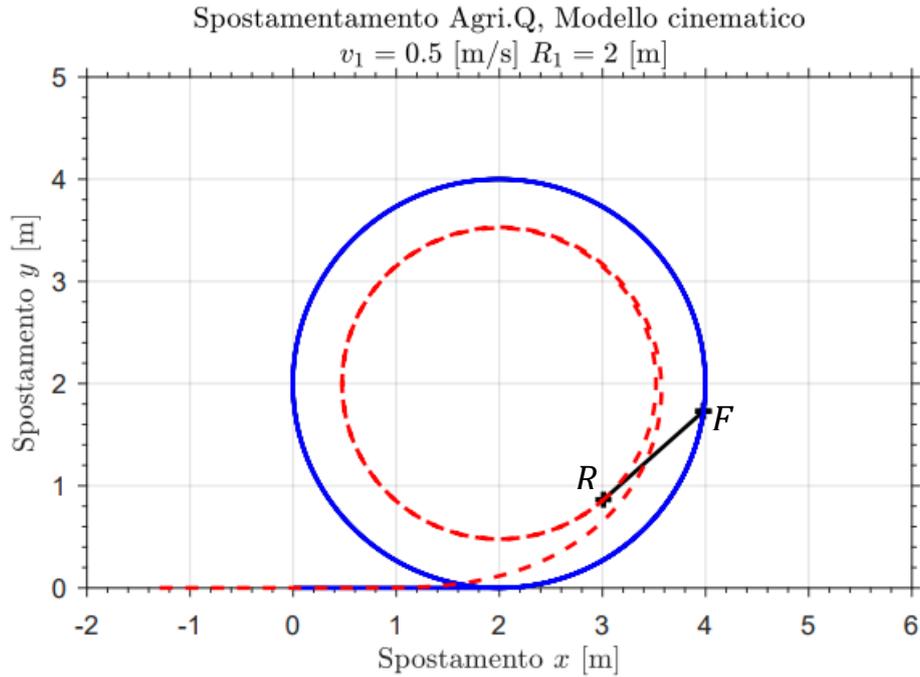
$$\dot{\delta} = \dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2 \quad (1.4.22)$$

Si ottiene la relazione:

$$R_2 = \left( \frac{\dot{\phi}_1}{\dot{\phi}_1 - \dot{\delta}} \right) R_1 \cos(\delta) \quad (1.4.23)$$

Quest'ultima relazione è importante in quanto a parità di  $R_2$  più aumenta l'angolo  $\delta$  più il modulo anteriore sterza con un raggio di curvatura ridotto.

Con il modello spiegato in questo capitolo, è stato simulato un andamento di Agri.Q che compie un raggio di curvatura di  $R = 2 \text{ m}$  a una velocità  $v_1 = 0,5 \text{ m/s}$  (**Figura 12**).



**Figura 12:** *Traiettoria modello cinematico*

Come detto anticipatamente le ruote del modulo posteriore non sono sterzanti; quindi, esso segue sempre una traiettoria interna a quella del modulo posteriore; infatti, l'unico modo per ottenere una traiettoria esterna è quello di dotare il modulo posteriore di ruote sterzanti. [9]

Si noti che la traiettoria del rimorchio è circolare solo dopo un certo tempo: Quando il modulo frontale inizia a seguire una traiettoria circolare si ha un transitorio iniziale in cui il percorso del modulo posteriore inizia a piegarsi ed è necessario che il modulo frontale raggiunga un cambio di direzione di almeno  $90^\circ$  per raggiungere le condizioni di regime. Si osserva dalla **figura 12** che il raggio di curvatura del modulo frontale risulta essere di 2 m, mentre quello del modulo posteriore che, come è stato riportato precedentemente, può essere calcolato secondo la (1.4.23), risulta essere di 1.52 m.

## 1.5. Modello Dinamico

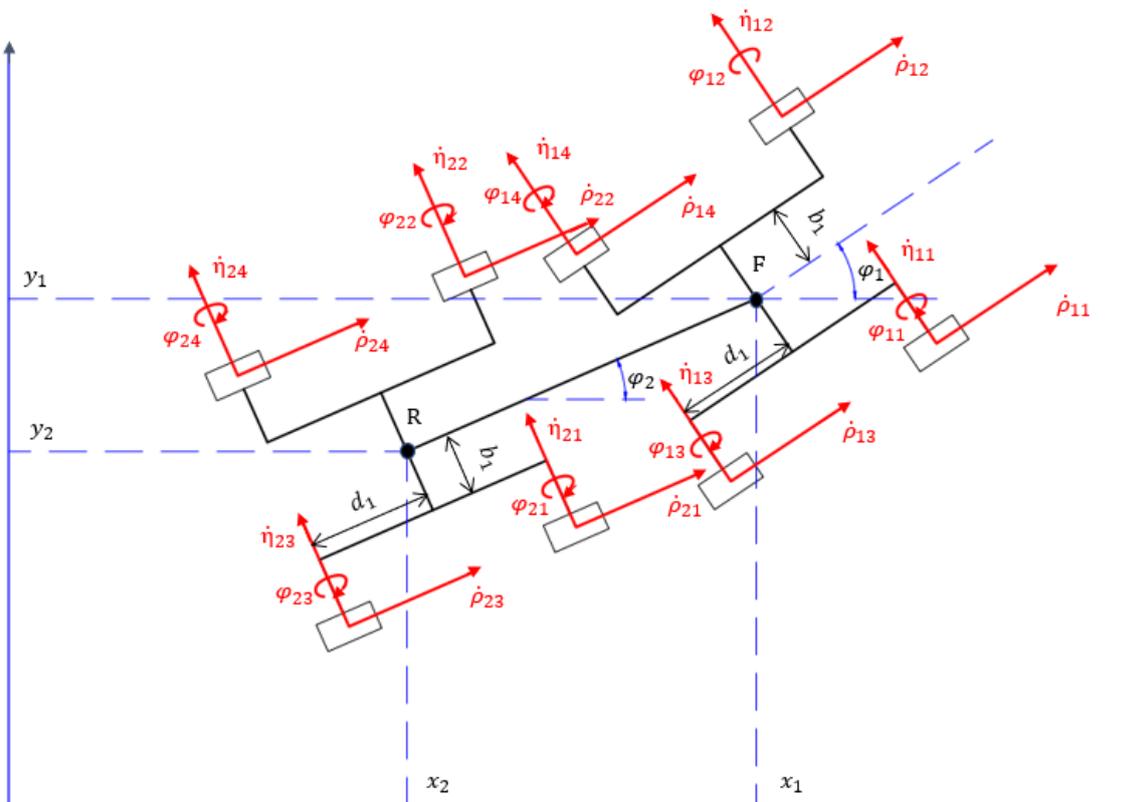
L'architettura di Agri.Q permette di utilizzare tre diverse combinazioni di funzionamento: il modulo anteriore che traina il secondo come un rimorchio, il secondo che spinge la prima unità robot o entrambi i moduli che lavorano insieme.

Uno schema del sistema è illustrato in **Figura 13**. Il primo modulo ha la sua massa  $m_1$  centrata nel punto  $F$ , mentre il secondo di massa  $m_2$  sul punto  $R$ .

I due moduli, come precedentemente illustrato nel paragrafo sul modello cinematica, sono collegati dai due collegamenti  $L_1$  e  $L_2$ , per mezzo del giunto indicato in  $O$ , il quale permette un moto di imbardata relativo tra i moduli. Ricordiamo che nel caso di Agri.Q  $L_1 = 0$  m.

Sebbene nei robot attuali sia presente anche un giunto che consente il relativo movimento di rollio, il modello non lo rappresenta, poiché è limitato al movimento lungo il piano. [10]

Per il modulo generico  $j = 1,2$  è possibile individuare le quattro ruote di massa  $m_{j,k}$  a  $(\pm d_j, \pm b_j)$  nel sistema di riferimento locale, individuato nel centro di massa di ogni modulo.



**Figura 13:** Coordinate generalizzate del modello dinamico e parametri geometrici

La **tabella 3**, sotto riportata, raccoglie le coordinate del sistema necessari alla rappresentazione del robot. Esse si ripetono per ogni modulo e per ogni ruota: tre coordinate  $(x_j, y_j, \theta_j)$  definiscono la posa di ogni modulo e altre tre coordinate  $(\rho_{jk}, \eta_{jk}, \varphi_{jk})$  descrivono lo stato di ciascuna ruota. Pertanto, dati due moduli e otto ruote, è possibile definire il vettore di coordinate generalizzato  $\mathbf{q}_{30 \times 1}$  raccogliendoli tutti. [10]

**Tabella 3:** Descrizione delle coordinate

Simbolo	Descrizione
$j$	Pedice che indica il modulo: 1 per il frontale, 2 per il posteriore
$k$	Pedice della ruota: dispari per il lato destro e pari per il lato sinistro
$x_j$	Posizione orizzontale del modulo $j$ nel sistema di riferimento inerziale
$y_j$	Posizione verticale del modulo $j$ nel sistema di riferimento inerziale
$\theta_j$	angolo del modulo $j$ nel sistema di riferimento inerziale
$\eta_{jk}$	Spostamento laterale della ruota $jk$ nel sistema di riferimento locale
$\rho_{jk}$	Spostamento longitudinale della ruota $jk$ nel sistema di riferimento locale
$\varphi_{jk}$	Spostamento angolare della ruota $jk$ attorno al suo asse

Il numero minimo di coordinate necessarie per definire adeguatamente il sistema è 12: quattro coordinate spaziali per definire la posizione di ogni modulo due coordinate nel piano, due coordinate angolari per rappresentare la posizione dei moduli e otto coordinate angolari per rappresentare la rotazione delle ruote.

Di conseguenza, date le 30 coordinate definiti in precedenza, devono essere definite 18 equazioni di vincolo:

$$\dot{\rho}_{jk} = \dot{x}_j \cos\theta_j + \dot{y}_j \sin\theta_j - (-1)^k b_j \dot{\theta}_j \quad \text{con } j = 1,2 \text{ e } k = 1,2,3,4 \quad (1.5.1)$$

$$\dot{\eta}_{jk} = -\dot{x}_j \sin\theta_j + \dot{y}_j \cos\theta_j + d_j \dot{\theta}_j \quad \text{con } j = 1,2 \text{ e } k = 1,2 \quad (1.5.2)$$

$$\dot{\eta}_{jk} = -\dot{x}_j \sin\theta_j + \dot{y}_j \cos\theta_j - d_j \dot{\theta}_j \quad \text{con } j = 1,2 \text{ e } k = 3,4 \quad (1.5.3)$$

$$\dot{x}_2 = \dot{x}_1 + L_1 \dot{\theta}_1 \sin\theta_1 + L_2 \dot{\theta}_2 \sin\theta_2 \quad (1.5.4)$$

$$\dot{y}_2 = \dot{y}_1 - L_1 \dot{\theta}_1 \cos\theta_1 - L_2 \dot{\theta}_2 \cos\theta_2 \quad (1.5.5)$$

Dove (1.5.1), (1.5.2) e (1.5.3) rappresentano gli slittamenti longitudinali e laterali delle ruote, mentre (1.5.4) e (1.5.5) la relazione tra il modulo anteriore e posteriore.

Questi vincoli possono essere scritti in modo compatto in forma matriciale definendo la matrice dei vincoli del sistema:  $\mathbf{A}(\mathbf{q})$

$$\mathbf{A}_{18 \times 30}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}}_{30 \times 1} = 0 \quad (1.5.6)$$

Viene utilizzato l'approccio di Newton-Eulero per ricavare le equazioni dinamiche che governano il sistema.

Il sistema, per essere studiato, viene suddiviso in 10 (2 moduli e 8 ruote) sottosistemi, per i quali si disegna il diagramma di corpo libero e vengono riportati nella figura sottostante (**Figura 14**).

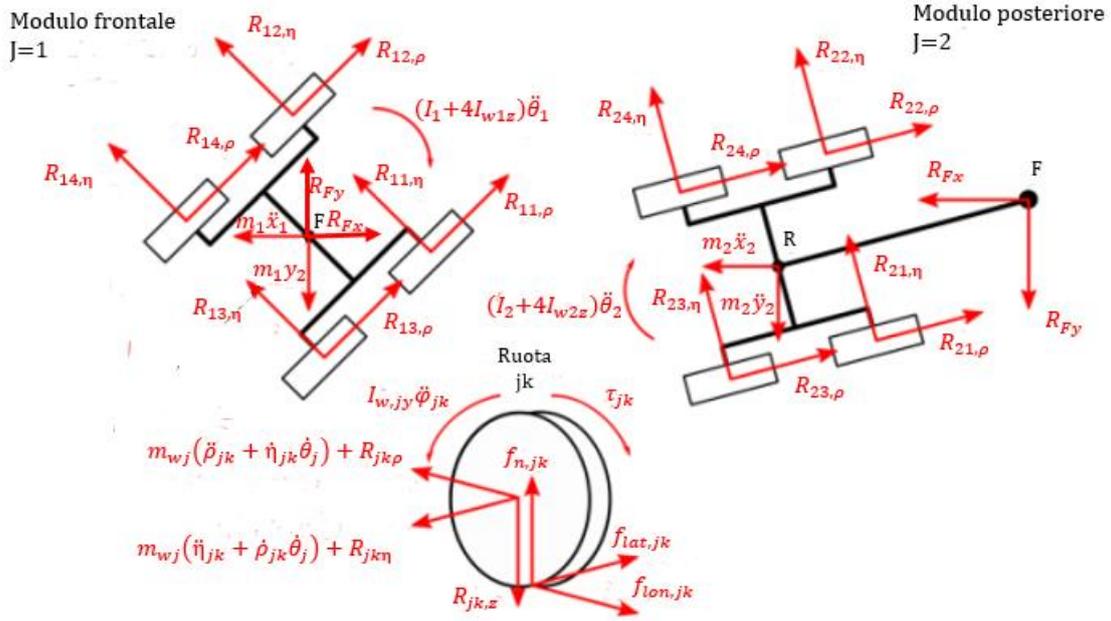


Figura 14: Diagrammi di corpo libero

Dai diagrammi di corpo libero è possibile scrivere le equazioni che governano i due moduli e le otto ruote:

$$m_j \ddot{x}_j = \cos\theta_j \sum_{k=1}^4 R_{jk\rho} - \sin\theta_j \sum_{k=1}^4 R_{jk\eta} - (-1)^j R_{Ox} \quad (1.5.7)$$

$$m_j \ddot{y}_j = \sin\theta_j \sum_{k=1}^4 R_{jk\rho} + \cos\theta_j \sum_{k=1}^4 R_{jk\eta} - (-1)^j R_{Oy} \quad (1.5.8)$$

$$(I_j + 4I_{wjz}) \ddot{\theta}_j = b_j \sum_{k=1}^4 (-(-1)^k R_{jk\rho}) + d_j (R_{j1\eta} + R_{j2\eta} - R_{j3\eta} - R_{j4\eta}) + L_j (R_{Ox} \sin\theta_j - R_{Oy} \cos\theta_j) \quad (1.5.9)$$

In cui  $R_{jk\sim}$  è la reazione vincolare del mozzo della ruota, rispettivamente  $\rho$  longitudinale e  $\eta$  laterale;  $I_j$  è il momento di inerzia del corrispettivo modulo, rispettivamente  $I_1 = 9.167 \text{ kg m}^2, I_2 =$

4.167 kg m<sup>2</sup>;  $R_{Ox}$  e  $R_{Oy}$  le reazioni vincolari del giunto O;  $m_j$ , la massa dei moduli, rispettivamente  $m_1 = 66.24$  kg,  $m_2 = 35.24$  kg.

Per completare le equazioni dinamiche del sistema, si può definire un insieme di tre equazioni per la generica ruota  $jk$  con  $j = 1,2$  e  $k = 1,2,3,4$ . La dinamica verticale viene trascurata e la forza normale viene utilizzata solo per definire la resistenza al rotolamento. [10]

L'ipotesi "forte" che si fa è che la forza normale è la stessa per tutte le ruote. [10]

$$m_{wj}\ddot{\rho}_{jk} = f_{lon\ jk} - R_{jk\rho} + m_{wj}\dot{\eta}_{jk}\dot{\theta}_j \quad (1.5.10)$$

$$m_{wj}\dot{\eta}_{jk} = f_{lat\ jk} - R_{jk\eta} - m_{wj}\dot{\rho}_{jk}\dot{\theta}_j \quad (1.5.11)$$

$$I_{wj}\ddot{\phi}_{jk} = \tau_{jk} - r_{wj}f_{lon\ jk} - k_{roll\ j}f_{n\ jk}sign(\dot{\phi}_{jk}) \quad (1.5.12)$$

Le 30 equazioni dinamiche, che descrivono il sistema e che sono state ricavate precedentemente, possono essere riscritte in forma matriciale:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{f}(\dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{A}(\mathbf{q})^T \mathbf{R} = \mathbf{B}\boldsymbol{\tau} \quad (1.5.13)$$

$\mathbf{M}_{30 \times 30}$  è la matrice di massa diagonale,  $\mathbf{B}_{30 \times 8}$  è la matrice di input,  $\boldsymbol{\tau}_{8 \times 1} = [\tau_{11}, \dots, \tau_{jk}, \dots, \tau_{24}]^T$  è il vettore contenente tutte le coppie applicate alle ruote,  $\mathbf{f}(\dot{\mathbf{q}})_{30 \times 1}$  è il vettore delle forze di contatto al suolo della ruota,  $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})_{30 \times 1}$  è il vettore delle forze centripete e di Coriolis,  $\mathbf{A}(\mathbf{q})_{18 \times 30}$  è la matrice dei vincoli,  $\mathbf{R}_{18 \times 1}$  è il vettore delle forze dei vincoli, o il vettore dei moltiplicatori di Lagrange.

Dall'equazione (1.4.6) si può dedurre che tutte le velocità ammesse sono nello spazio nullo di  $\mathbf{A}(\mathbf{q})$ . Questo spazio nullo può essere rappresentato da un insieme di vettori  $\mathbf{n}_1(\mathbf{q}), \dots, \mathbf{n}_{12}(\mathbf{q})$ , che definiscono la base della matrice dello spazio nullo di  $\mathbf{A}(\mathbf{q})$ :

$$\mathbf{A}(\mathbf{q})\mathbf{n}_i(\mathbf{q}) = 0 \quad \text{con } i = 1, 2, \dots, 12 \quad (1.5.14)$$

Quindi è possibile definire  $\mathbf{N}(\mathbf{q})$  come la matrice dello spazio nullo di  $\mathbf{A}(\mathbf{q})$ :

$$\mathbf{A}_{18 \times 30}(\mathbf{q})\mathbf{N}_{30 \times 12}(\mathbf{q}) = \mathbf{0} \rightarrow \mathbf{N}(\mathbf{q})^T \mathbf{A}(\mathbf{q})^T = \mathbf{0} \quad (1.5.15)$$

Allo stesso tempo  $\dot{\mathbf{q}}$  è una combinazione lineare dei 12 vettori che compongono  $\mathbf{N}(\mathbf{q})$ , quindi può essere riscritto in modo compatto come  $\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{N}(\mathbf{q})\mathbf{u}$ . Dove  $\mathbf{u}$  è un vettore contenente il numero minimo di variabili cinematiche indipendenti  $u_1, u_2, \dots, u_{12}$  necessarie per descrivere completamente il sistema.

Per il caso generale qui proposto il vettore delle variabili cinematiche indipendenti del sistema può essere il seguente:

$$u_{12 \times 1} = [\dot{x}_1, \dot{y}_1, \dot{\theta}_1, \dot{\phi}_{11}, \dot{\phi}_{12}, \dot{\phi}_{13}, \dot{\phi}_{14}, \dot{\theta}_2, \dot{\phi}_{21}, \dot{\phi}_{22}, \dot{\phi}_{23}, \dot{\phi}_{24}]^T \quad (1.5.16)$$

Quindi, è possibile calcolare  $\mathbf{N}(\mathbf{q})$  da  $\mathbf{A}(\mathbf{q})$ . Con questa nuova matrice, è possibile ridefinire (1.5.13) utilizzando il numero minimo di condizioni seguendo questi passaggi:

$$\ddot{\mathbf{q}} = \dot{\mathbf{N}}\mathbf{u} + \mathbf{N}\dot{\mathbf{u}} \quad (1.5.17)$$

$$\mathbf{N}^T(\mathbf{M}\dot{\mathbf{N}}\mathbf{u} + \mathbf{M}\mathbf{N}\dot{\mathbf{u}}) = \mathbf{N}^T\mathbf{B}\boldsymbol{\tau} - \mathbf{N}^T\mathbf{f} - \mathbf{N}^T\mathbf{C} - \mathbf{N}^T\mathbf{A}^T\mathbf{R}$$

$$\mathbf{N}^T\mathbf{M}\mathbf{N}\dot{\mathbf{u}} = \mathbf{N}^T\mathbf{B}\boldsymbol{\tau} - \mathbf{N}^T(\mathbf{M}\dot{\mathbf{N}}\mathbf{u} - \mathbf{C} - \mathbf{f})$$

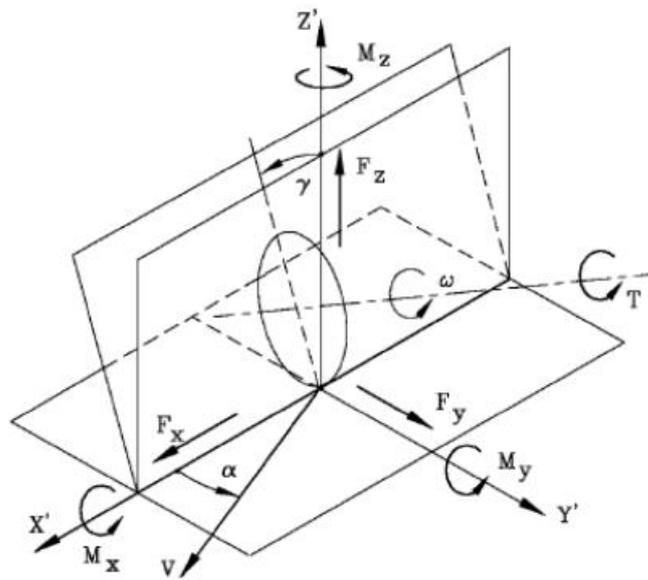
$$\dot{\mathbf{u}} = \mathbf{H}\boldsymbol{\tau} - \mathbf{G} \quad (1.5.18)$$

Dove:  $\mathbf{H} = (\mathbf{N}^T\mathbf{M}\mathbf{N})^{-1}\mathbf{N}^T\mathbf{B}$  e  $\mathbf{G} = (\mathbf{N}^T\mathbf{M}\mathbf{N})^{-1}\mathbf{N}^T(\mathbf{M}\dot{\mathbf{N}}\mathbf{u} - \mathbf{f} - \mathbf{C})$

### 1.5.1. Forze di contatto

Per modellare correttamente la dinamica di un qualsiasi sistema mobile è fondamentale considerare le forze di contatto tra pneumatico e terreno in modo tale da considerare lo slittamento. Per chiarezza è conveniente descrivere brevemente gli pneumatici.

Il sistema di riferimento dello pneumatico è solidale ad esso (tranne per la rotazione attorno al proprio asse) e può essere individuato da due angoli caratteristici che individuano la sua giacitura rispetto al sistema di riferimento solidale al veicolo indicato con  $(X', Y', Z')$  in **Figura 15** [11].



**Figura 15:** Sistemi di riferimento per lo studio della ruota [11]

L'angolo  $\gamma$  è detto angolo di campanatura (camber angle) e rappresenta l'angolo di inclinazione del piano mediano della ruota rispetto al piano verticale  $(X'-Z')$ , individuabile in una vista posteriore del veicolo. Il camber viene definito positivo se l'estremo superiore della ruota punta verso l'esterno del veicolo. Il secondo angolo usato per individuare l'orientazione della ruota rispetto al veicolo è l'angolo di convergenza (toe angle), ovvero l'angolo compreso tra il piano equatoriale della ruota e il piano formato dal piano  $(X'-Z')$  individuabile da una vista dall'alto del veicolo.

Con toe-in si indicano angoli di convergenza positivi, per cui l'intersezione dei piani mediani si verifica anteriormente rispetto al veicolo; toe-out nel caso di angoli negativi.

L'angolo di deriva della ruota  $\alpha$  è l'angolo compreso tra l'asse longitudinale del sistema di riferimento solidale alla ruota (asse  $x_r$ ) ed il vettore velocità del centro ruota  $V_O$  (Figura 16).

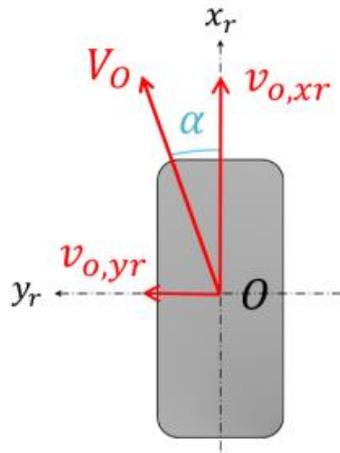


Figura 16: Angolo di deriva [11]

L'angolo di assetto del veicolo  $\beta$  (o angolo di deriva del veicolo) (Figura 17) è invece l'angolo compreso tra l'asse longitudinale del veicolo (asse  $x$ ) e il vettore velocità di un punto del veicolo. L'angolo di assetto può essere valutato in qualunque punto appartenente al veicolo, ma tipicamente è valutato in corrispondenza del baricentro [11].

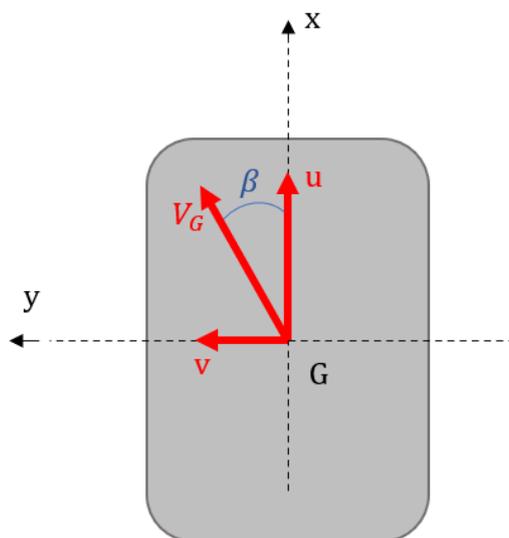


Figura 17: Angolo di assetto

La maggior parte degli studi che considerano lo slittamento delle ruote utilizzano la formula magica di Pacejka per modellare le forze di contatto, ossia di un modello basato su formule matematiche in

grado di riprodurre in modo accurato il comportamento meccanico dello pneumatico, una volta tarati alcuni coefficienti che vengono identificati da prove sperimentali [11].

Nel caso considerato, però, non è possibile utilizzare questa formula in quanto il numero di parametri necessari per modellare il contatto è elevato e solitamente non è facile individuarli se le ruote non sono pneumatici commerciali.

Per questo motivo viene definito un modello più semplice basato sulla rigidità normale, longitudinale e laterale della ruota. [10]

La forza di contatto normale  $f_{njk}$  è definita come una funzione lineare dello spostamento normale della ruota  $\Delta z_{jk}$ :

$$f_{njk} = k_{nj}\Delta z_{jk} \quad (1.5.19)$$

Per ipotesi si considera la forza normale costante, uguale per tutte le ruote e uguale al valore statico, in quanto viene trascurata la dinamica verticale del robot. Pertanto, vengono trascurati anche tutti i trasferimenti di carico inerziale.

La forza di contatto longitudinale è definita come una funzione lineare della velocità relativa del piano di contatto della ruota, mentre la forza di contatto laterale è una funzione lineare della velocità laterale della ruota:

$$\text{se } \sqrt{f_{lon\ jk}^2 + f_{lat\ jk}^2} \leq \mu_s f_{n\ jk} \rightarrow \begin{cases} f_{lon\ jk} = k_{lon\ j} (r_{w\ j} \dot{\phi}_{jk} - \dot{\rho}_{jk}) \\ f_{lat\ jk} = -k_{lat\ j} \dot{\eta}_{jk} \end{cases} \quad (1.5.20)$$

$$\text{se } \sqrt{f_{lon\ jk}^2 + f_{lat\ jk}^2} > \mu_s f_{n\ jk} \rightarrow \begin{cases} f_{lon\ jk} = \mu_d f_{n\ jk} \frac{k_{lon\ jk} (r_{w\ j} \dot{\phi}_{jk} - \dot{\rho}_{jk})}{\sqrt{f_{lon\ jk}^2 + f_{lat\ jk}^2}} \\ f_{lat\ jk} = -\mu_d f_{n\ jk} \frac{k_{lat\ j} \dot{\eta}_{jk}}{\sqrt{f_{lon\ jk}^2 + f_{lat\ jk}^2}} \end{cases} \quad (1.5.21)$$

È necessario identificare alcuni parametri per validare correttamente il modello proposto.

La rigidità laterale e longitudinale della ruota sono i parametri principali che devono essere identificati mediante l'adattamento dei dati sperimentali. Il processo di stima viene eseguito risolvendo un problema di minimi quadrati non lineare per minimizzare la differenza tra le quantità misurate e gli stati simulati.

Il processo di stima [10] [8], viene effettuato facendo eseguire al robot diverse prove su un manto erboso piano, con scostamenti limitati.

La prima serie di prove consiste nel far muovere il robot in linea retta a velocità diverse per stimare i parametri che influenzano la dinamica longitudinale: i coefficienti di attrito statico e dinamico  $\mu_s$  e  $\mu_d$ , la rigidità longitudinale delle ruote  $k_{lon j}$  e il parametro di attrito volvente  $k_{roll j}$ ; senza l'influenza di alcuna dinamica laterale. Nella seconda serie di prove, invece, il robot segue una traiettoria circolare, sia a destra che a sinistra, con diverse velocità angolari.

In questi casi sono presenti dinamiche sia laterali che longitudinali, ma avendo precedentemente individuato quelle longitudinali è possibile concentrarsi sulla stima di quelle laterali  $k_{lat j}$ .

Per ottenere una buona identificazione, è stato ripetuto più volte un test in cui al robot viene fatta eseguire una traiettoria circolare con raggio definito. Confrontando i risultati sperimentali e simulati si è ottenuto che il raggio medio della traiettoria simulata non si discosta molto dal valore effettivo; ciò significa che le grandezze laterali individuate possono essere considerate una buona approssimazione dei risultati sperimentali, ottenendo i risultati presentati in **tabella 4**.

**Tabella 4:** *parametri di contatto delle ruote*

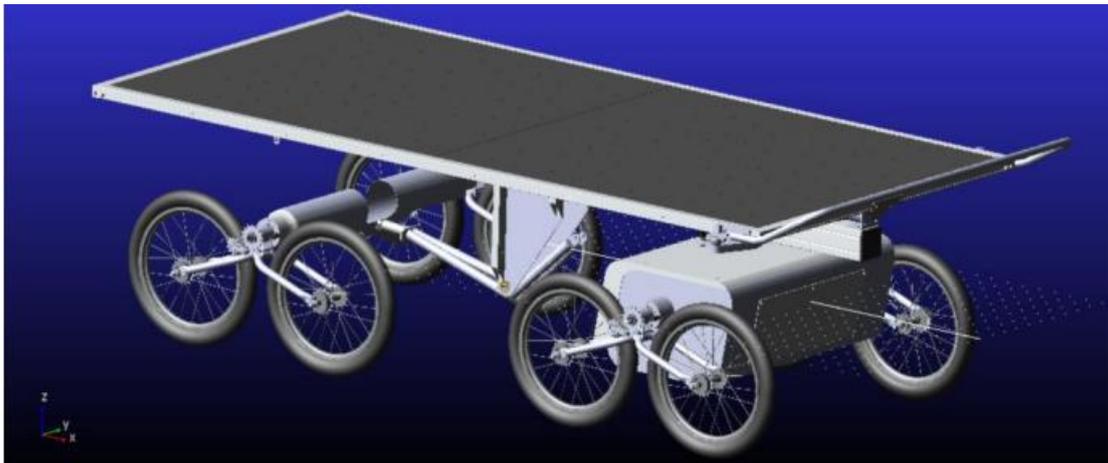
Parametri	Agri.Q
$k_l$	2939,81 [ $Nsm^{-1}$ ]
$k_t$	2039,05 [ $Nsm^{-1}$ ]
$k_n$	15000 [ $Nm^{-1}$ ]
$\mu_s$	0,63
$\mu_d$	0,30

Tuttavia, si è notato che l'ipotesi di un carico verticale costante ed uguale su ciascuna ruota sembra portare ad una distribuzione impropria del carico e di conseguenza allo slittamento delle ruote a causa della forte correlazione tra carico verticale e forze di contatto. Per questo motivo, il modello

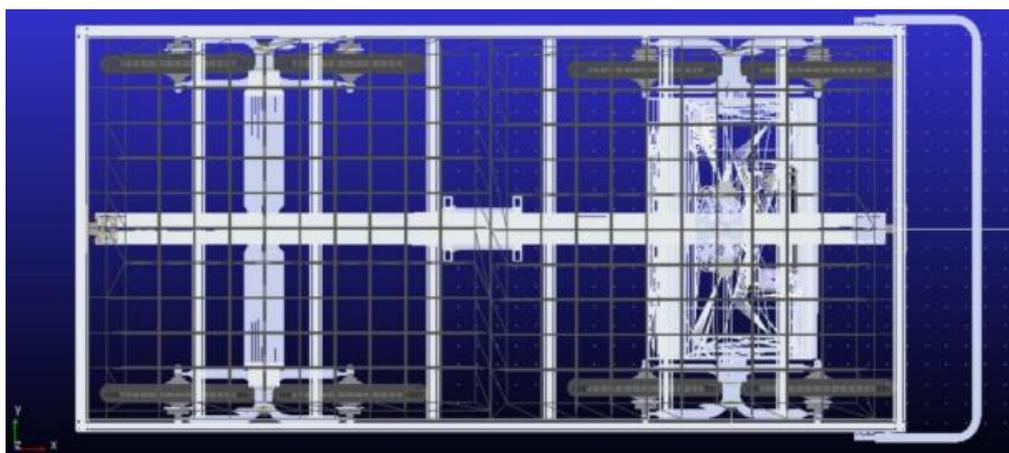
che verrà utilizzato per la trattazione di questa tesi e che verrà introdotto nel capitolo successivo si svincola dall'ipotesi di un carico verticale costante ed uguale su ciascuna ruota.

## 1.6. Modello Adams

Nel modello dinamico descritto nel capitolo 1.5 si ipotizza che le forze normali di contatto siano uguali e costanti. Passando alla descrizione del modello Adams, viene rappresentata la dinamica del robot nella sua completezza: carichi distribuiti opportunamente e viene posta attenzione agli effetti inerziali, svincolandosi così dall'ipotesi di un carico verticale costante ed uguale su ciascuna ruota. Per riferirci al modello Adams verrà effettuata una modifica alla nomenclatura fino ad ora utilizzata.



**Figura 18:** *Modello del robot Agri.q realizzato in ambiente Adams*



**Figura 19:** *Vista dall'alto del modello di Agri.q*

- Le grandezze riferite al modulo frontale vengono indicate con il pedice F invece che con il pedice 1.

$$(x_1, y_1, \varphi_1) \rightarrow (x_F, y_f, \varphi_F)$$

- Le grandezze riferite al modulo posteriore vengono indicate con il pedice R invece che con il pedice 2.

$$(x_2, y_2, \varphi_2) \rightarrow (x_R, y_R, \varphi_R)$$

**Tabella 5:** *Nomenclatura modello Adams*

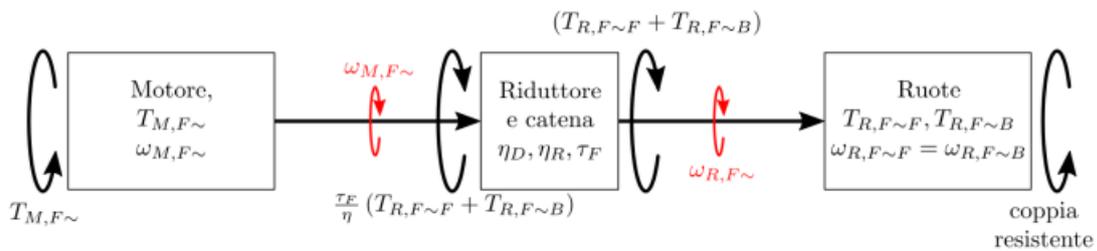
<b>Simbolo</b>	<b>Descrizione</b>
$\omega_{M,F\sim}$	Velocità angolare del motore (M) sinistro (L) o destro (R) del modulo frontale (F)
$\omega_{w,F\sim F}$	Velocità angolare della ruota (w) del modulo frontale (F), posta sull'unità motrice di sinistra (L) o destra (R), anteriormente (F)
$\omega_{R,F\sim B}$	Velocità angolare della ruota (R) del modulo frontale (F), posta sull'unità motrice di sinistra (L) o destra (R), posteriormente (B)
$\omega_{M,R\sim}$	Velocità angolare del motore (M) sinistro(L) o destro(R) del modulo posteriore(R)
$\tau_F$	Rapporto di trasmissione motore-ruota del modulo frontale
$\tau_B$	Rapporto di trasmissione motore-ruota del modulo posteriore

### 1.5.1. Modello della Trasmissione Anteriore

La trasmissione viene modellata ripristinando separatamente congruenza ed equilibrio. Per la congruenza, si impone:

$$\omega_{M,F\sim} = \frac{\omega_{R,F\sim F}}{\tau_F} = \frac{\omega_{R,F\sim B}}{\tau_F} \quad (1.6.1)$$

Per l'equilibrio, si applicano ai due lati della trasmissione la coppia trasmessa secondo lo schema sottostante.



**Figura 20:** Schema della trasmissione del modulo frontale

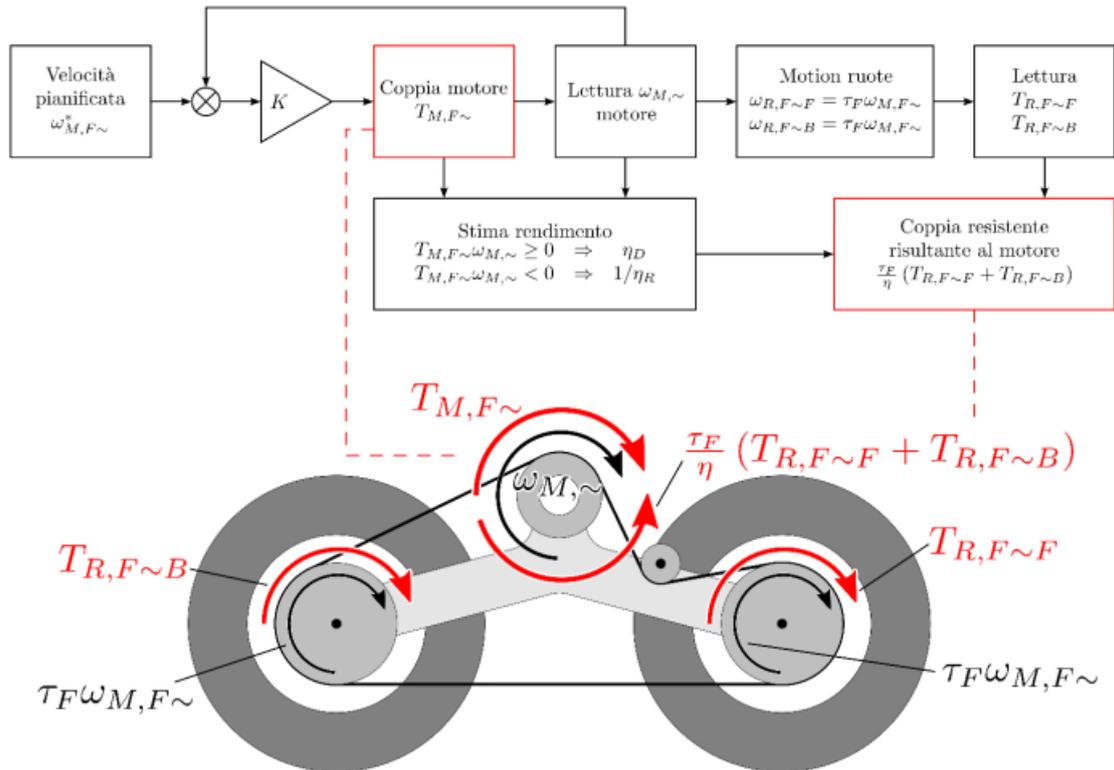
Il rendimento  $\eta$  è funzione del verso del flusso di potenza:

$$T_{M,F\sim} \omega_{M,F\sim} \geq 0 \rightarrow \text{moto diretto} \rightarrow \eta = \eta_D \quad (1.6.2)$$

$$T_{M,F\sim} \omega_{M,F\sim} < 0 \rightarrow \text{moto retrogrado} \rightarrow \eta = \frac{1}{\eta_R} \quad (1.6.3)$$

Per Agri.Q  $\eta_D = 0.6, \eta_R = 0.35$  e  $\tau_F = \frac{1}{47.64}$ .

La coppia resistente alle ruote è fornita dal contatto a terra.



**Figura 21:** Schema dell'implementazione della trazione anteriore sul modello del robot Agri.Q realizzato in Adams

L'implementazione Adams è basata su un driver per ogni ruota che garantisce il rispetto del vincolo  $\omega_{M,F\sim} = \frac{1}{\tau_F} \omega_{R,F\sim F} = \frac{1}{\tau_F} \omega_{R,F\sim B}$  la coppia generata dal vincolo viene letta ed applicata all'albero motore.

Operativamente (ad esempio per la ruota FRF):

- Si applica un'attuazione al motore FR tramite driver cinematico usando la variabile  $\omega_{des FR}$  contenente il profilo di velocità desiderato. La velocità angolare del motore FR,  $\omega_{des FR}$ , viene usata come variabile d'ingresso per la co-simulazione Adams/ Matlab.
- Viene generata una misura della velocità angolare del motore a portatreno fermo.
- La misura ottenuta viene imposta tramite driver cinematico alle ruote.
- Si calcola la coppia alla ruota  $T_{R,F\sim}$ .
- Si stima il verso del flusso dalla potenza istantanea del motore.
- Si applica la reazione risultante da entrambe le ruote all'albero motore.

Nota: la stima del flusso di potenza rende il problema differenziale algebrico. Per evitare il problema, si applica il valore di rendimento stimato agli step di integrazione precedenti introducendo un delay di 1 ms.

### 1.6.2. Modello della trasmissione posteriore

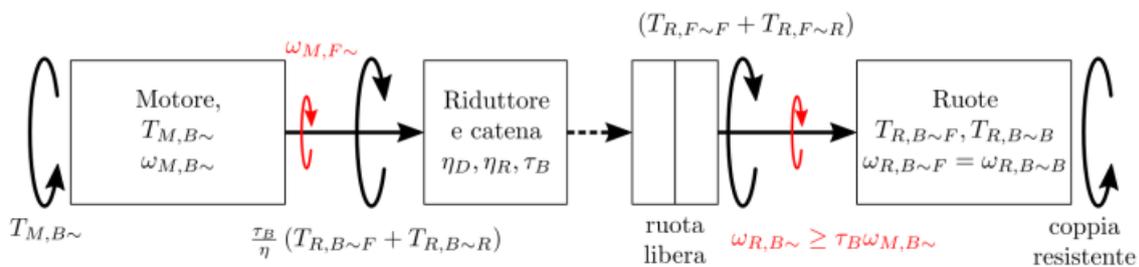
La descrizione della trasmissione del modulo posteriore è fondamentale in questo lavoro di tesi in quanto successivamente verrà analizzato l'effetto dell'azionamento del modulo posteriore sulla manovrabilità del robot.

Il modello di trasmissione del posteriore differisce dall'anteriore in quanto: consiste in un meccanismo a ruota libera il cui funzionamento corrisponde a quello delle bici. Tale peculiarità migliora notevolmente le prestazioni di durata della batteria dell'intero robot poiché evita che i riduttori di trasmissione delle unità posteriori vengano trascinati dal moto del rover quando non sono attivi, con un conseguente miglioramento dell'efficienza. Il meccanismo a ruota libera fa sì che le ruote posteriori di Agri.Q possano esercitare una coppia solo in marcia avanti.

Per la trasmissione posteriore non si può procedere allo stesso modo proprio a causa della natura unilaterale del vincolo di ruota libera:

$$\omega_{M,B\sim} \leq \frac{1}{\tau_B} \omega_{R,B\sim F} = \frac{1}{\tau_B} \omega_{R,B\sim B} \tag{1.6.3}$$

Dove  $\tau_B = 1/28.93$ .



**Figura 22:** Schema della trasmissione del modulo posteriore

Per applicare la procedura usata per la trasmissione anteriore sarebbe necessario generare un driver cinematico valido solo quando viene applicata una coppia  $T_{M,B\sim} > 0$ . Il problema si risolve rendendo la coppia trasmessa funzione della velocità angolare, a bilanciere fermo (La trasmissione può essere vista come un meccanismo epicicloidale dove il bilanciere è il portatreno che fa ruotare i satelliti (le ruote), il pignone è invece la ruota solare. Ipotizzando il bilanciere fermo si semplifica la trattazione. Se invece si considera il bilanciere mobile, la situazione varia, ma solo leggermente, perché l'effetto è presente molto brevemente in fase di accelerazione/decelerazione longitudinale oppure in presenza di ostacoli), del motore e della ruota. Ovvero:

$$T_{R,B\sim F} = K\left(\omega_{M,B\sim} - \frac{1}{\tau_B} \omega_{R,B\sim B}\right) \quad (1.6.4)$$

$$T_{R,B\sim B} = K\left(\omega_{M,B\sim} - \frac{1}{\tau_B} \omega_{R,B\sim B}\right) \quad (1.6.5)$$

$K$  variabile arbitraria in grado di mantenere il vincolo cinematico entro soglie di errore accettabili.

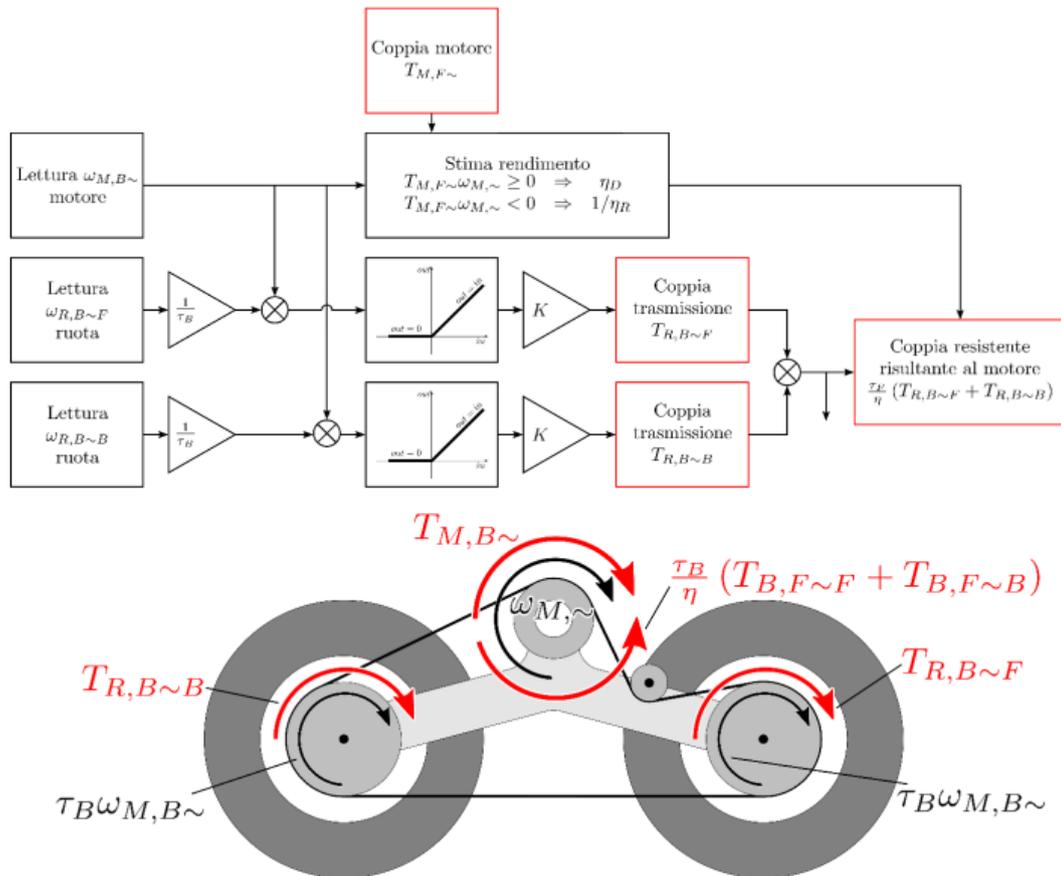


Figura 23: Schema dell'implementazione della trazione posteriore sul modello Adams

- Viene generata una misura della velocità angolare del motore a portatreno fermo.
- Viene generata una misura della velocità angolare delle ruote a portatreno fermo.
- Si inizializza la coppia motore come variabile di input (da Simulink o dall'utente).
- Si calcola la differenza di velocità angolare forzandola a valore nullo al di fuori del campo di validità del vincolo di ruota libera.
- Si stima la coppia applicata ad ogni ruota come:  $T_{R,B\sim F} = K(\omega_{M,B\sim} - \frac{1}{\tau_B}\omega_{R,B\sim F})$  e  $T_{R,B\sim B} = K(\omega_{M,B\sim} - \frac{1}{\tau_B}\omega_{R,B\sim B})$ .
- Si applicano le coppie  $T_{R,B\sim F}$  e  $T_{R,B\sim B}$  alle rispettive ruote.
- Si ristabilisce l'equilibrio applicando le stesse coppie all'albero motore, come resistenti alla coppia motrice  $T_{M,B\sim}$ .

### 1.6.3. Saturazione di corrente degli azionamenti

In questo modello Adams, viene posta particolare attenzione alla saturazione di corrente degli azionamenti, infatti ciascuno dei quattro azionamenti opera un taglio dell'alimentazione dei motori elettrici, garantendo un'erogazione di corrente superiore a quella nominale solo per un periodo di tempo limitato. Nel caso di Agri.Q, il valore di corrente di picco  $I_p = 20 A$ , a cui corrisponde una coppia di picco  $T_p$ , può essere mantenuta per un tempo di 2 s, trascorsi i quali la corrente assorbita viene riportata a livello nominale  $I_N = 10 A$ , a cui corrisponde una coppia nominale  $T_N = 0.55 Nm$  per i motori del modulo frontale e per i motori del modulo posteriore.

In caso di correnti comprese tra il valore di picco e il valore nominale  $I_N < I < I_p$ , il tempo di erogazione può aumentare fino al valore:

$$t = \frac{T_p - T_N}{T - T_N} t_p \quad (1.6.6)$$

Per modellare questo fenomeno viene definita la funzione:

$$f(T_{M,\sim}) = \begin{cases} |T_{M,\sim}| < T_N \rightarrow 0 \\ T_N < |T_{M,\sim}| \leq T_p \rightarrow |T_{M,\sim}| - T_N \end{cases} \quad (1.6.7)$$

La funzione è nulla quando la coppia erogata è inferiore a quella nominale, mentre è pari all'eccesso di coppia negli altri casi. L'integrale di  $f(T_{M,\sim})$  può essere usato per garantire la condizione di saturazione imposta dagli azionamenti, controllando che:

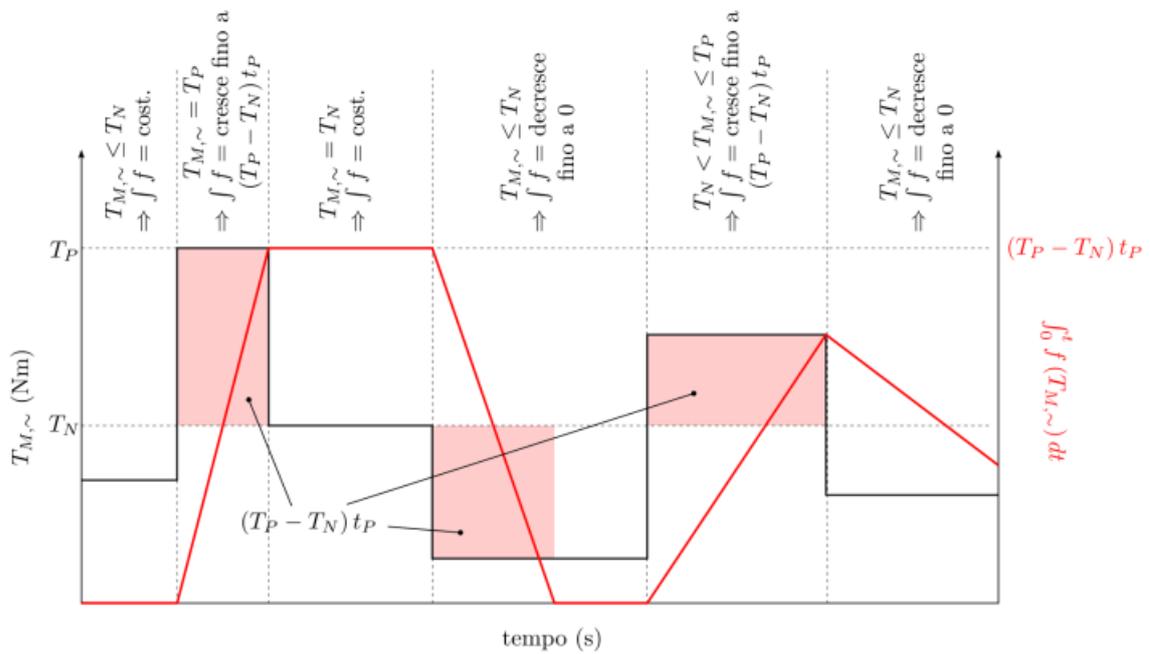
$$\int_0^t f(T_{M,\sim}) dt \leq (T_p - T_N) t_p \quad (1.6.8)$$

Per essere efficace, l'integrale precedente viene mantenuto sempre maggiore di zero, ovvero si utilizza la definizione di  $f(T_{M,\sim})$ :

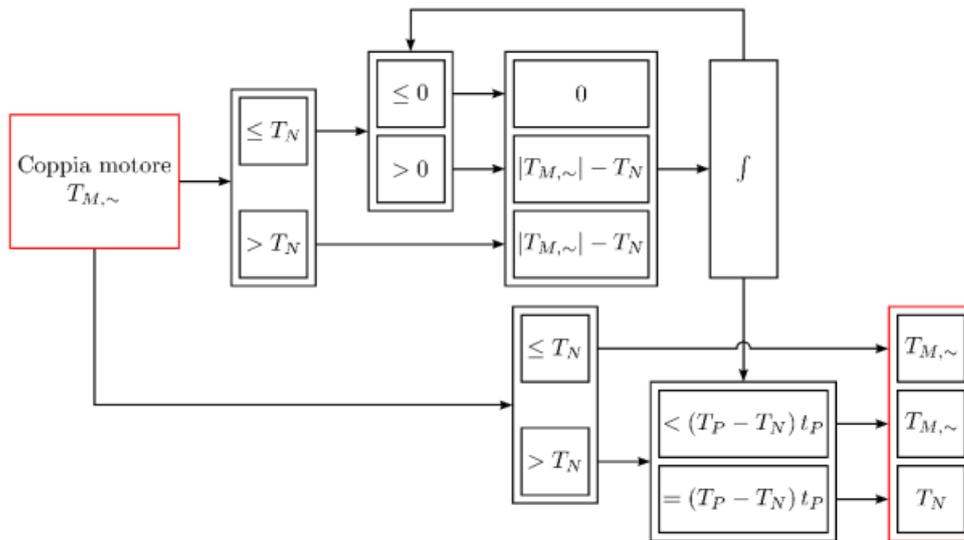
$$f(T_{M,\sim}) = \begin{cases} (|T_{M,\sim}| \leq T_N) \wedge \left(\int_0^{t-dt} f(T_{M,\sim}) dt \leq 0\right) \rightarrow 0 \\ (|T_{M,\sim}| \leq T_N) \wedge \left(\int_0^{t-dt} f(T_{M,\sim}) dt > 0\right) \rightarrow |T_{M,\sim}| - T_N \\ (T_N < |T_{M,\sim}| \leq T_P \rightarrow |T_{M,\sim}| - T_N \end{cases} \quad (1.6.9)$$

La coppia effettivamente erogata  $T_{M,\sim}$  viene modificata in funzione del valore dell'integrale:

$$T_{M,\sim} = \begin{cases} (|T_{M,\sim}| \leq T_N) \rightarrow T_{M,\sim} \\ T_N < |T_{M,\sim}| \leq T_P \wedge \left(\int_0^t f(T_{M,\sim}) dt < (T_P - T_N)t_p\right) \rightarrow T_{M,\sim} \\ (T_N < |T_{M,\sim}| \leq T_P \wedge \left(\int_0^t f(T_{M,\sim}) dt = (T_P - T_N)t_p\right) \rightarrow T_N \end{cases} \quad (1.6.10)$$



**Figura 24:** Andamento della coppia erogata  $T_{M,\sim}$  (in nero) e dell'integrale della funzione  $f(T_{M,\sim})$  (in rosso)



**Figura 25:** Schema di implementazione saturazione motori

La coppia effettivamente erogata viene regolata in funzione dell'integrale di  $f(T_{M,\sim})$  e si introduce una variabile contenente la coppia post-processo di saturazione che su Adams sarà indicata con  $T_{act\sim\sim}$ .

## 2. Strategia di attuazione

Il concetto di controllo di trazione può avere diversi significati e configurazioni a seconda delle diverse applicazioni in cui può essere attuato, non è perciò facile da definire in modo univoco. In generale è un sistema che migliora le caratteristiche di trazione di un veicolo.

Il controllo di trazione nasce negli anni '70, ossia quando sono stati sviluppati i primi sistemi di controllo elettronici, con caratteristiche e prestazioni diverse a seconda del veicolo di destinazione e di esigenze di mercato. Lo sviluppo tecnologico degli ultimi anni ha permesso di utilizzare un numero di sensori e attuatori sempre più maggiori in tutti gli ambiti tecnologici, compreso il settore automotive in cui il controllo di trazione ha la funzione di controllare la stabilità dell'intero veicolo, soprattutto su fondi stradali a scarsa aderenza [12].

Lo studio delle architetture di controllo per la dinamica di robot articolati è ancora in fase sperimentale; infatti, la letteratura scientifica pubblica non fornisce molte informazioni, in particolare per le applicazioni di interesse di questa tesi.

Nonostante ciò, è comunque possibile sviluppare dei controlli per i robot mobili articolati facendo riferimento ad alcune strategie di controllo della trazione utilizzate in ambito automotive.

Uno dei sistemi di controllo utilizzati in ambito automotive è il TCS Bosch. Non vengono fornite molte indicazioni sul suo principio di funzionamento, è possibile comunque intuire, dalla letteratura pubblicata, che la variabile da controllare è lo scorrimento longitudinale, il quale viene mantenuto ad un valore ottimale attraverso un controllore PID. Quando il coefficiente di attrito non è uguale tra le ruote a destra e a sinistra di un'auto, la corretta distribuzione della coppia motrice ai due lati viene ottenuta applicando una coppia frenante asimmetrica che simula il blocco del differenziale, attraverso le valvole del controllo ABS. Durante la fase di accelerazione su fondo asimmetrico, la ruota sul fondo più scivoloso ruota più velocemente dell'altra generando una velocità differenziale maggiore di 0. Il Transversal differential lock controller, ovvero la parte del sistema che simula il blocco del differenziale, controlla quindi a 0 la velocità differenziale attraverso un controllore PI. L'intervento di riduzione della coppia motrice avviene, oltre che con l'attuazione dei freni, con interventi sull'accensione [12].

La maggior parte delle auto prodotte al giorno d'oggi possiedono di serie o come optional dei sistemi di controllo della frenata, trazione e stabilità i cui fini sono gli stessi del controllo introdotto precedentemente, ma il cui funzionamento può essere diverso (es. Electronic Stability Program ESP).

È importante notare che i sistemi sono progettati per un uso stradale e si attivano quasi solo in caso di emergenza.

È interessante osservare però che alcuni modelli di auto sportive, abbinano ai comuni sistemi di controllo il DCCD, ovvero il Driver Controlled Central Differential. I veicoli su cui è montato sono a trazione integrale (come il robot di questa tesi) e presentano all'asse anteriore e posteriore due differenziali autobloccanti, il differenziale centrale è invece bloccabile in modo continuo ripartendo la coppia trasmessa all'anteriore rispetto al posteriore dal 50% al 35%. In questo caso si varia la ripartizione di coppia permettendo il riallineamento dell'auto [12].

Parlando sempre di distribuzione di coppia tra l'asse anteriore e posteriore in [13] la coppia applicata agli assi delle ruote dipende dalla distribuzione del peso su ogni asse.

Alcuni tipi di controllo invece, permettono di modificare dei parametri in modo automatico in funzione della curva che sta per essere affrontata. Questo sistema è chiaramente utilizzato in percorsi chiusi e con un numero limitato di curve (potrebbe essere utilizzato nel caso del robot articolato di questa tesi in quanto esso lavora nei vigneti, nei quali è possibile stabilire un percorso da far compiere al robot), poiché per modificare i parametri in funzione del percorso che il robot deve affrontare, bisogna conoscerlo. La posizione all'interno del luogo di lavoro può essere determinata a partire dalla posizione ricavata da un ricevitore GPS. Questi sistemi però presentano grosse limitazioni e possibilità di errata determinazione della posizione con scarsa copertura GPS o se il veicolo è costretto per una qualsiasi ragione a manovre non previste dal controllo [12].

Dato che il compito principale di Agri.Q è quello di monitorare i vigneti e le colture in generale, il rover potrebbe essere soggetto a una varietà di condizioni d'uso.

Le irregolarità del suolo e le pendenze, l'umidità del terreno e la presenza di erba sono solo alcuni esempi dei fattori esterni che possono influenzare il comportamento del robot.

È impossibile prevedere un insieme di parametri sempre valido, tuttavia il modello può ancora essere sfruttato per progettare delle strategie di attuazione [14].

Come riferito precedentemente, l'obiettivo principale di questa Tesi è lo studio dell'effetto del modulo posteriore attivo sulla manovrabilità del robot attraverso la co-simulazione dei software Adams-Simulink e di sperimentare alcune architetture di controllo atte a trovare un compromesso per il miglioramento della manovrabilità del robot e la riduzione dei consumi.

In Adams viene implementato il modello dinamico descritto nel capitolo 1.5 e attraverso Simulink viene implementata la strategia di controllo della trazione del robot.

I dati delle varie simulazioni condotte vengono raccolti in questo capitolo in cui viene verificato l'effetto di un'attuazione posteriore sulla manovrabilità del robot.

Bisogna ricordare che il movimento del robot è controllato tramite la cinematica del modulo frontale.

A differenza dei vari controlli che vengono utilizzati solitamente in ambito automotive, è stato scelto di utilizzare un tipo di controllo semplice ma efficace, in cui viene inviata ai motori del modulo posteriore una certa quantità della somma della coppia esercitata dai motori anteriori del robot, facendo variare il parametro di divisione  $k$  per effettuare prove con diversi contributi di coppia al modulo posteriore, secondo la legge sotto riportata:

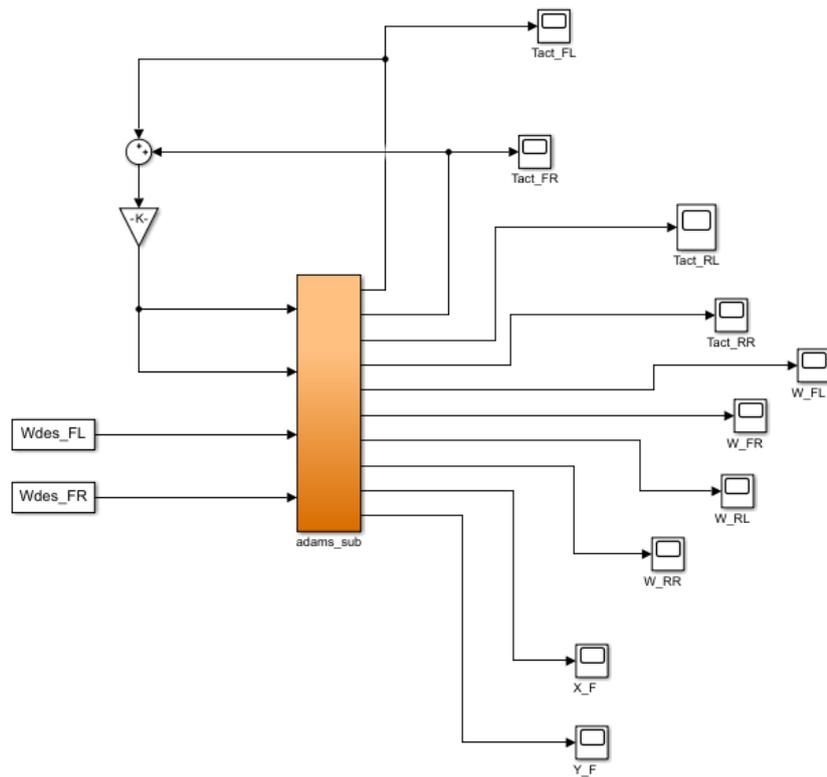
$$T_{M,BR} = T_{M,BL} = \frac{\tau_b}{\tau_f} \left( \frac{1}{k} - 1 \right) (T_{M,FL} + T_{M,FR}) \quad (2.1)$$

Se  $k = 1$  il modulo posteriore non è attivo.

È stato scelto questo tipo di controllo in quanto a causa dei vincoli di progetto, quali il sistema a ruota libera per il modulo posteriore, bisogna inviare la stessa coppia ai motori del modulo posteriore. L'idea iniziale era quella di inviare al modulo posteriore la media della coppia tra il motore destro e sinistro del modulo frontale:  $T_{M,BR} = T_{M,BL} = \frac{\tau_b}{\tau_f} \left( \frac{1}{k} - 1 \right) (T_{M,FL} + T_{M,FR})/2$ .

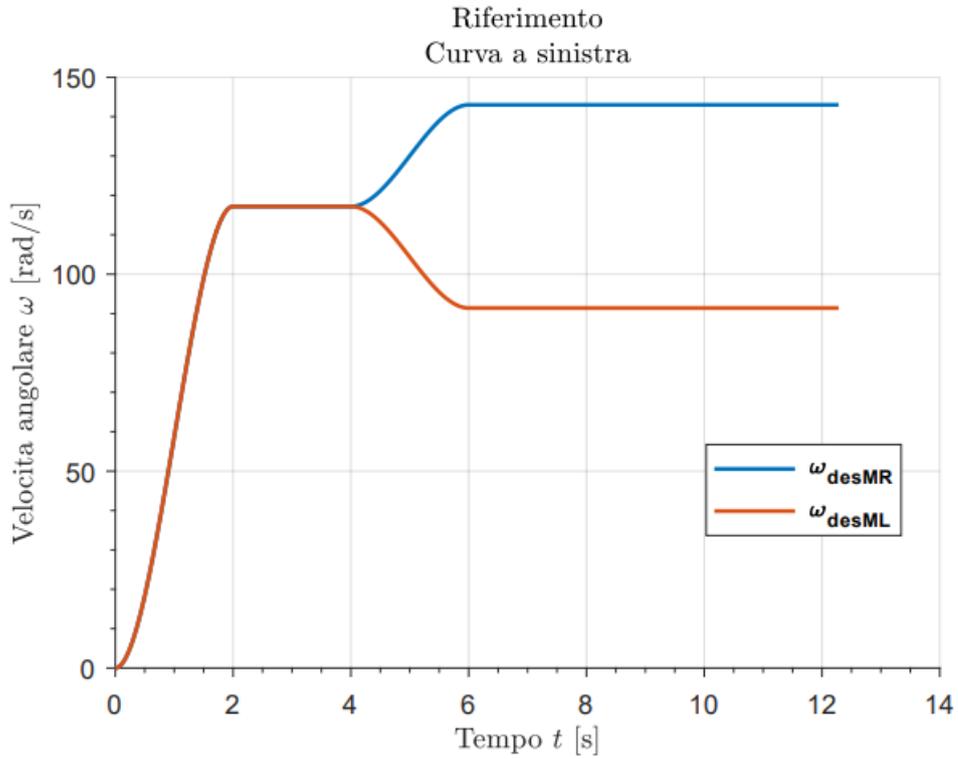
Questo tipo di controllo però non portava grandi migliorie alla manovrabilità del robot, in quanto la coppia del modulo posteriore non era abbastanza elevata da portare variazioni significative rispetto al caso con il modulo posteriore trainato  $k = 1$ , per questo motivo si è optato per la (2.1).

Viene rappresentato il modello utilizzato per la co-simulazione (**Figura 26**):



**Figura 26:** Architettura di controllo applicata per la valutazione dell'effetto dell'azione del modulo posteriore

Come è stato descritto nel capitolo 1.6.1 sul modello della trasmissione, si applica un'attuazione ai due motori del modulo frontale tramite driver cinematici, usando le variabili  $\omega_{des_{F\sim}}$ , contenenti i profili di velocità di riferimento. Nel caso delle varie prove effettuate viene fatta eseguire al robot una fase di accelerazione transitoria con un profilo di velocità cubico, un tratto rettilineo a velocità costante e un percorso circolare (antiorario) di raggio  $R_1$  e velocità costanti.



**Figura 27:** Profilo di velocità utilizzato per le varie prove eseguite. Nel caso rappresentato  $v_1=0.5$  [m/s]  $R_1=2$  m

I profili di velocità indicati in **Figura 27**, vengono ricavato direttamente dalla cinematica del robot, tramite le equazioni ricavate nel capitolo 1.4:

$$v_1 = \frac{r_w}{2} (\omega_{w,FR} + \omega_{w,FL}) \quad (1.4.16)$$

$$\dot{\varphi}_1 = \frac{r_w}{2b_1} (\omega_{w,FR} - \omega_{w,FL}) \quad (1.4.17)$$

$$R_1 = \frac{v_1}{\dot{\varphi}_1} \quad (1.4.18)$$

Le velocità angolari delle ruote vengono moltiplicate per il rapporto di trasmissione  $\tau_F$  in modo tale da dare in input al modello Adams le velocità angolari dei due motori del modulo anteriore.

Conoscendo il raggio che si vuole far percorrere al robot e la velocità longitudinale con la quale si vuole percorrerlo, vengono ricavate le velocità angolari di riferimento.

Poiché il tipo di controllo è un controllo di tipo coppia, essa viene ricavata nel seguente modo all'interno del blocco Adams: viene generata una misura della velocità angolare del motore a portatreno fermo, questa misura della velocità angolare viene imposta tramite driver cinematico alle ruote, dalla quale viene calcolata la coppia alle ruote del modulo frontale. Tramite la coppia e la velocità angolare ricavata viene stimato il verso del flusso della potenza istantanea del motore e infine si applica la reazione risultante da entrambe le ruote di ogni motore del modulo frontale all'albero motore. I contributi dei motori posteriori, invece, vengono calcolati tramite l'equazione (2.1).

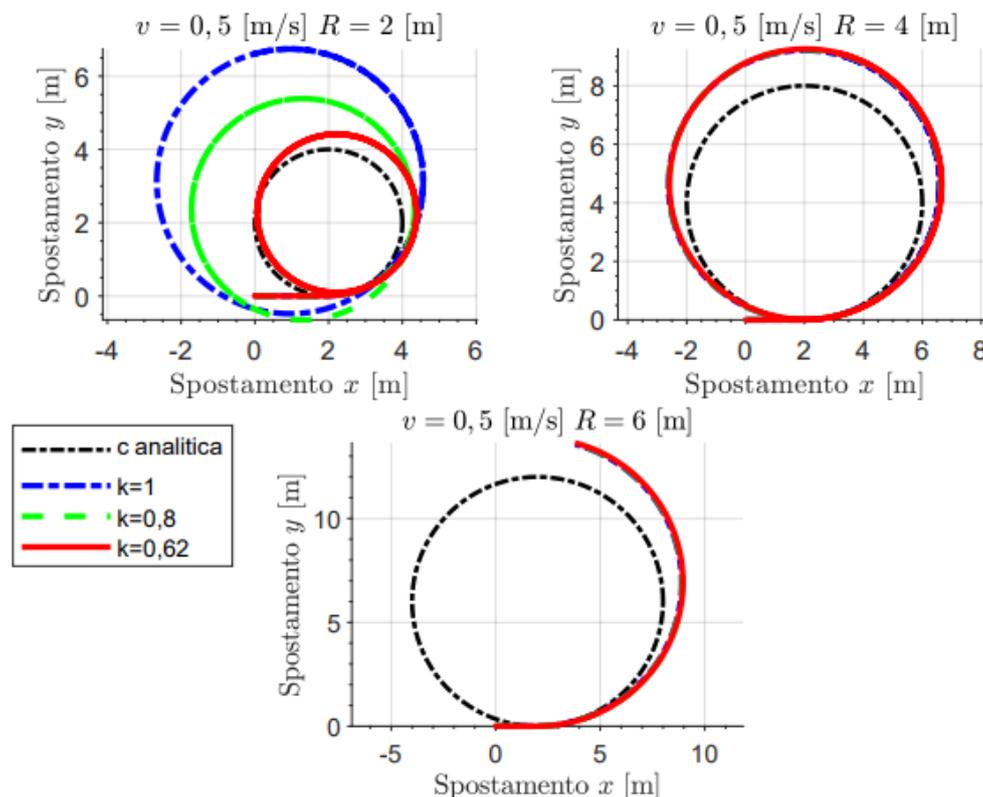
Il modello Adams restituisce in output le seguenti grandezze:

- La velocità angolare a cui effettivamente girano i motori del modulo frontale e del modulo posteriore ( $\omega_{M,FL}, \omega_{M,FR}, \omega_{M,RL}, \omega_{M,RR}$ ).
- Le coppie erogate dai motori del modulo frontale e del modulo posteriore ( $T_{act,FL}, T_{act,FR}, T_{act,RL}, T_{act,RR}$ ).
- La posa del modulo anteriore ( $x_1, y_1, \varphi_1$ ).

## 2.1 Effetto del modulo posteriore attivo

In questo capitolo vengono presentati i risultati ottenuti tramite la co-simulazione, i quali permettono di fare delle considerazioni sull'effetto del modulo posteriore attivo sulla manovrabilità del robot.

Per prima cosa viene effettuato un confronto tra una circonferenza analitica (ideale) e la circonferenza effettivamente percorsa da Agri.Q al variare del parametro di divisione  $k$ , quindi al variare del contributo di coppia fornita al modulo posteriore (**Figura 28**).

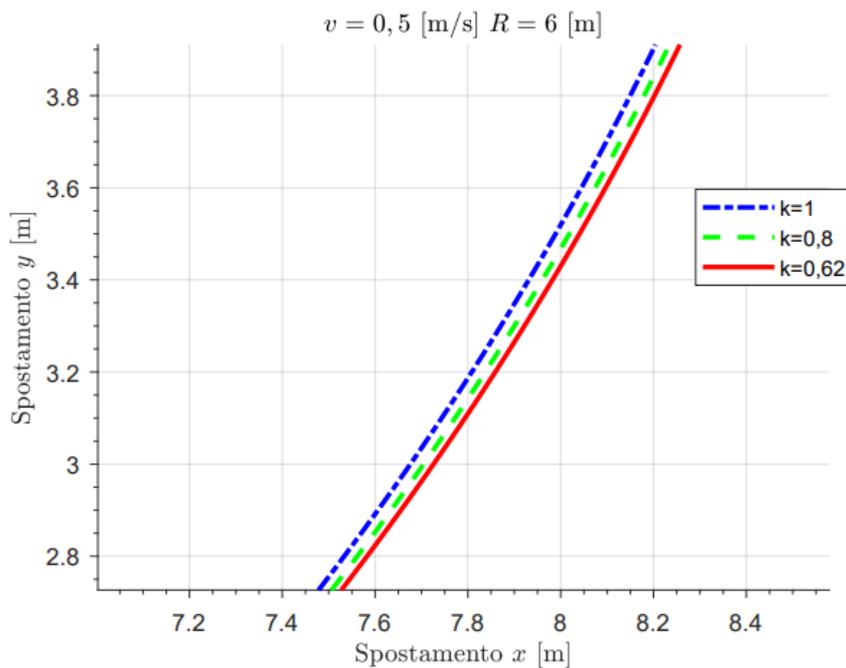


**Figura 28:** Confronto traiettoria Agri.Q  $v=0.5 \text{ m/s}$   $R=2 \text{ m}$  con circonferenza analitica

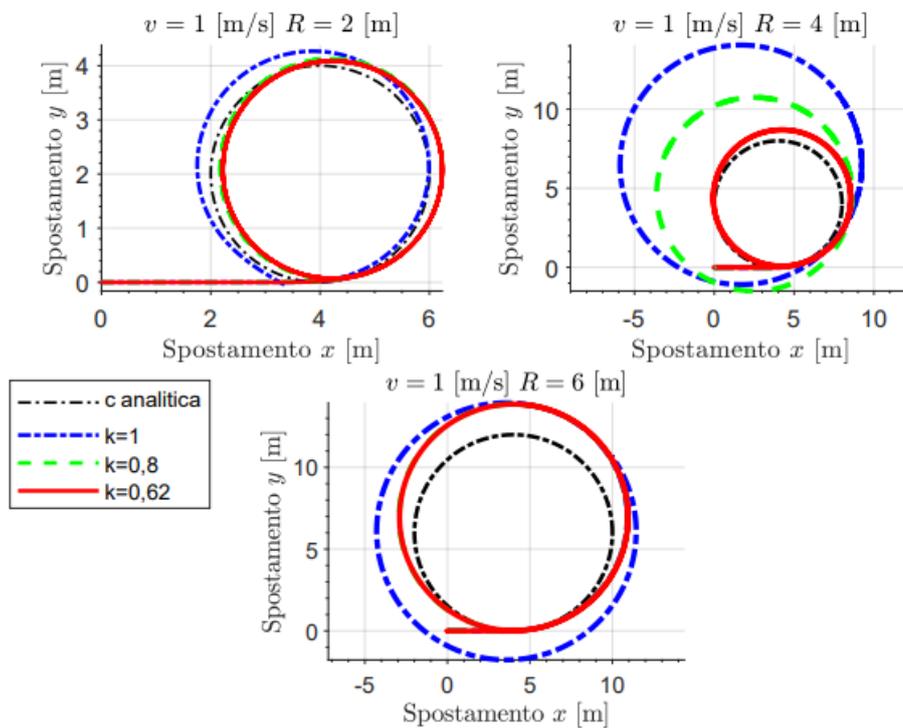
È possibile osservare, già a prima vista che l'effetto del modulo posteriore sulla manovrabilità del robot dipende fortemente dalla velocità e dal raggio di curvatura che si vuole fare percorrere ad Agri.Q; infatti, se si impone al robot di compiere un raggio di  $R_1 = 2 \text{ m}$  a  $v_1 = 0.5 \text{ m/s}$  esso percorrerà:

- Con  $k = 1$  un raggio di 3.61 m
- Con  $k = 0.8$  un raggio di 3.02 m
- Con  $k = 0.62$  un raggio di 2.16 m

affermando che con l'aumento della coppia erogata dal modulo posteriore aumenta la manovrabilità di Agri.q, contrariamente a quanto accade cercando di compiere raggi di curvatura più ampi, per esempio raggi di 4 o 6 m, in cui il contributo del modulo posteriore non determina alcun miglioramento della manovrabilità del robot, ed ogni aumento della coppia erogata dal posteriore provoca un comportamento di Agri.Q sempre più sottosterzante (**Figura 29**).



**Figura 29:** zoom traiettoria  $R=6 \text{ m}$



**Figura 30:** Confronto traiettoria Agri.Q  $v=1$  m/s  $R=2$  m con circonferenza analitica

Osservando il comportamento del robot ad alte velocità (**Figura 30**), il contributo del modulo posteriore comporta un miglioramento della manovrabilità del robot fino a raggi di curvatura di 4 m; infatti, se si impone al robot di percorrere un raggio di 2 m a velocità di 1 m/s esso percorrerà:

- Con  $k = 1$  un raggio di 2.11 m
- Con  $k = 0.8$  un raggio di 2.03 m
- Con  $k = 0.62$  un raggio di 2.01 m

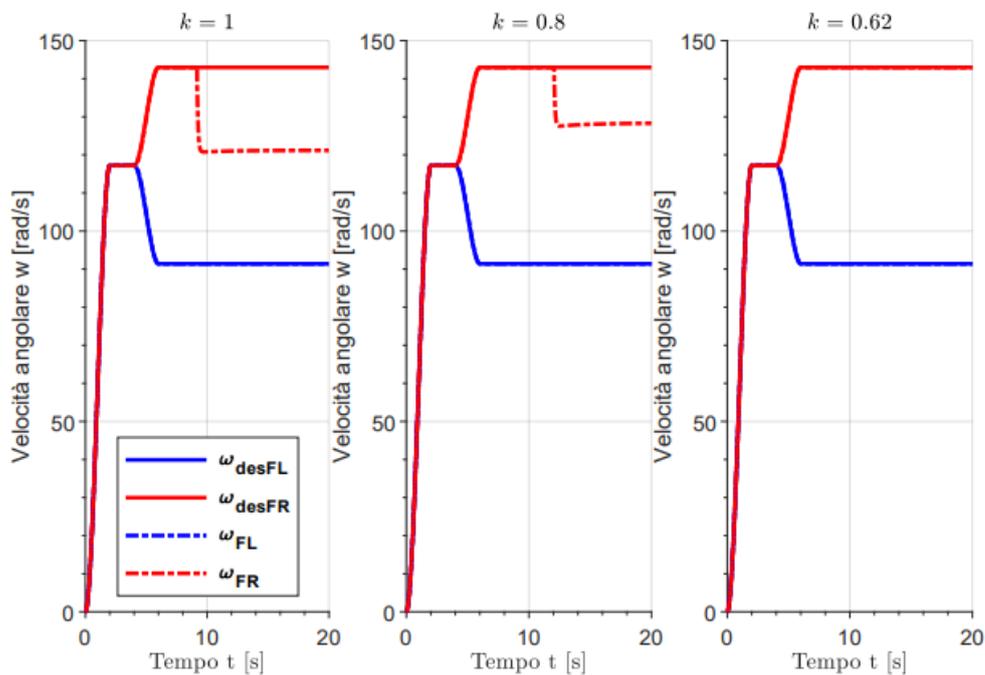
mentre se si impone di percorrere un raggio di 4 m l'effetto del contributo del modulo posteriore è più evidente, infatti esso percorrerà:

- Con  $k = 1$  un raggio di 7.57 m.
- Con  $k = 0.8$  un raggio di 6.12 m.

- Con  $k = 0.62$  un raggio di 4.3 m.

I raggi di curvatura con cui sono state effettuate le simulazioni non sono stati scelti in modo casuale ma sono stati stabiliti in base alla distanza tra i filari dei vigneti, la quale varia dai 2 ai 4 m, come visto nel capitolo 2.

Da questi primi risultati si nota che si registra un'enorme deviazione tra la pianificazione del movimento e la traiettoria effettivamente eseguita dal robot, soprattutto nel caso in cui il modulo posteriore venisse semplicemente trainato ( $k=1$ ). Questo risultato è riconducibile ad almeno due fenomeni evidenti i cui dettagli verranno esplicitati proseguendo con la trattazione. Da un lato, il fenomeno è dovuto alle forze trasversali di contatto che agiscono sulle ruote allontanando il robot da un comportamento puramente oloномico e dall'altro, i motori di pilotaggio sembrano non essere in grado di seguire con precisione la velocità di riferimento. Quest'ultimo fenomeno avviene soprattutto nel caso in cui al rover viene imposto di percorrere un raggio di 2 m a velocità di 0.5 m/s e un raggio di 4 m a velocità di 1 m/s. In tutti gli altri casi, come in **Figura 33**, ciò non accade.



**Figura 31:** Confronto tra la velocità angolare di riferimento  $w_{des}$  e quella effettiva, nel caso  $v = 0.5$  m/s  $R = 2$  m

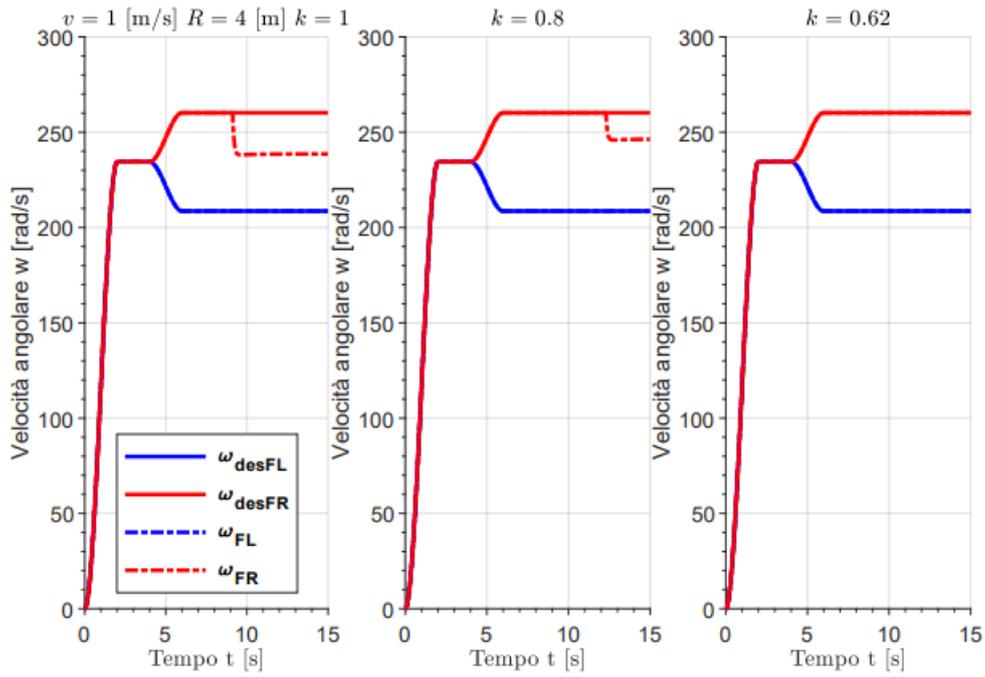


Figura 32: Confronto tra la velocità angolare di riferimento  $\omega_{des}$  e quella effettiva, nel caso  $v = 1$  m/s  $R = 4$  m

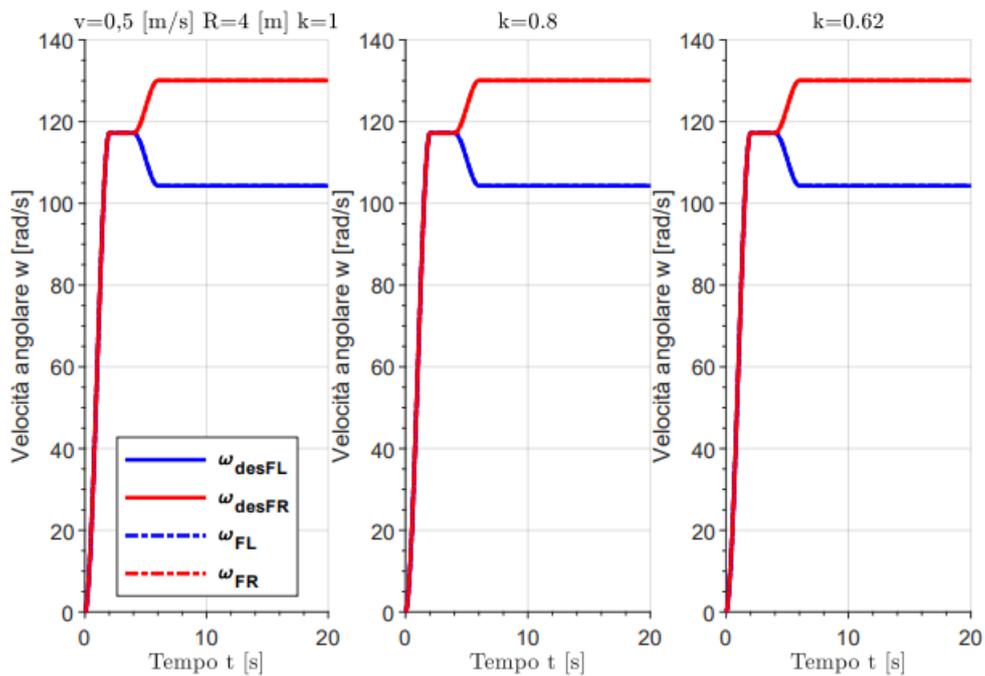
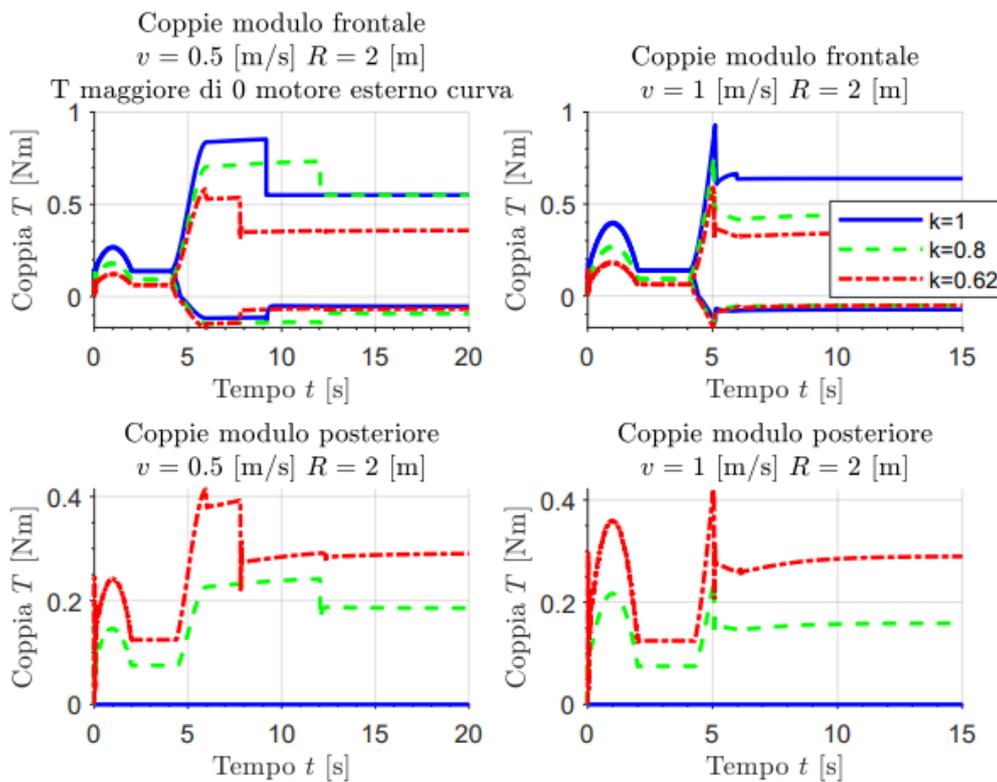


Figura 33: Confronto tra la velocità angolare di riferimento  $\omega_{des}$  e quella effettiva, nel caso  $v = 0.5$  m/s  $R = 4$  m

Osservando infatti le **figure 31 e 32**, si nota subito che all'aumentare del contributo del modulo posteriore, la differenza tra la velocità angolare effettiva dei motori del modulo frontale e la velocità angolare di riferimento diminuisce fino a tendere 0, comportandone il miglioramento della traiettoria di Agri.Q vista precedentemente.

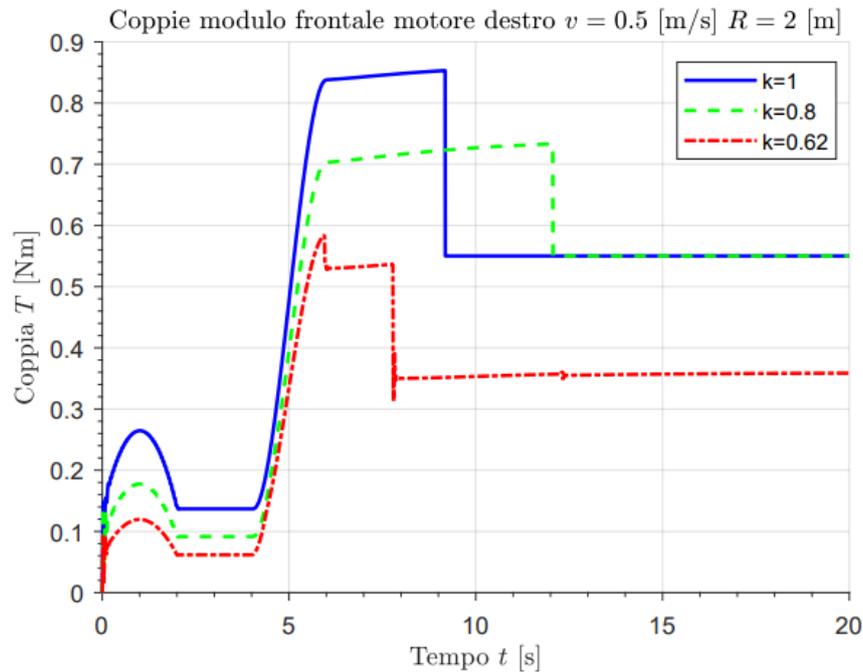
La causa di questa differenza tra le velocità angolari effettive dei motori e quelle di riferimento, può essere attribuita alla saturazione dei motori del modulo frontale, infatti, osservando le coppie erogate dai motori elettrici di Agri.Q (**Figura 33**) è possibile notarne l'effetto e correlarlo alla differenza di velocità discusso.



**Figura 34:** Coppie motori  $R=2$  m

Dalla figura sopra rappresentata (**Figura 34**), in cui vengono rappresentate due condizioni ( $v = 0.5$  m/s e  $v = 1$  m/s) con diversi contributi del modulo posteriore, è possibile osservare effettivamente che i motori del lato destro saturano in base al contributo di coppia che si decide di mandare al modulo posteriore. La saturazione dei motori si verifica solo sul lato destro in quanto si percorre una curva in senso antiorario e le ruote più caricate risultano sempre quelle sul lato esterno della curva.

Studiando quanto accade nel caso di velocità  $v = 0.5 \text{ m/s}$  e  $R=2 \text{ m}$  (**Figura 35**), è possibile analizzare in dettaglio l'effetto del modulo posteriore sulla coppia erogata dai motori del modulo frontale, ricordando che la coppia nominale dei motori è di  $0.55 \text{ Nm}$  e che il tempo di saturazione è di  $2.2 \text{ s}$ .



**Figura 35:** Coppia dettaglio motore destro

Osservando, la **figura 36**, è possibile notare subito quanto detto precedentemente, ossia che il motore è soggetto a saturazione. La coppia erogata dal motore risulta maggiore della coppia nominale.

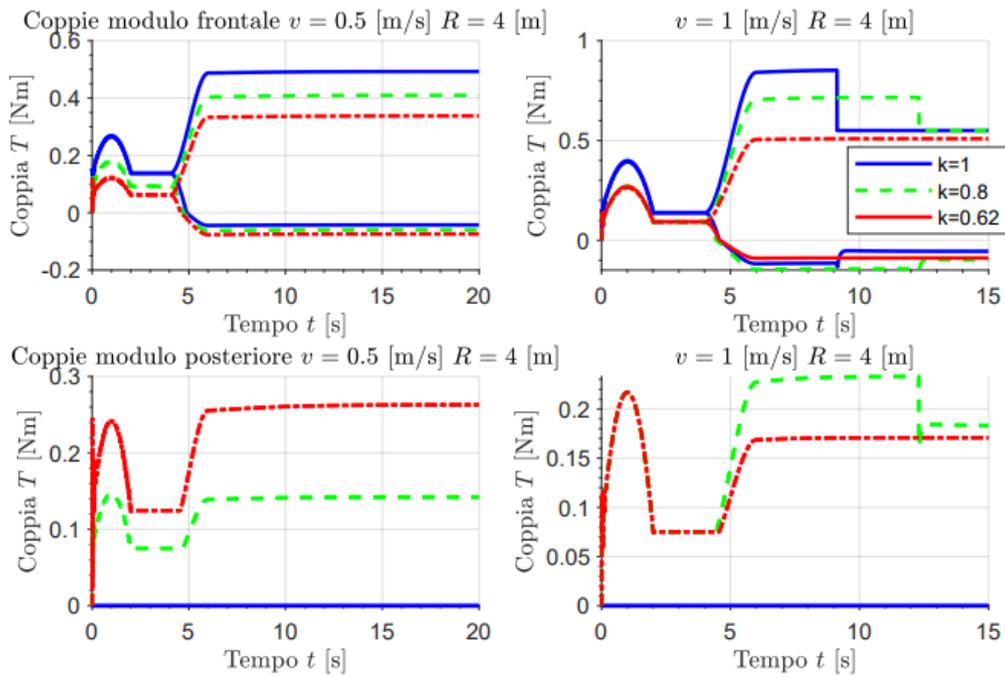
Il contributo del modulo posteriore permette un alleggerimento del carico dei motori anteriori aumentando il tempo per cui è possibile superare la coppia nominale (caso  $k=0.8$ ) o, in caso di contributo importante del modulo posteriore, non permettendo la saturazione del motore ( $k=0.62$ ).

Osservando infatti il caso con  $k = 0.62$  è possibile notare che il motore destro del modulo anteriore non supera la coppia nominale e quindi non arriva a saturazione, i crolli di coppia non vengono causati dalla saturazione del motore, ma dallo slittamento delle ruote. Analizzando le forze di contatto degli pneumatici con il suolo, delle quali verrà discusso successivamente, è possibile notare che il crollo più evidente a  $t = 7.78 \text{ s}$  avviene non appena la ruota destra posteriore del modulo frontale inizia a slittare.

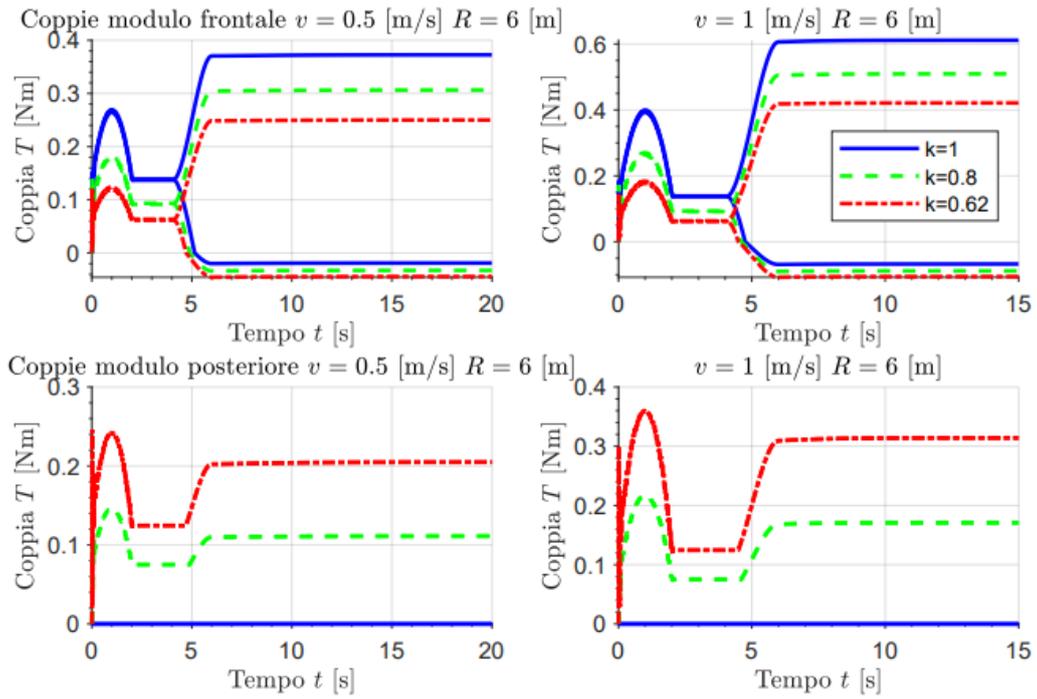
Il  $k$  limite per cui non si ha in alcun caso la saturazione di alcun motore è di  $0.76$ . Non è conveniente però dare così tanta coppia al posteriore perché osservando la traiettoria di Agri.Q il miglioramento

della manovrabilità del robot è poco evidente, contribuendo solo ad un aumento della potenza assorbita dai motori.

Compatibilmente con quanto osservato dall'analisi della traiettoria e delle velocità angolari dei motori, quando si cerca di far compiere al robot un raggio maggiore o uguale a 4 m, a velocità di 0.5 m/s, la coppia del motore esterno durante la fase di curvatura non sarà eccessivamente elevata e non si avrà alcun effetto di saturazione dei motori (**Figura 36 - Figura 37**), stesso risultato per quanto riguarda raggi di curvatura maggiori di 4 m a velocità di 1 m/s. Nonostante ciò, il robot non riesce a percorrere la traiettoria richiesta in quanto, come dichiarato precedentemente, le forze trasversali di contatto che agiscono sulle ruote allontanano il robot da un comportamento puramente olonomico.



**Figura 36:** Coppie motori  $R = 4$  m



**Figura 37:** Coppie motori  $R = 6$  m

### 2.1.1 Forze di contatto al variare del parametro $k$

È stato ribadito più volte, analizzando la traiettoria di Agri.Q, che si registra un'enorme deviazione tra la pianificazione del movimento e la traiettoria effettivamente eseguita dal robot, soprattutto nel caso in cui il modulo posteriore venisse semplicemente trainato ( $k=1$ ), a causa delle forze trasversali di contatto che agiscono sulle ruote del rover. Risulta perciò di fondamentale importanza osservare quanto accade alle forze di contatto al variare del contributo del modulo posteriore.

In questo sotto capitolo infatti, vengono rappresentate le forze di contatto in stazionario longitudinali e laterali applicate alle singole ruote del modulo frontale e al giunto di collegamento tra il modulo anteriore e posteriore al variare del parametro di divisione  $k$  dell'equazione 3.1, per osservarne l'effetto sulla manovrabilità del robot. I dati a cui si fa riferimento vengono ricavati con diverse simulazioni in cui al rover viene fatta compiere una traiettoria curva in senso antiorario a differenti raggi di curvatura e a differenti velocità longitudinali.

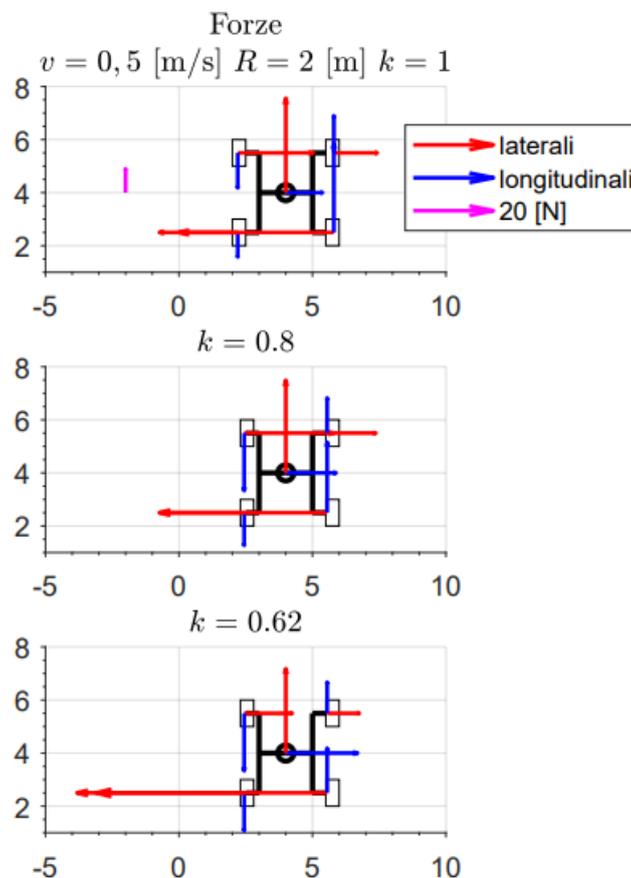
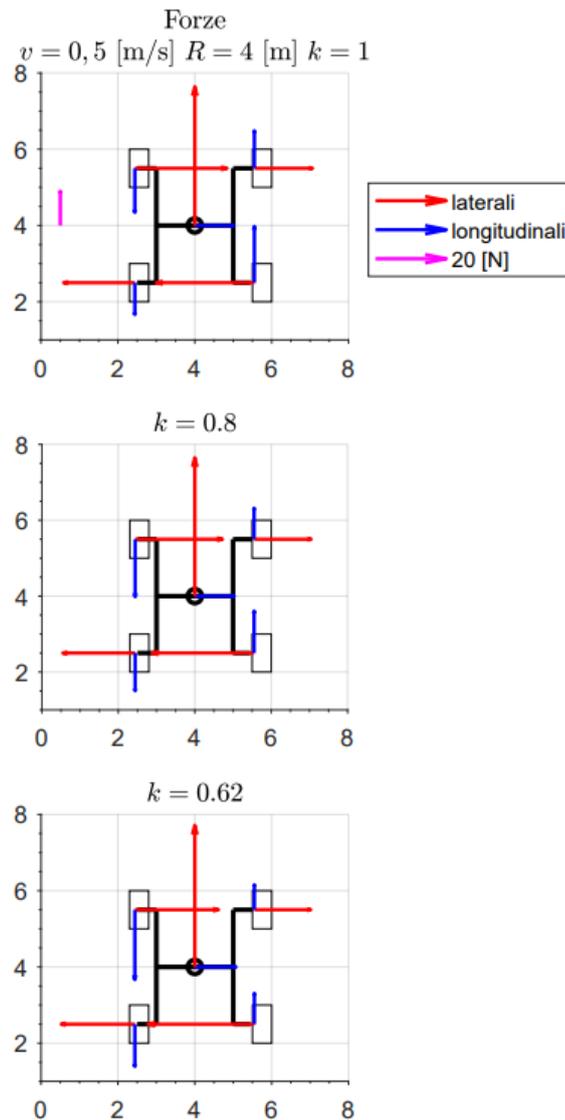


Figura 38: Forze di contatto modulo frontale  $R = 2$  m  $v = 0.5$  m/s

Osservando i primi risultati in **figura 38** notiamo che più il contributo di coppia del modulo posteriore è importante (diminuendo il parametro di divisione  $k$  dell'equazione 3.1) e più aumenta la forza laterale delle ruote posteriori fino al raggiungimento del limite di aderenza con saturazione. Le forze delle ruote anteriori rimangono invece in campo lineare. Questa differenza tra il comportamento delle forze delle ruote anteriori e posteriori provoca al veicolo in curva un comportamento sovrasterzante, permettendo al robot di compiere raggi di curvatura più stretti rispetto al caso in cui non venga attivato il modulo posteriore ( $k=1$ ).

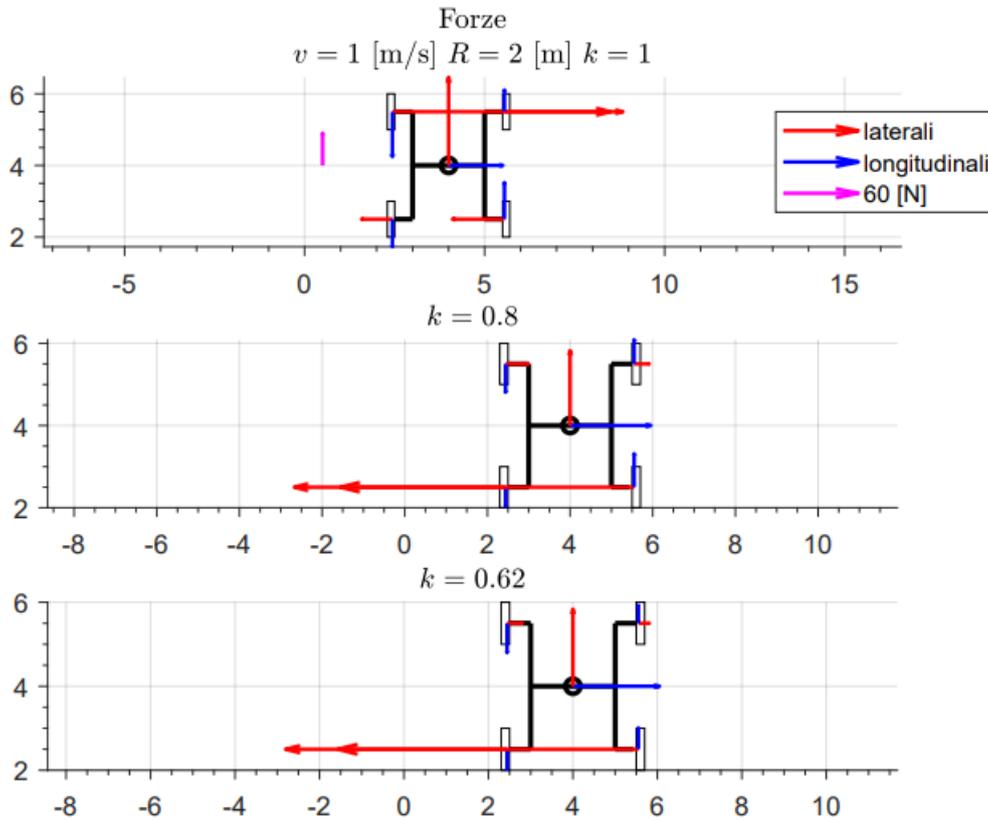
Questo stesso comportamento non viene osservato nel caso in cui viene imposto al robot di percorrere raggi di curvatura più ampi (**Figura 39**), in quanto in questo caso il contributo del modulo posteriore non è sufficiente a determinare un cambiamento sostanziale alle forze di contatto, mantenendo il comportamento naturale del robot sottosterzante e allontanandolo dal suo comportamento puramente oloномico. Quanto appena descritto dipende principalmente dal tipo di strategia di controllo con cui vengono eseguite le prove, infatti, con questa strategia il contributo del modulo posteriore è più tangibile quanto più il carico dei motori del modulo frontale è gravoso (vedi coppie **Figura 34-35**).

Per informazioni più dettagliate sulle forze di contatto e il loro contributo sul comportamento veicolo vedi Velardocchia, 2019.



**Figura 39:** Forze di contatto modulo frontale  $R = 4 \text{ m}$   $v = 0.5 \text{ m/s}$

La **figura 39** dice molto su quanto osservato precedentemente nelle rappresentazioni delle traiettorie (**Figura 28-30**) nel caso di raggi di curvatura più ampi sul comportamento sempre più sottosterzante del robot all'aumentare del contributo del modulo posteriore, infatti, osservando le forze sul giunto e proiettando la risultante, si nota come essa si sposta sempre più longitudinalmente al diminuire di  $k$ , portando il rover ad una condizione più sottosterzante.



**Figura 40:** Forze di contatto modulo frontale  $R = 2$  m  $v = 1$  m/s

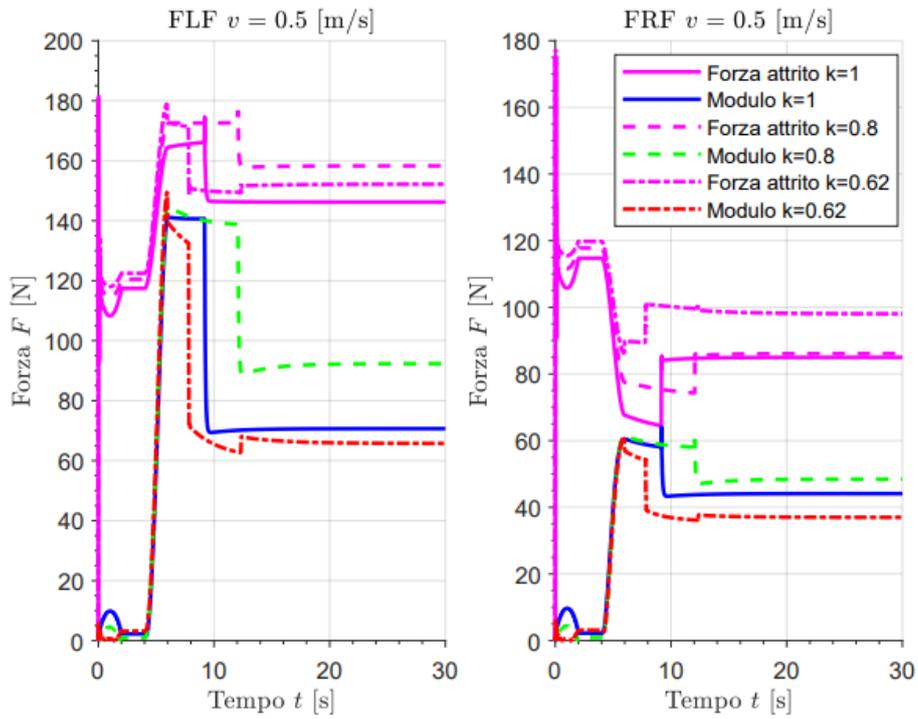
Prendendo in considerazione la **Figura 40**, invece viene rappresentato l'effetto del modulo posteriore nel caso in cui il robot compia sempre un raggio di curvatura di 2 m, ma a velocità di 1 m/s. Si osserva nello specifico in cui gli unici motori attivi siano quelli del modulo frontale ( $k=1$ ) che le forze laterali delle ruote frontali sono talmente elevate da permettere al robot di percorrere un raggio di curvatura di quasi 2 m senza l'effetto del modulo posteriore, infatti osservando la figura 43 slittano anch'esse. L'effetto che si ottiene diminuendo il valore di  $k$  è quello di far diminuire queste forze laterali delle ruote anteriori ed aumentare quelle delle ruote posteriori, mantenendo l'effetto slittante che permette al robot di compiere questo determinato raggio di curvatura.

Per comprendere meglio come l'effetto del modulo posteriore determina un cambiamento all'azione delle forze di contatto permettendo al robot di compiere traiettorie vicine al movimento pianificato, è utile analizzare lo slittamento delle ruote, confrontando il modulo delle forze (longitudinale e trasversale) con la forza di attrito  $\mu_s F_n$  (**Figura 41-42-43-44-45-46-47-48**).

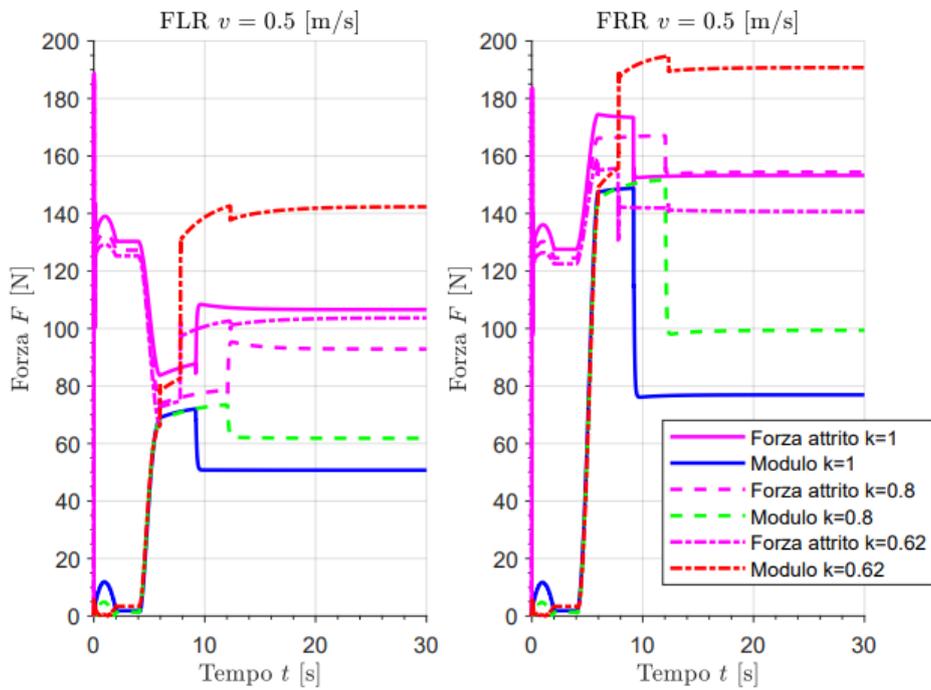
Analizzando il caso in cui al robot viene imposto di percorrere una curva con raggio di 2 metri ad una velocità di 0.5 m/s (**Figura 41-42-43-44**), il comportamento delle forze di contatto delle ruote davanti del modulo frontale (FLF e FRF) è ragionevole (**Figura 41**). Queste due ruote non presentano alcun slittamento, ciò è dovuto al fatto che la curva a questa velocità risulta meno "impegnativa", naturalmente rispetto al caso in cui lo stesso raggio di curvatura venisse percorso con una velocità del robot di 1 m/s (**Figura 45**). L'effetto dell'azionamento del modulo posteriore si nota solo per un valore di  $k=0.62$ , infatti, come detto precedentemente il modulo posteriore genera più contributo se l'anteriore è maggiormente sotto sforzo; quindi, aumentando il raggio di curvatura che si vuole far percorrere al robot si riduce il suo contributo.

Le ruote del modulo posteriore destra e sinistra anteriori (RLF e RRF) (**Figura 43**), senza il contributo del modulo posteriore ( $k=1$ ), slittano. Lo slittamento è dovuto al fatto che le ruote vengono in questo caso semplicemente trascinate dal modulo anteriore, mentre per via del bilanciere, le ruote posteriori del rimorchio (RLR e RRR) si sollevano e dai grafici risulta che esse non slittano (**Figura 44**).

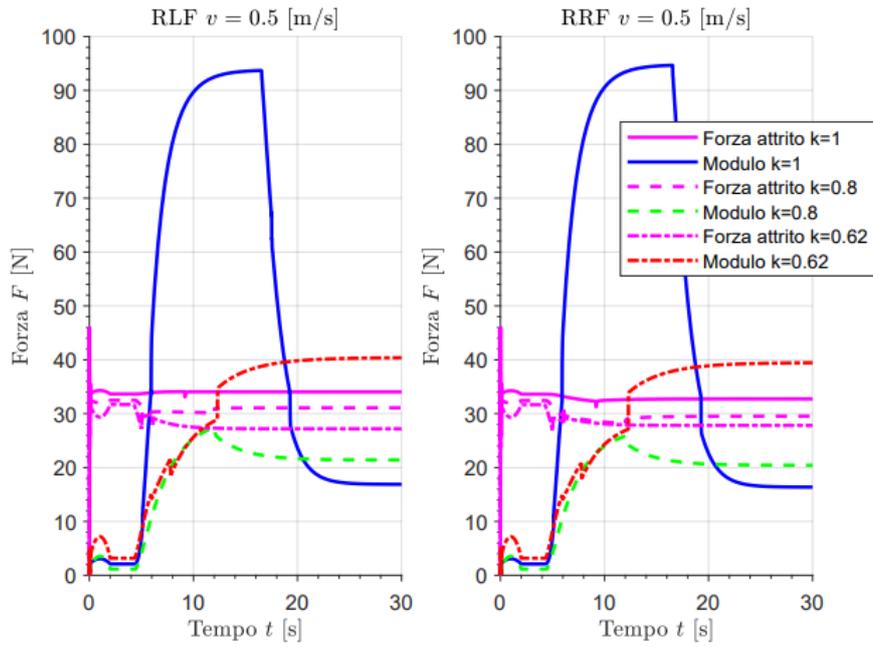
Ciò che accade attivando il modulo posteriore è che la forza scambiata tra il modulo anteriore e il posteriore fa in modo tale che aumenti la forza laterale delle ruote posteriori del modulo frontale, mentre si riducono le forze laterali delle ruote frontali del modulo posteriore, ciò è dovuto al fatto che per come è strutturato il robot le forze laterali anteriori e posteriori hanno sempre verso opposto generando la coppia che solitamente rende il veicolo sottosterzante.



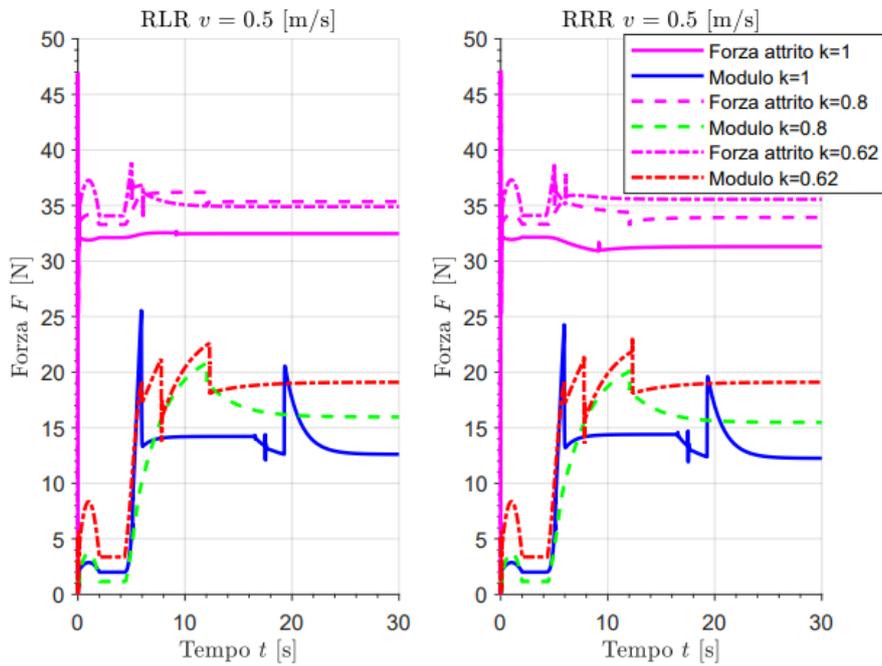
**Figura 41:** Slittamento ruote anteriori del modulo frontale  $R = 2$  m  $v = 0.5$  m/s



**Figura 42:** Slittamento ruote posteriori del modulo frontale  $R = 2$  m  $v = 0.5$  m/s



**Figura 43:** Slittamento ruote anteriori del modulo posteriore  $R = 2\text{ m}$   $v = 0.5\text{ m/s}$



**Figura 44:** Slittamento ruote posteriori del modulo posteriore  $R = 2\text{ m}$   $v = 0.5\text{ m/s}$

Osservando invece il caso in cui viene imposto al robot di compiere la stessa curva ma a velocità di 1 m/s (**Figura 45-46-47-48**), si può notare che la ruota frontale sinistra, del modulo anteriore (FLF) con  $k=1$  (solo il modulo anteriore attivo) presenta un enorme slittamento, da circa 5s (inizio curva) a 18s (durante la fase di curvatura). La forza laterale, infatti, come osservato in **figura 45**, è molto elevata. Questo risultato, per quanto possa sembrare assurdo, risulta ragionevole, in quanto essa può essere considerata come la condizione peggiore in quanto si impone al rover di percorrere una curva stretta alla sua massima velocità longitudinale. A 18 secondi della simulazione avviene il crollo del modulo della forza di contatto (anche per quanto riguarda la ruota FRF), infatti in questo punto si raggiunge e si supera il limite di saturazione del modello di contatto, di cui si è parlato nel capitolo 1.5.1.

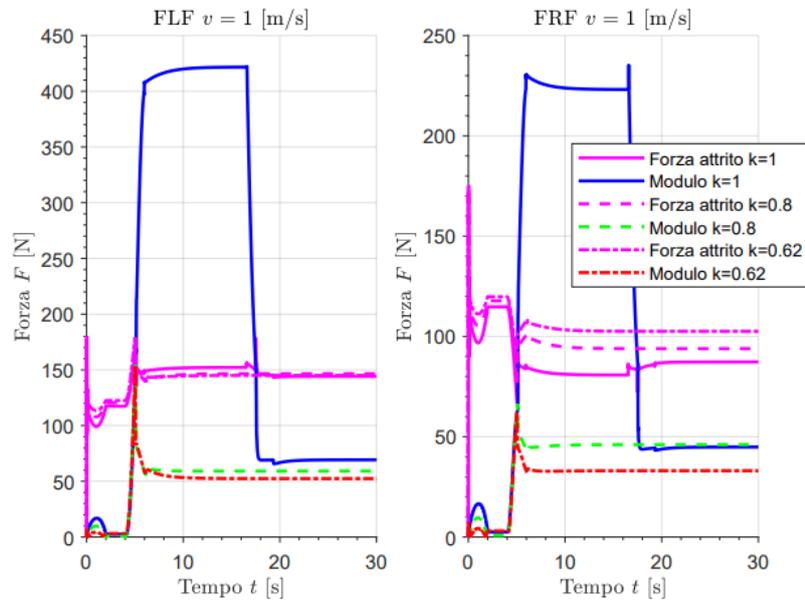
La forza laterale della ruota FLR, come abbiamo notato in **Figura 46**, presenta un verso discorde alla ruota FLF e con  $k=1$  essa non slitta, in quanto le ruote anteriori del modulo frontale (FLF-FRF) presentano forze tali da dominare completamente la dinamica del veicolo. Per gli altri valori di  $k$  invece, le ruote slittano, questo è dovuto al fatto che il contributo del modulo posteriore (come detto anche nel caso  $v = 0.5$  m/s) è discorde con il loro comportamento.

Le ruote RLF e RRF con  $k=1$  slittano (**Figura 47**). Lo slittamento, come nel caso precedente, è dovuto al fatto che in questo caso le ruote del modulo posteriore vengono semplicemente trascinate.

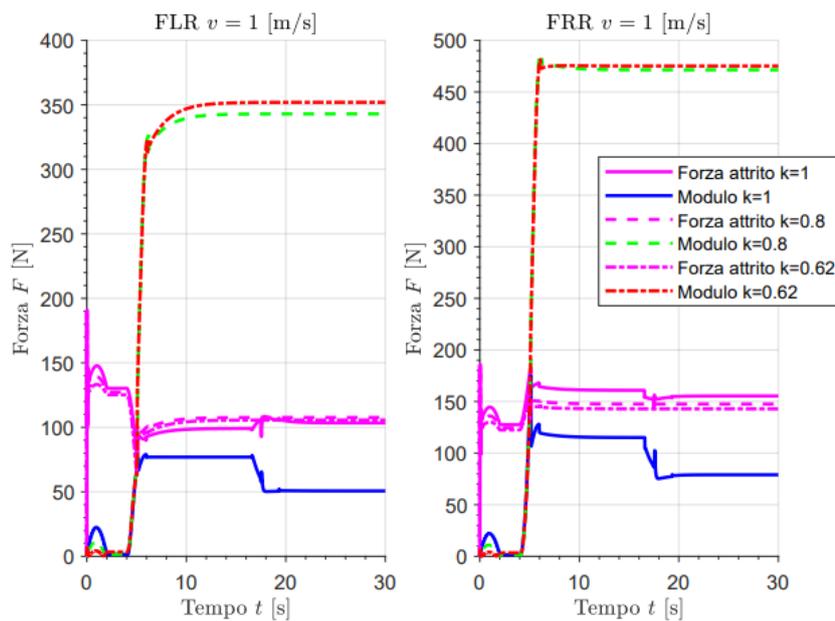
Con  $k$  diverso da 1 però, le ruote continuano a slittare in quanto la distribuzione di carico del robot risulta molto sfavorevole per il modulo posteriore; infatti, nel modello utilizzato in Adams la distribuzione del carico risulta essere: 75%-25% (75% della massa scaricata all'anteriore e il resto al posteriore), contrariamente con quanto è stato valutato recentemente. Misurando l'effettiva distribuzione delle masse del robot reale, si ottiene una distribuzione del carico di circa 60%-40%, ed una massa totale di 112kg. Con questa distribuzione il posteriore non dovrebbe slittare. In questo modo però, è possibile considerare una condizione particolare di lavoro del robot, ossia quella in cui il posteriore spinge in modo inefficiente in quanto non può scaricare a terra tutta la forza necessaria. È possibile notare che per quanto riguarda le forze applicate alle ruote FLF e FRF, attivando il modulo posteriore, esso dia un contributo tale da non permettere lo slittamento di queste due ruote. Per le ruote posteriori del modulo posteriore si ottiene lo stesso risultato del caso con velocità longitudinale di 0.5 m/s (**Figura 48**).

In conclusione, da tutti i dati fino ad ora ricavati è possibile affermare che, per aumentare la manovrabilità di Agri.Q bisogna portare le forze laterali delle ruote al limite di saturazione, facendole slittare; quindi, bisogna far affrontare al robot le curve in modo "aggressivo" (drifting),

attraverso l'azionamento del modulo posteriore. È importante notare che, un limite del modello di attuazione fino ad ora applicato, è dovuto al fatto che le forze si generano istantaneamente al variare del parametro  $k$  e a causa di questo le variazioni di forza risultano molto repentine, quasi impulsive.



**Figura 45:** Slittamento ruote anteriori modulo frontale  $R = 2\text{ m}$   $v = 1\text{ m/s}$



**Figura 46:** Slittamento ruote posteriori del modulo frontale  $R = 2\text{ m}$   $v = 1\text{ m/s}$

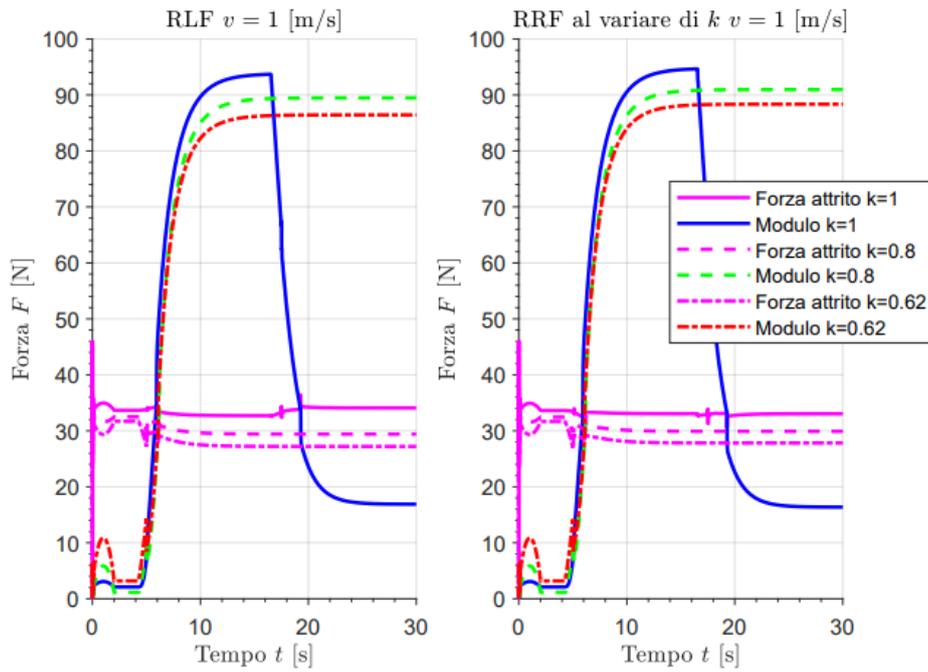


Figura 47: Slittamento ruote anteriori del modulo posteriore  $R = 2$  m  $v = 1$  m/s

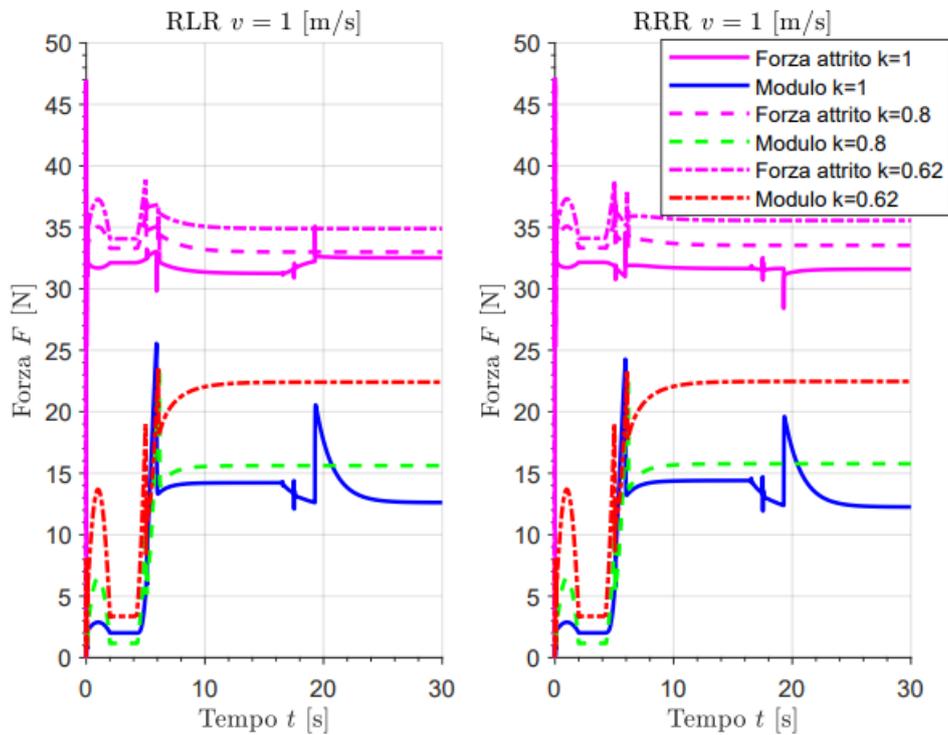


Figura 48: Slittamento ruote anteriori del modulo posteriore  $R = 2$  m  $v = 1$  m/s

## 2.2 Potenza Assorbita

La potenza assorbita dai motori del robot è di fondamentale importanza per poter trovare un'architettura di controllo atta a ridurre i consumi e migliorare l'efficienza del robot. Per questo motivo vengono riportate nelle tabelle sottostanti la potenza totale assorbita dai motori durante una simulazione in cui viene fatto percorrere al robot una fase di accelerazione transitoria, un tratto rettilineo a velocità costante e un percorso circolare di raggio  $R$  e velocità costante al variare del contributo del modulo posteriore.

**Tabella 6:** Potenza totale assorbita dai motori al variare del raggio di curvatura a velocità del robot  $v = 0.5$  m/s

	$v=0,5$ m/s								
	R=2 m			R=4 m			R=6 m		
	k=1	k=0,8	k=0,62	k=1	k=0,8	k=0,62	k=1	k=0,8	k=0,62
<b>Potenza totale media [W]</b>	72,70	99,16	85,16	58,25	66,41	73,80	10,1	24,06	36,30

**Tabella 7:** Potenza totale assorbita dai motori al variare del raggio di curvatura a velocità del robot  $v = 1$  m/s

	$v=1$ m/s								
	R=2 m			R=4 m			R=6 m		
	k=1	k=0,8	k=0,62	k=1	k=0,8	k=0,62	k=1	k=0,8	k=0,62
<b>Potenza totale media [W]</b>	156,95	141,61	144,57	143,9	194,3	155,1	39,81	78,31	111,4

Naturalmente, nel caso in cui si effettuino manovre a velocità più bassa ( $v=0.5$  m/s), la potenza totale media assorbita dai motori è minore nel caso in cui venga attivato solo il modulo anteriore, mentre è di fondamentale importanza notare che con un  $k=0.62$  si riesce ad assorbire meno potenza rispetto al caso con  $k=0.8$  perché esso è, come visto dai grafici delle traiettorie, che con un  $k=0.62$  si riesce a migliorare la manovrabilità del robot. Nel caso invece in cui si effettuano manovre a  $v = 1$  m/s, la

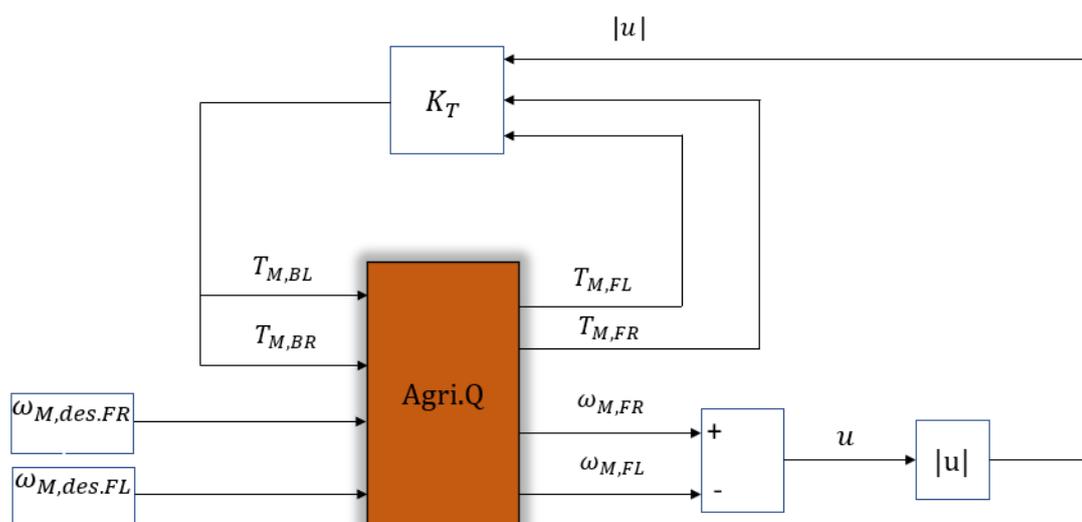
potenza assorbita minima con il solo modulo anteriore attivo si ha solo per raggi di curvatura maggiori di 2 m, questo è dovuto al fatto che per raggi di curvatura di 2 m la coppia erogata dai motori è molto elevata; infatti, in questo caso il valore di  $k$  per cui si ha la minore potenza assorbita è il caso con  $k=0.8$ . Le varie considerazioni di questo capitolo: potenza assorbita ed effetto del modulo posteriore sulla manovrabilità del robot hanno condotto nel considerare un tipo di architettura di controllo di tipo adattativo per l'azionamento del modulo posteriore, la quale verrà presentata nel capitolo successivo.

### 3. Sistema di controllo

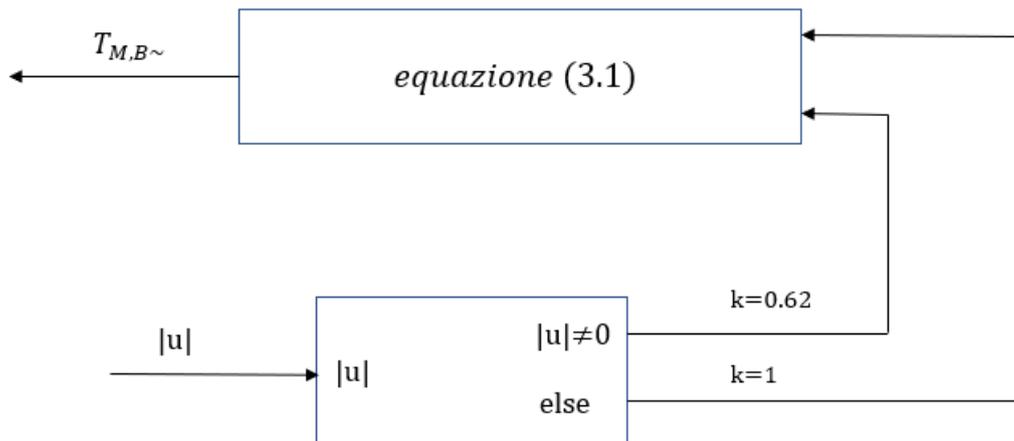
Come è noto in scienza dell'automazione, il controllo automatico di un dato sistema dinamico (ad esempio un motore, un impianto industriale o una funzione biologica come il battito cardiaco) si prefigge di modificare il comportamento del sistema da controllare (ovvero delle sue "uscite") attraverso la manipolazione di opportune grandezze d'ingresso [15].

Un sistema di controllo automatico è un sistema di controllo che si autoregola, senza la necessità di intervento umano, esso può funzionare essenzialmente in due modi: come controllo ad anello aperto o come controllo in retroazione. Il controllo ad anello aperto (o in avanti o predittivo o feedforward) si basa su una elaborazione degli ingressi eseguita senza conoscere il valore dell'uscita del sistema controllato, essendo note alcune proprietà del sistema da controllare. Il controllo ad anello chiuso (o retro-azionato o all'indietro o feedback) riporta all'ingresso del processo che si vuole controllare o rendere stabile una funzione dell'uscita che va sommata algebricamente al segnale già presente in ingresso [15].

Come espresso nel capitolo precedente, le varie considerazioni effettuate tramite le varie simulazioni condotte hanno condotto nello stabilire una serie di strategie di controllo ad anello chiuso di tipo adattativo per l'azionamento del modulo posteriore, in cui uno schema di una delle varie strategie viene rappresentato nell'immagine sottostante (**Figura 49-50**).



**Figura 49:** Sistema di controllo Agri.Q



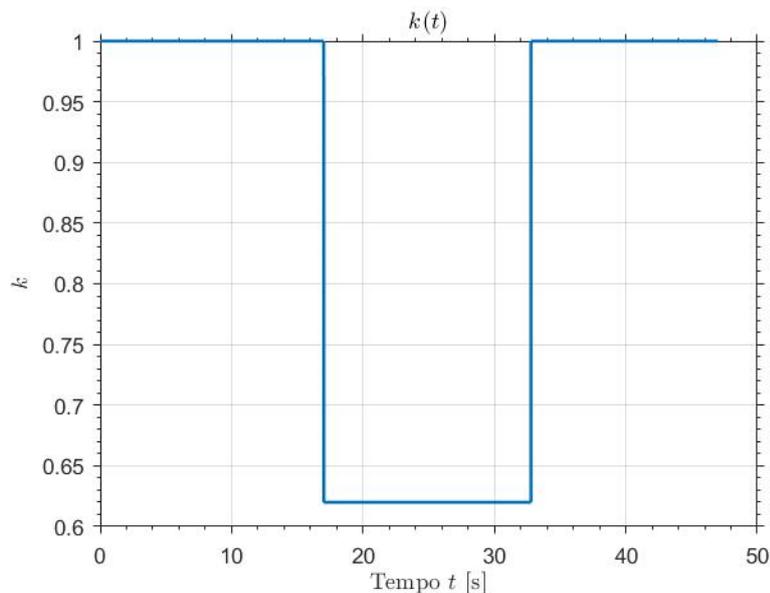
**Figura 50:** Blocco  $K_t$

Questo tipo di controllo permette un'attivazione del modulo posteriore soltanto quando il rover percorre traiettorie curve, infatti, osservando lo schema della **figura 49**, viene misurata la velocità angolare dei motori tramite un sensore di velocità angolare (encoder) e ne viene calcolata la differenza ( $u = |\omega_{M,FL} - \omega_{M,FR}|$ ), in quanto, come ribadito più volte, il robot è un robot a sterzata differenziale, quindi durante la fase di curvatura le velocità angolari delle ruote del lato destro e sinistro sono differenti, mentre durante la guida in rettilineo sono le stesse (**Figura 33**).

Calcolata la differenza tra le velocità angolari dei due motori, se essa è uguale a zero  $u = 0$ , il valore del parametro di divisione  $k$  dell'equazione 2.1 ( $T_{M,B\sim} = \frac{\tau_b}{\tau_f} (\frac{1}{k} - 1) (T_{M,FL} + T_{M,FR})$ ) che, retro-aziona la coppia ai motori del modulo posteriore è uguale ad 1. In questo modo quando il rover esegue manovre in rettilineo il modulo posteriore viene semplicemente trascinato in quanto la coppia erogata dai motori del posteriore è nulla.

Se  $u \neq 0$ , il valore di  $k$  viene fissato a 0.62, in quanto come si è visto dal confronto delle traiettorie con la circonferenza analitica, questo contributo di coppia al modulo posteriore permette una migliore manovrabilità del robot. Questo tipo di strategia di controllo oltre a migliorare la manovrabilità, riduce il consumo di potenza assorbita rispetto al caso in cui il modulo posteriore restasse attivo durante tutto il tempo di lavoro.

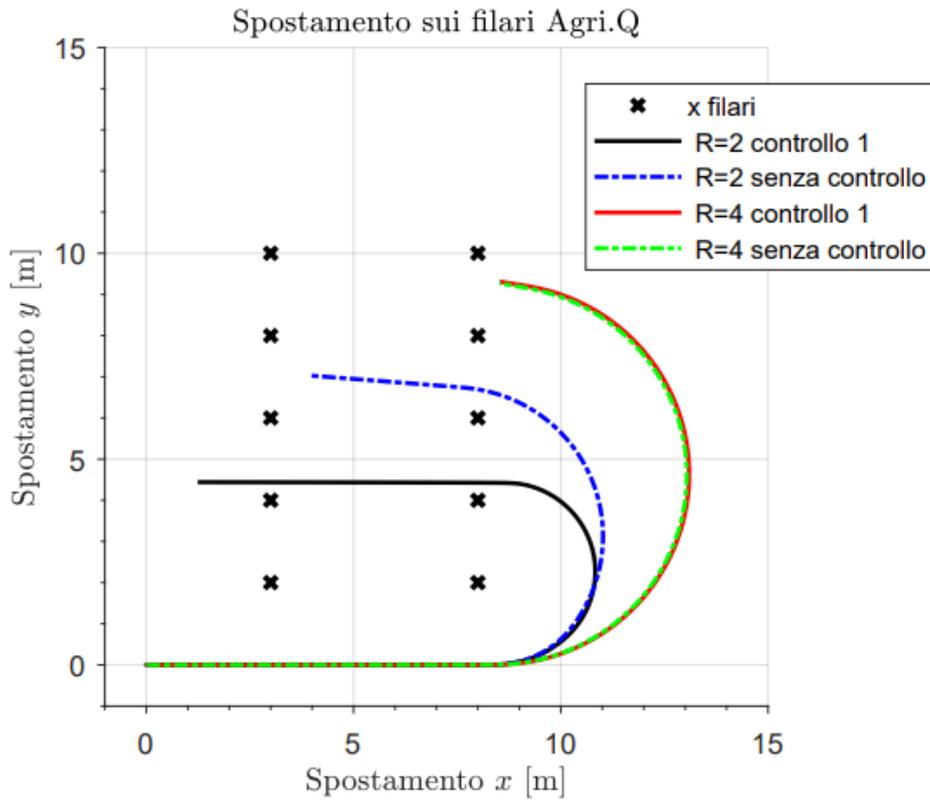
All'interno del blocco Agri.Q vi è il modello Adams di cui si è discusso precedentemente nel capitolo 1.5 in cui in input vengono inviate le variabili  $\omega_{Mdes F\sim}$ , contenenti i profili di velocità di riferimento in output restituisce le velocità angolari effettive dei motori del modulo frontale e le coppie erogate. Questo tipo di strategia di controllo però, presenta alcuni svantaggi, infatti l'attivazione del modulo posteriore in questo caso si avrebbe anche per raggi di curvatura diversi da 2 m e come visto nel confronto tra le traiettorie (Fig.28-30) ciò non porterebbe alcun vantaggio alla manovrabilità del robot, ma aumenterebbe l'effetto sottosterzante del robot allontanandolo dalla traiettoria imposta ed aumentando la potenza richiesta. Bisogna inoltre notare che in questo caso l'attivazione del modulo posteriore avverrebbe in maniera istantanea, in quanto la funzione della caratteristica del controllo risulta a scalino (Figura 51), provocando un aumento delle sollecitazioni dei motori e di tutto il sistema.



**Figura 51:** *parametro k durante una simulazione*

Il rover è stato progettato per operare tra i filari dei vigneti, risulta interessante osservare come il sistema di controllo agisce sulla sua movimentazione (Figura 52), confermando quanto detto precedentemente, ossia che con questo tipo di architettura di controllo si riesce a migliorare la manovrabilità del robot per raggi di curvatura stretti,  $R = 2$  m (curva nera rispetto la blu) a discapito

di quanto accade per raggi più ampi ( $R = 4$  m) in cui si nota che il contributo del modulo posteriore non comporta alcun miglioramento della manovrabilità del robot.



**Figura 52:** Confronto spostamento nei filari

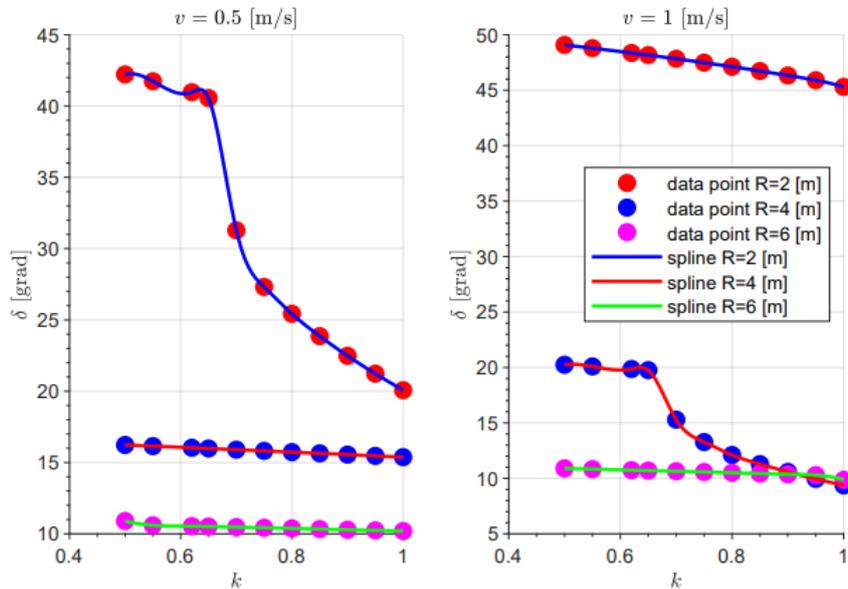
Per ovviare ai problemi dovuti al sistema di controllo di cui discusso poc'anzi, si è pensato di sviluppare nuovo tipo di architettura di controllo, prendendo in considerazione l'angolo  $\delta$ , ossia l'angolo formato tra il modulo anteriore e il modulo posteriore ( $\delta = \varphi_1 - \varphi_2$ ) in quanto come detto nel capitolo sulla cinematica 1.4, osservando la relazione (1.4.22), a parità di  $R_2$  (raggio di curvatura del modulo posteriore) più aumenta l'angolo  $\delta$  più il modulo anteriore sterza con un raggio di curvatura ridotto, esso inoltre è legato alla velocità angolare del robot, di conseguenza al suo raggio di curvatura secondo la relazione:

$$\delta = \arcsin\left(\frac{(\dot{\varphi}_1 - \dot{\delta})L_2}{v_1}\right)$$

(3.1)

Ricavata dalla cinematica, precisamente dalla relazione (1.4.9).

Per questo motivo sono state effettuate altre simulazioni per osservare come quest'angolo vari in funzione del parametro  $k$ , quindi del contributo del modulo posteriore (**Figura 53**).



**Figura 53:** Angolo  $\delta$  in funzione del parametro  $k$

Osservando la **figura 53** notiamo che per raggi di curvatura "stretti", diminuendo il valore del parametro  $k$ , l'angolo tra i due moduli aumenta a differenza di quanto avviene per raggi di curvatura più ampi, in cui l'angolo delta al variare di  $k$  rimane circa costante.

Come affermato precedentemente l'angolo delta è funzione della velocità angolare e della velocità del robot secondo la relazione (3.1).

Quest'ultima relazione ha permesso di considerare una strategia di controllo in cui viene fatto variare il parametro  $k$  in funzione di due grandezze fisiche: la velocità angolare del robot e la velocità longitudinale. Poiché il parametro  $k$  è funzione di due grandezze esso viene normalizzato con questi due parametri:  $k_d$ , funzione della velocità angolare e  $k_v$ , funzione della velocità longitudinale.

$$k = (\alpha \cdot k_v + \beta \cdot k_d) \tag{3.2}$$

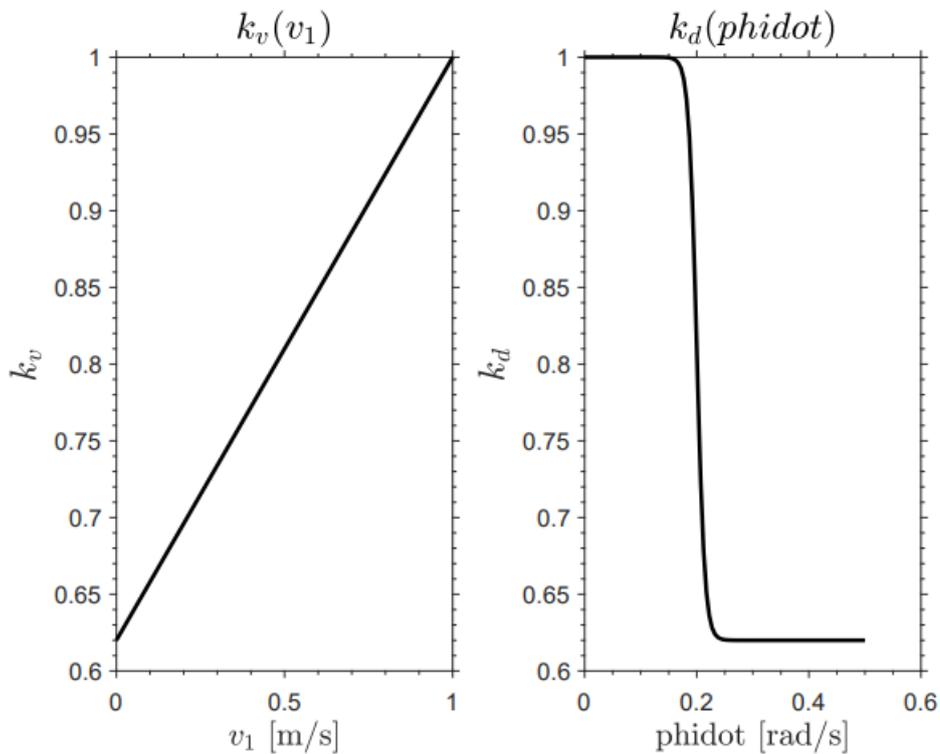
Per evitare la discontinuità che si otteneva nel controllo precedente (**Figura 51**), il parametro  $k_d$  viene definito come una funzione tangente iperbolica della velocità angolare del robot  $\dot{\varphi}$ :

$$k_d = 0.81 + 0.190 \cdot \tanh(70(-|\dot{\phi}_1| + 0.2)) \quad (3.3)$$

permettendo che il modulo posteriore venga attivato in maniera graduale e riducendo le sollecitazioni dei motori e di tutto il sistema.

Il parametro  $k_v$  viene invece definito secondo una funzione lineare della velocità con la relazione:

$$k_v = 0.38v_1 + 0.62 \quad (3.4)$$

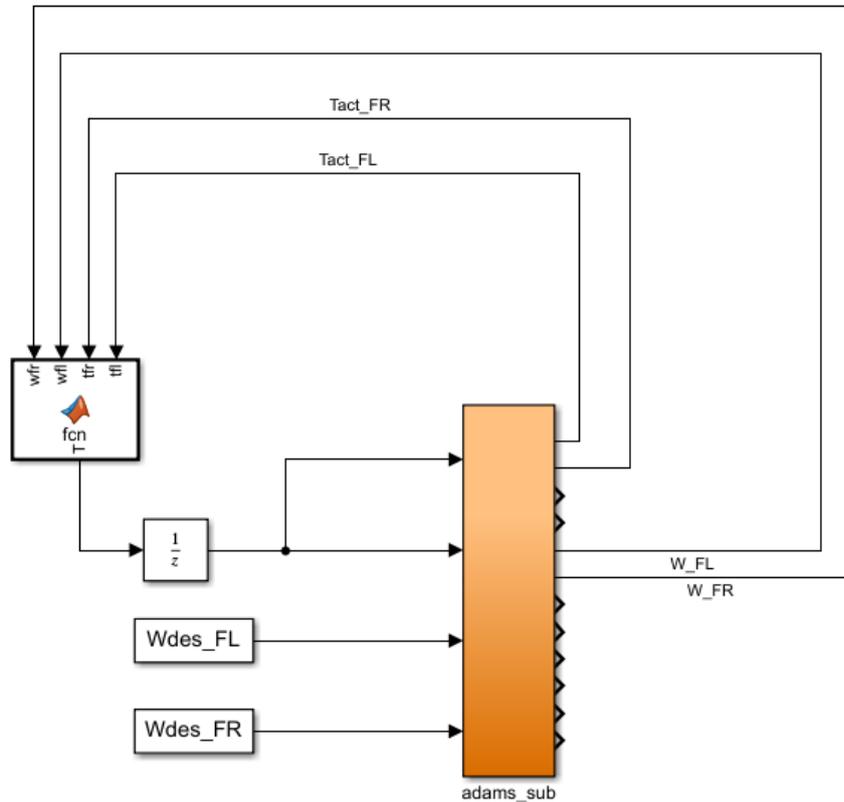


**Figura 54:**  $k_v$  e  $k_d$

Utilizzando il parametro  $k_v$  è possibile azionare il modulo posteriore anche durante la fase di accelerazione, ossia quando il carico del robot si sposta sull'assale posteriore. È facilmente intuibile come una vettura a trazione integrale sia favorita in questa circostanza, vedendo crescere la forza verticale sulle sue ruote motrici. [11] Osservando invece il parametro  $k_d$  (**Figura 54**) si nota come anch'esso vari con continuità ma con la velocità angolare  $\dot{\phi}_1$  e, poiché essa è correlata al raggio di

curvatura secondo la relazione:  $\phi_1 = \frac{v_1}{R_1}$  è possibile variare il parametro di divisione k dell'equazione (2.1) con continuità e in base al raggio di curvatura che il robot sta percorrendo.

Da queste considerazioni è stata implementata su Simulink la strategia di controllo rappresentata in **figura 55**.



**Figura 55:** Architettura di controllo

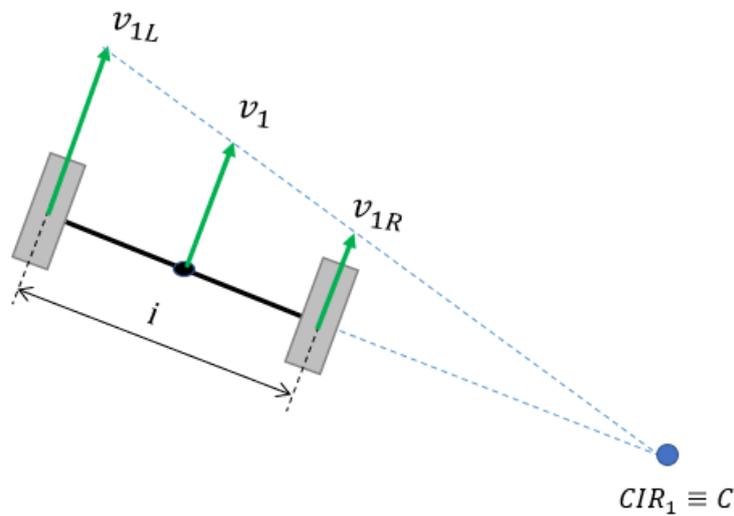
Lo schema del controllo (**Figura 55**) è molto simile a quelli utilizzati precedentemente, infatti anche in questo caso in input vengono inviate le variabili  $\omega_{Mdes F\sim}$ , contenenti i profili di velocità di riferimento ed in output il modello Adams restituisce le coppie erogate e le velocità angolari effettive dei motori del modulo frontale, le quali vengono opportunamente misurate da dei sensori, quali un sensore di coppia e un encoder opportunamente posti nel robot e utilizzati per calcolare la velocità e la velocità angolare del robot secondo le relazioni cinematiche qui di seguito riportate.

Vengono calcolate le velocità delle ruote attraverso il rapporto di trasmissione:

$$\omega_{R,FR\sim} = \omega_{M,FR} \cdot \tau_f \quad (3.5)$$

$$\omega_{R,FL\sim} = \omega_{M,FL} \cdot \tau_f \quad (3.6)$$

Dalle velocità angolari delle ruote vengono ricavate la velocità longitudinale e la velocità angolare del rover, in quanto la velocità longitudinale del modulo frontale è legata alle velocità delle ruote (**Figura 56**) del modulo frontale  $V_{R,R} = \omega_{R,FR\sim} \cdot r_{wheel}$ :



**Figura 56:** Schematizzazione del modulo frontale e delle corrispondenti velocità

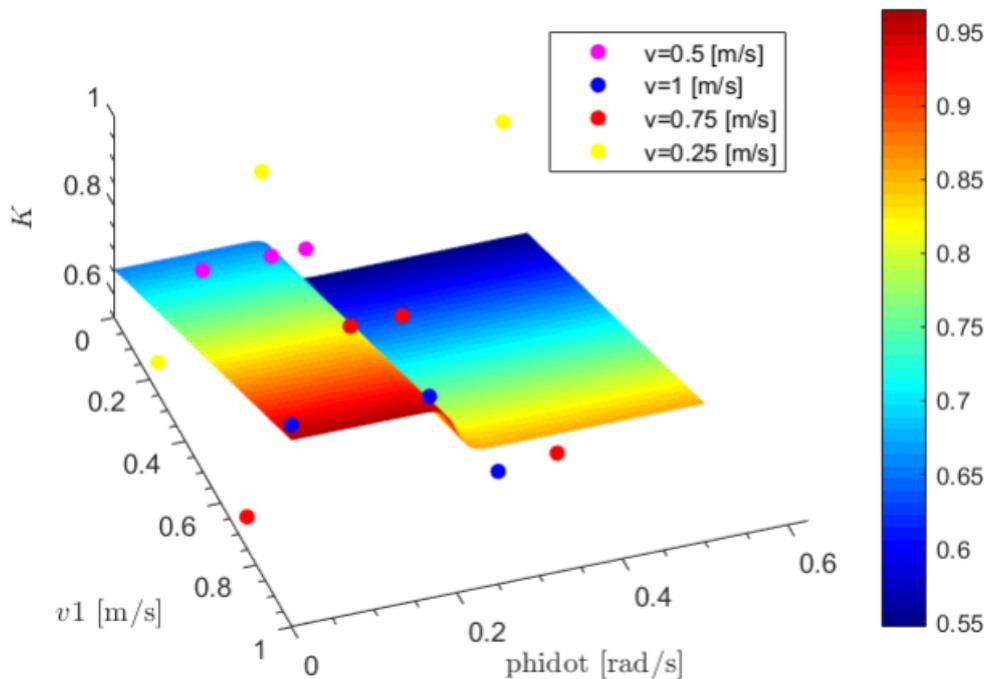
$$v_1 = \frac{(\omega_{R,FR\sim} + \omega_{R,FL\sim})r_{wheel}}{2} \quad (3.7)$$

$$\dot{\varphi} = \frac{(\omega_{R,FR\sim} \cdot r_{wheel} - v_1)}{b_1} \quad (3.8)$$

In cui  $b_1 = 0.44 \text{ m}$  è la metà della carreggiata ( $i/2$ ) e  $r_{wheel} = 0.2 \text{ m}$  è il raggio delle ruote.

Da queste relazioni vengono ricavati i parametri  $k_v$  e  $k_d$  con le equazioni (3.3) e (3.4), e poi normalizzati per ricavare il parametro  $k$  di cui sotto viene rappresentata la sua caratteristica (**Figura 57**), in cui:

$$k = (k_v + 0.4737k_d - 0.4737) \tag{3.9}$$



**Figura 57:** Caratteristica di  $k$  in funzione della velocità e della velocità angolare del robot

I punti indicati in **figura 57** non si trovano sulla caratteristica. Essi rappresentano i valori di  $k$  che si vorrebbero avere se il robot si trovasse in determinate condizioni di velocità e velocità angolare. Questi valori “ideali” del parametro  $k$  sono stati stabiliti in base ai risultati delle simulazioni del capitolo 3 in cui si vuole:

- Per tratti rettilinei  $\rightarrow \dot{\phi} = 0 \text{ rad/s} \rightarrow k = 1$ ;
- Durante la fase di accelerazione  $k = 0.62$ ;
- Per  $R = 2 \text{ m}$  a  $v = 0,5 \text{ m/s} \rightarrow \dot{\phi} = 0,25 \text{ rad/s} \rightarrow k = 0.62$ ;

- Per  $R = 6 \text{ m}$  a  $v = 1 \text{ m/s} \rightarrow \dot{\varphi} = 0,166 \text{ rad/s} \rightarrow k = 1$  quindi anche per  $R \leq 4 \text{ m}$  a  $v = 0,5 \text{ m/s} \rightarrow \dot{\varphi} = 0,125 \text{ rad/s}$   $k = 1$ ;
- In tutti gli altri casi intermedi  $k$  varia con continuità  $0.62 \leq k \leq 1$ .

Il problema principale della posizione dei punti sulla caratteristica è dovuto principalmente al parametro  $k_v$ , infatti osservando la sua caratteristica (**Figura 53**) per valori di velocità diversi da 1 m/s, esso risulta essere diverso da 1, provocando l'azionamento del modulo posteriore anche quando non ne risulta necessario.

Per ovviare al problema della non presenza dei punti sulla caratteristica ed avere un valore del parametro  $k$  ottimale in base alle caratteristiche di velocità e velocità angolare del robot, sono state apportate alcune modifiche all'architettura di controllo precedente, specialmente per quel che riguarda il parametro  $k_v$ , in quanto nella strategia di controllo che analizzeremo in seguito, la funzione che definisce il parametro  $k_d$  resta invariata.

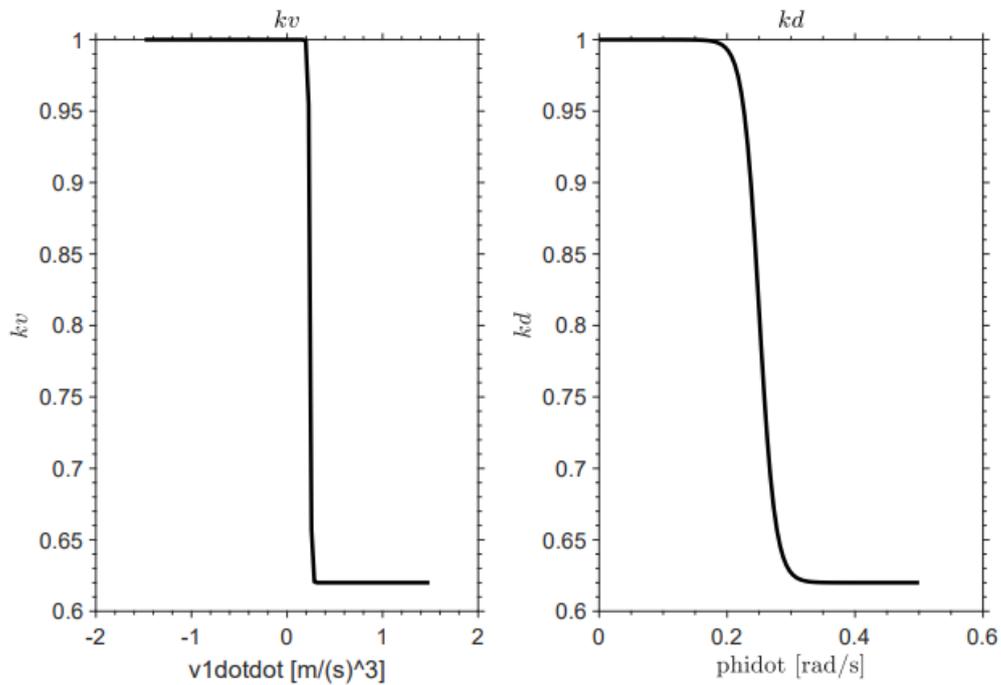
Poiché uno degli obiettivi posti è sempre quello di avere un azionamento dei motori del modulo posteriore durante la fase di accelerazione e non è possibile usare l'accelerazione misurata del rover per definire una funzione di  $k_v$ , in quanto la sua funzione percorre gli stessi punti della caratteristica durante la fase di accelerazione e decelerazione non permettendo al sistema di fare una distinzione tra le due fasi, si è optato per l'utilizzo del jerk. Il jerk è la derivata terza dello spostamento, la sua misura permette al sistema di distinguere tra la fase di accelerazione e decelerazione, in quanto esso è negativo durante la fase di decelerazione e positivo durante la fase di accelerazione.

Il jerk può essere misurato da un accelerometro la cui misura può essere derivata, ma poiché il suo segnale presenta un eccessivo rumore deve essere filtrato mediante un filtro passa basso in modo tale da rimuovere il rumore presente nella sua misura, dopodiché viene calcolato il parametro:

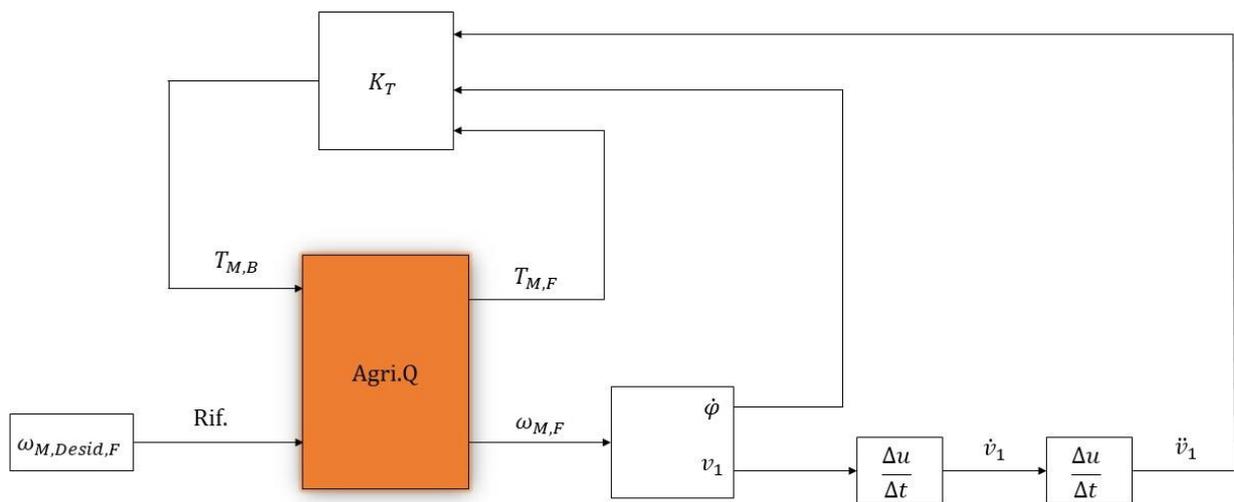
$$k_v = 0.81 + 0.19 \cdot \tanh(70(-\ddot{v}_1 + 0.24))$$

(3.10)

Nella figura sottostante viene rappresentata la funzione  $k_v$  e  $k_d$ (**Figura 58**) e le modifiche effettuate allo schema di controllo (**Figura 59**).



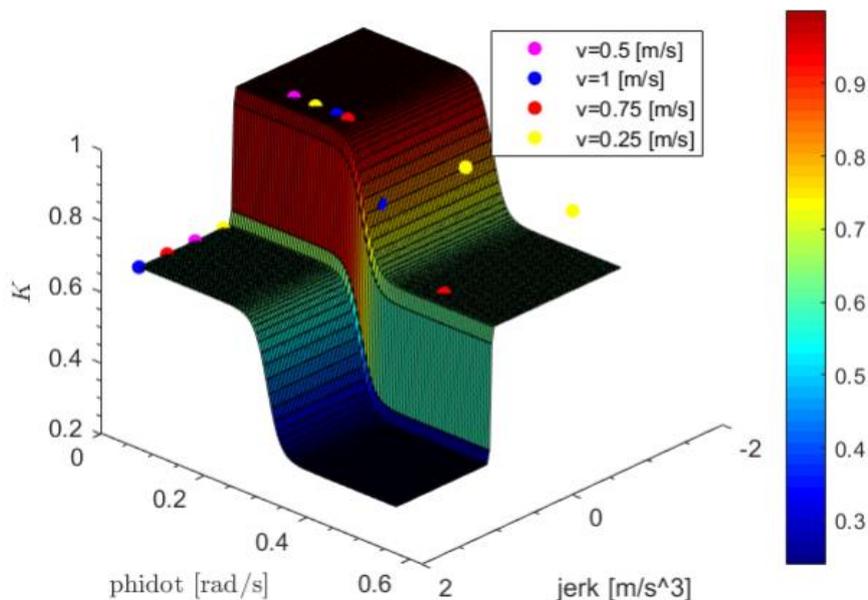
**Figura 58:**  $k_v$  al variare della derivata seconda della velocità e  $k_d$  al variare della velocità angolare



**Figura 59:** Schema di controllo

In questo sistema di controllo, implementato su Simulink, la misura della velocità longitudinale e della velocità angolare del robot viene effettuata allo stesso modo dello schema di controllo precedente, partendo sempre dalla misura delle velocità angolari dei due motori del modulo frontale e utilizzando le relazioni (3.7) e (3.8). Dalla velocità longitudinale, derivando due volte otteniamo il jerk, il quale viene utilizzato, come detto precedentemente, per calcolare  $k_v$  con la relazione (3.10), mentre dalla velocità angolare  $\dot{\varphi}$  viene ricavato  $k_d$  con (3.4).

Entrambi i parametri  $k_v$  e  $k_d$  vengono successivamente normalizzati per ricavare il parametro  $k = (k_v + k_d - 1)$  di cui sotto viene rappresentata la caratteristica (**Figura 60**).

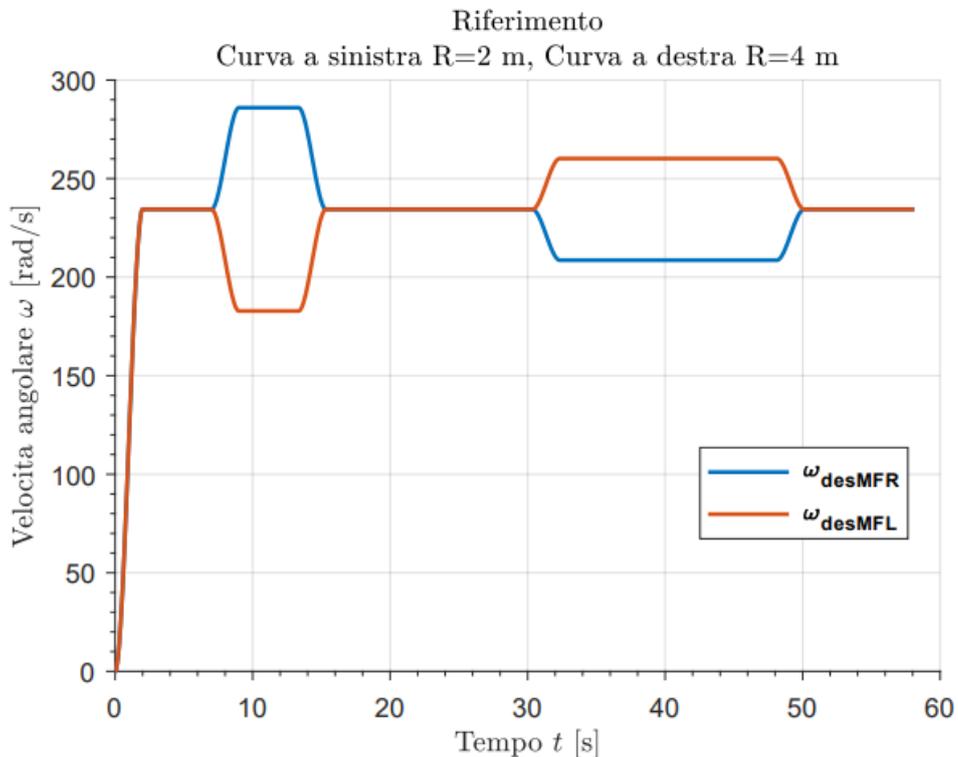


**Figura 60:** Caratteristica  $k$

È possibile notare già da un primo sguardo che i punti che indicano il valore di  $k$  ottimale per determinate condizioni del robot si trovano sulla caratteristica, questo è abbastanza indicativo sulla buona funzionalità di questa architettura di controllo.

Per assodare l'efficacia di questo controllo viene effettuato un confronto tra una traiettoria eseguita con questa architettura di controllo ed una eseguita con i soli motori anteriori attivi in cui viene fatto percorrere al robot una fase di accelerazione transitoria con un profilo di velocità cubico, un tratto rettilineo a velocità costante, una curva verso sinistra di raggio  $R = 2$  m a velocità costante di 0.5 m/s

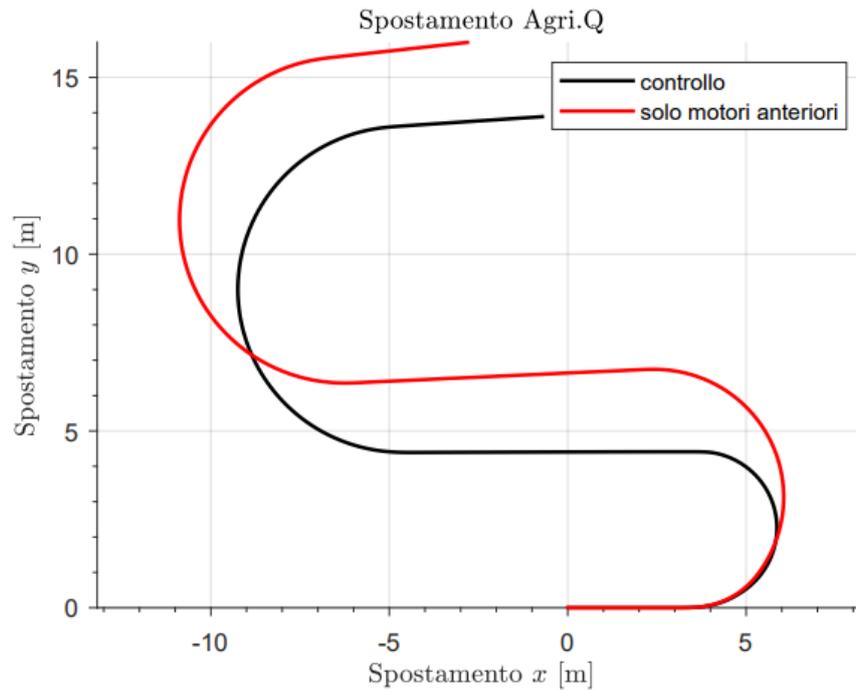
e una curva verso destra di raggio  $R = 4$  m sempre alla stessa velocità con il profilo di velocità angolare dei motori indicati in figura.



**Figura 61:** Riferimento di velocità

Si osserva fin da subito dalla figura sottostante (**Figura 62**), una differenza sostanziale tra i raggi di curvatura effettuati dal robot con il solo modulo anteriore attivo e quelli effettuati con il controllo di tipo adattativo. La strategia di controllo permette di aumentare la manovrabilità del robot grazie al contributo dei motori del modulo posteriore che, variando le forze scambiate tra gli pneumatici e facendoli slittare, permettono al robot di percorrere la traiettoria pianificata, limitando anche l'effetto della saturazione dei motori dell'anteriore.

La stessa traiettoria (**Figura 62, curva nera**) si ottiene anche se si dovesse fornire una coppia costante ai motori del modulo posteriore per tutto il tempo della simulazione, per questo motivo, sarebbe importante valutare la potenza assorbita e valutare a livello dei consumi l'effettivo vantaggio del controllo di tipo adattativo.

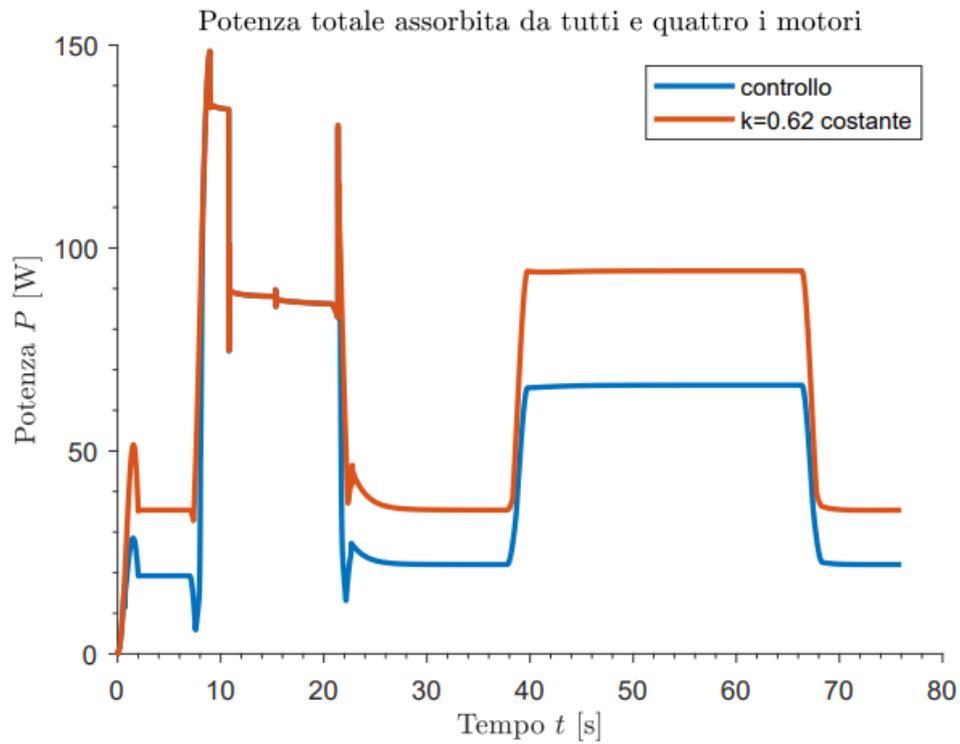


**Figura 62:** Confronto traiettorie  $v=0.5$  m/s

Il consumo medio di potenza può essere stimato monitorando la potenza meccanica assorbita dai motori di trazione anteriori e posteriori sinistro ( $P_{M,FL}$ ), ( $P_{M,RL}$ ) e destro ( $P_{M,FR}$ ), ( $P_{M,RR}$ ) della prova effettuata (**Figura 62**). Il confronto viene effettuato tra la simulazione con il controllo di tipo adattativo e il caso in cui i motori posteriori rimangano attivi per tutto il tempo di simulazione. Nel caso in cui si utilizzi il sistema di controllo di tipo adattativo, la media della potenza totale assorbita risulta essere 51,44 W, corrispondenti a 3,91 kJ di energia totale assorbita, mentre, nel caso in cui i motori del modulo posteriore rimangano attivi per tutto il tempo della simulazione, che nel caso rappresentato risulta essere di 1 minuto e 16 s, la media della potenza totale assorbita dai motori risulta essere di 68,87 W, corrispondenti a 5.3 kJ di energia totale assorbita. Considerando il consumo di energia della batteria montata nel robot, i cui dati di targa sono indicati in **tabella 2**, nel primo caso viene utilizzato lo 0.081% dell'energia totale della batteria, mentre nel secondo caso il 0.11 %. Il controllo adattativo permette in totale un risparmio energetico di circa 1.39 kJ, che rapportato ad una missione di cinque ore diventa di circa 417 kJ. Questo risultato conferma il vantaggio di avere un sistema di controllo di tipo adattativo.

Nella figura sottostante (**Figura 63**), viene riportata la somma della potenza totale assorbita da tutti e quattro i motori di Agri.Q in cui è possibile notare l'effetto della strategia di controllo implementata

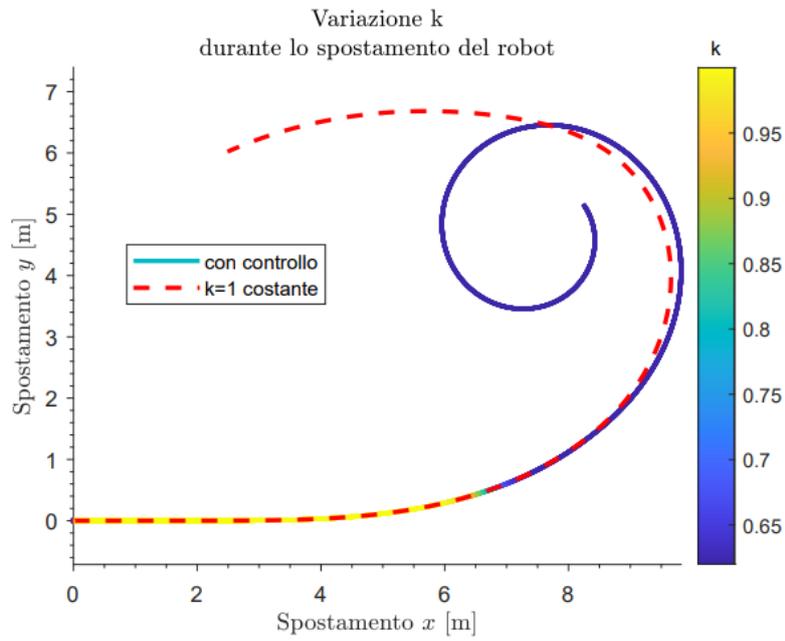
in quanto quando il robot percorre il raggio di curvatura di 4 m (40 s - 67 s) i motori del modulo posteriore vengono disattivati.



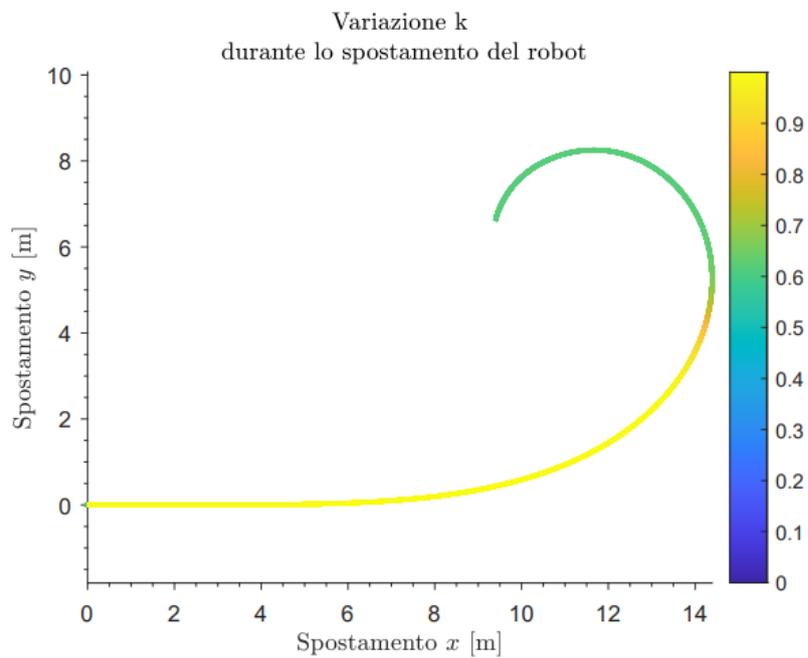
**Figura 63:** Andamento della somma della potenza assorbita da tutti e quattro i motori di Agri.Q nel tempo

È importante tener presente che il valore di energia consumata ottenuta andrebbe opportunamente aumentato per tenere in considerazione le pendenze, i diversi possibili livelli di asperità del terreno e la potenza richiesta agli attuatori di riorientamento e dall'elettronica. [16]

Per poter osservare maggiormente come il sistema di controllo agisce sull'attivazione del modulo posteriore, erogando diversi valori di coppia in funzione del parametro  $k$ , sono state effettuate due nuove simulazioni in cui: nella prima viene fatto percorrere ad Agri.Q un tratto rettilineo in accelerazione, un tratto rettilineo a velocità costante di 0.5 m/s e una spirale da  $R = 4$  m a  $R = 2$  m passando da una velocità di 0.5 m/s a 1 m/s (**Figura 64**). Nella seconda prova invece viene invece fatta percorrere la spirale a velocità costante di 0.5 m/s (**Figura 65**).

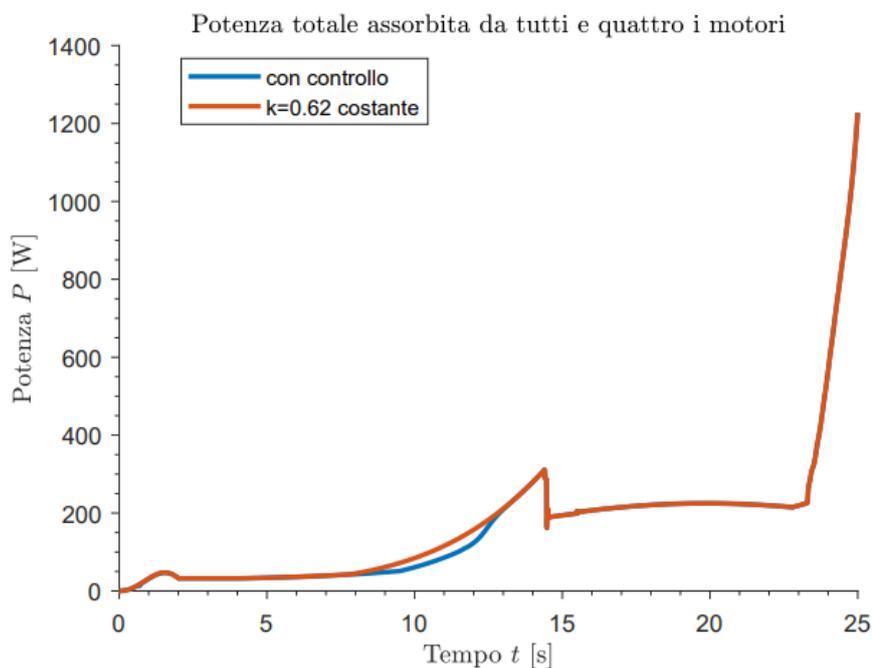


**Figura 64:** variazione del contributo di coppia del posteriore durante l'esecuzione della traiettoria a spirale e confronto con l'esecuzione della stessa traiettoria con coppia fornita dai soli motori anteriori



**Figura 65:** variazione del contributo di coppia del posteriore durante l'esecuzione della traiettoria a spirale a velocità costante di 0,5 m/s

Dai due grafici rappresentati (**Figura 64-65**) si osserva come in base alla condizione in cui si trova il robot il modulo posteriore viene attivato conseguentemente variando il suo contributo con continuità, attraverso il parametro  $k$ . In base però all'operazione che deve svolgere il robot, dipenderà la convenienza di quest'architettura di controllo per ciò che concerne i consumi. Infatti, della simulazione di **figura 64**, viene rappresentata la somma della potenza totale assorbita da tutti e quattro i motori del rover (**Figura 66**). Da questa figura si nota come in questo caso il risparmio energetico dovuto alla strategia di controllo implementata è effimero. La media della potenza totale assorbita dai motori con il sistema di controllo risulta essere di 165,49 W, corrispondenti a 4,13 kJ di energia totale assorbita, mentre nel caso in cui il modulo posteriore rimanga attivo per tutto il tempo della simulazione, viene assorbita una potenza media di 220 W, corrispondenti a 4,24 kJ, provocando un risparmio di soli 0,11 kJ. Il risparmio energetico è così basso in quanto in questa simulazione il rover deve eseguire una traiettoria particolarmente estrema (la spirale in accelerazione), in cui il modulo posteriore viene attivato quasi per tutto il tempo della simulazione.



**Figura 66:** Andamento della somma della potenza assorbita da tutti e quattro i motori di Agri.Q nel tempo

## 4. Strategie di controllo future

Le strategie di controllo applicabili al sistema possono essere infinite; infatti, non è facile definire in modo univoco un'unica strategia di controllo. Tuttavia, è possibile considerare alcune strategie di controllo che possano essere implementate su Agri.Q.

Una di queste strategie potrebbe essere quella in cui si faccia variare il parametro  $k$  in funzione della posizione del rover, ricavata da un ricevitore GPS ed in funzione della curva che sta per essere affrontata. Questo sistema è chiaramente utilizzabile in percorsi chiusi e con un numero limitato di curve, come nel nostro caso, ma presenta delle grosse limitazioni in quanto vi è la possibilità di un'errata determinazione della posizione del GPS con scarsa copertura GPS ed inoltre al sistema non sarebbe possibile effettuare delle manovre non previste dal controllo.

Un altro tipo di strategia che si potrebbe provare ad implementare è quella in cui vengano combinati il controllo discusso in questa tesi e il Traction Control System (TCS), implementato in tutte le autovetture moderne. L'obiettivo di quest'ultimo è quello di limitare lo slittamento longitudinale delle ruote motrici al di sotto di un valore di soglia al fine di evitare lo slittamento delle ruote durante le accelerazioni e mantenerlo vicino al valore ottimale, che corrisponde alla forza massima longitudinale scaricabile dalla ruota al suolo [17], in questo modo si potrebbe prevenire lo slittamento delle ruote che si ha quando il robot compie raggi di curvatura "stretti" e scaricare bene la coppia a terra, evitandone i crolli visti durante le simulazioni in **figura 34** (caso con  $k=0.62$ ).

## 5. Conclusione

Gli effettivi benefici ambientali ed economici derivanti dall'utilizzo delle tecnologie robotiche per applicazioni di agricoltura di precisione sono un dato di fatto, tanto che negli ultimi anni, l'interesse degli investimenti privati e governativi nel settore è notevolmente aumentato. L'agricoltura di precisione rappresenta un modo intelligente e sostenibile al miglioramento della redditività e della produttività.

In questo ambito di lavoro i ricercatori del Politecnico di Torino hanno sviluppato e progettato un UGV (Agri.Q) su ruote, adatto allo svolgimento di attività per l'agricoltura di precisione, quali il monitoraggio e il campionamento delle colture e del suolo. In particolare, il robot presenta una struttura articolata la cui peculiare modularità è adatta a superare ostacoli e a muoversi su terreni sconnessi. Esso è stato costruito con il modulo anteriore attivo e il modulo posteriore trainato passivamente, il quale, in alcune situazioni, può contribuire alla trazione del veicolo.

L'obiettivo principale di questa Tesi è stato quello di implementare alcune architetture di controllo della trazione del modulo posteriore di Agri.Q, con l'obiettivo specifico di aumentarne la manovrabilità e contenerne i consumi.

Per verificare l'effetto del modulo posteriore attivo sulla manovrabilità del robot sono state svolte una serie di prove attraverso la co-simulazione dei software Adams e Simulink, in cui al modulo posteriore è stata inviata la somma delle coppie dei motori del modulo frontale, moltiplicata per un opportuno parametro di divisione  $k$ , il quale viene fatto variare per modulare la coppia erogata dal posteriore. In queste prove sono state analizzate: le traiettorie, le coppie erogate dai motori, le velocità angolari e le forze scambiate dagli pneumatici con il suolo. Dai risultati emerge che il robot è soggetto ad un'enorme deviazione tra la pianificazione del movimento e la traiettoria effettivamente eseguita, soprattutto nel caso in cui non vi è alcuna azione del modulo posteriore. Si è osservato che questo risultato è riconducibile ad almeno due fenomeni: da un lato, le forze trasversali di contatto che agiscono sulle ruote allontanano il robot da un comportamento puramente ologonico e dall'altro, i motori di pilotaggio non sono in grado di seguire con precisione la velocità di riferimento a causa della saturazione dei motori del modulo frontale. Il secondo effetto può essere mitigato dall'azionamento del modulo posteriore che alleggerisce il carico dei motori del modulo frontale, permettendo al robot di eseguire una traiettoria che si avvicina a quella pianificata.

Questo risultato, però, è confinato solo ad alcune traiettorie eseguite a determinate velocità, infatti, nelle altre condizioni non è utile attivare il modulo posteriore e l'unico effetto che provocherebbe è un aumento dei consumi. Per questo motivo è stata implementata una strategia di controllo che permetta la modulazione della coppia erogata dal modulo posteriore in funzione della velocità con cui il robot sta percorrendo un determinato raggio di curvatura, in modo tale da migliorarne la manovrabilità e limitare i consumi derivanti dall'azionamento dei motori del modulo posteriore.

È importante evidenziare che il sistema di controllo, benché sia stato pensato per il robot Agri.Q, rappresenta uno strumento di ben più ampia portata, in quanto esso mantiene la sua validità per tutti i veicoli che presentano uno schema simile a questo rover.

Le fasi future della ricerca potrebbero indagare sull'efficacia di layout alternativi di robot mobili, ad esempio considerando di poter erogare coppie diverse tra i motori del modulo posteriore (invece della stessa). In questo modo sarebbe possibile ottenere un contributo controsterzante del modulo posteriore, permettendo un aumento della manovrabilità del robot; ciononostante con questo tipo di layout bisognerebbe controllare l'angolo  $\delta$  tra i due moduli per evitare il fenomeno del jackknife. Un'altra architettura di controllo, come visto nel capitolo sulle strategie di controllo future, potrebbe essere quella di combinare la strategia di controllo implementata in questo lavoro di tesi con un controllo TCS, in modo tale da avere durante tutto il lavoro del robot la forza massima longitudinale degli pneumatici scaricata a terra ed evitare lo slittamento delle ruote.

In conclusione, è possibile affermare che il sistema di controllo della trazione sviluppato in questa tesi per il robot Agri.Q rappresenta un'ottima base su cui poter sviluppare strategie di controllo più complesse.

## Indice delle figure

<b>Figura 1:</b> Agri.Q.....	6
<b>Figura 2:</b> Schema funzionale del rover Agri.q (a); collegamento bilancieri con il corpo principale del robot(b).....	7
<b>Figura 3:</b> Dettaglio sulla distribuzione di forze su un'ampia superficie (a); Dettaglio sul funzionamento da filtro delle oscillazioni (b) .....	8
<b>Figura 4:</b> Pannelli solari (a); Piattaforma d'atterraggio (b) .....	9
<b>Figura 5:</b> Descrizioni giunti .....	10
<b>Figura 6:</b> Posizione del braccio robotico durante il prelievo di un campione dal suolo (a); Altezza massima raggiungibile dal braccio robotico con l'ausilio dello spostamento della piattaforma di atterraggio (b).....	10
<b>Figura 7:</b> Vigneto a spalliera [7] .....	13
<b>Figura 8:</b> Vigneto a pergola [7].....	14
<b>Figura 9:</b> modello cinematico semplificato con quattro ruote virtuali senza velocità laterale.....	15
<b>Figura 10:</b> Modello cinematico con velocità laterale.....	16
<b>Figura 11:</b> Schematizzazione del modulo frontale e delle corrispondenti velocità.....	18
<b>Figura 12:</b> Traiettoria modello cinematico.....	21
<b>Figura 13:</b> Coordinate generalizzate del modello dinamico e parametri geometrici.....	22
<b>Figura 14:</b> Diagrammi di corpo libero .....	25
<b>Figura 15:</b> Sistemi di riferimento per lo studio della ruota [11].....	28
<b>Figura 16:</b> Angolo di deriva [11] .....	29
<b>Figura 17:</b> Angolo di assetto .....	29
<b>Figura 18:</b> Modello del robot Agri.q realizzato in ambiente Adams .....	33
<b>Figura 19:</b> Vista dall'alto del modello di Agri.q .....	33
<b>Figura 20:</b> Schema della trasmissione del modulo frontale .....	35
<b>Figura 21:</b> Schema dell'implementazione della trazione anteriore sul modello del robot Agri.Q realizzato in Adams.....	36
<b>Figura 22:</b> Schema della trasmissione del modulo posteriore.....	37
<b>Figura 23:</b> Schema dell'implementazione della trazione posteriore sul modello Adams.....	39
<b>Figura 24:</b> Andamento della coppia erogata $TM, \sim$ (in nero) e dell'integrale della funzione $f(TM, \sim)$ (in rosso) .....	41

<b>Figura 25:</b> Schema di implementazione saturazione motori .....	42
<b>Figura 26:</b> Architettura di controllo applicata per la valutazione dell'effetto dell'azione del modulo posteriore .....	46
<b>Figura 27:</b> Profilo di velocità utilizzato per le varie prove eseguite. Nel caso rappresentato $v_1=0.5$ [m/s] $R_1=2$ m .....	47
<b>Figura 28:</b> Confronto traiettoria Agri.Q $v=0.5$ m/s $R=2$ m con circonferenza analitica .....	49
<b>Figura 29:</b> zoom traiettoria $R=6$ m .....	50
<b>Figura 30:</b> Confronto traiettoria Agri.Q $v=1$ m/s $R=2$ m con circonferenza analitica .....	51
<b>Figura 31:</b> Confronto tra la velocità angolare di riferimento $\omega_{des}$ e quella effettiva, nel caso $v = 0.5$ m/s $R = 2$ m .....	52
<b>Figura 32:</b> Confronto tra la velocità angolare di riferimento $\omega_{des}$ e quella effettiva, nel caso $v = 1$ m/s $R = 4$ m .....	53
<b>Figura 33:</b> Confronto tra la velocità angolare di riferimento $\omega_{des}$ e quella effettiva, nel caso $v = 0.5$ m/s $R = 4$ m .....	53
<b>Figura 34:</b> Coppie motori $R=2$ m .....	54
<b>Figura 35:</b> Coppia dettaglio motore destro .....	55
<b>Figura 36:</b> Coppie motori $R = 4$ m .....	56
<b>Figura 37:</b> Coppie motori $R = 6$ m .....	57
<b>Figura 38:</b> Forze di contatto modulo frontale $R = 2$ m $v = 0.5$ m/s .....	58
<b>Figura 39:</b> Forze di contatto modulo frontale $R = 4$ m $v = 0.5$ m/s .....	60
<b>Figura 40:</b> Forze di contatto modulo frontale $R = 2$ m $v = 1$ m/s .....	61
<b>Figura 41:</b> Slittamento ruote anteriori del modulo frontale $R = 2$ m $v = 0.5$ m/s .....	63
<b>Figura 42:</b> Slittamento ruote posteriori del modulo frontale $R = 2$ m $v = 0.5$ m/s .....	63
<b>Figura 43:</b> Slittamento ruote anteriori del modulo posteriore $R = 2$ m $v = 0.5$ m/s .....	64
<b>Figura 44:</b> Slittamento ruote posteriori del modulo posteriore $R = 2$ m $v = 0.5$ m/s .....	64
<b>Figura 45:</b> Slittamento ruote anteriori modulo frontale $R = 2$ m $v = 1$ m/s .....	66
<b>Figura 46:</b> Slittamento ruote posteriori del modulo frontale $R = 2$ m $v = 1$ m/s .....	66
<b>Figura 47:</b> Slittamento ruote anteriori del modulo posteriore $R = 2$ m $v = 1$ m/s .....	67
<b>Figura 48:</b> Slittamento ruote anteriori del modulo posteriore $R = 2$ m $v = 1$ m/s .....	67
<b>Figura 49:</b> Sistema di controllo Agri.Q .....	70
<b>Figura 50:</b> Blocco Kt .....	71
<b>Figura 51:</b> parametro k durante una simulazione parametro k durante una simulazione .....	72

<b>Figura 52:</b> Confronto spostamento nei filari .....	73
<b>Figura 53:</b> Angolo $\delta$ in funzione del parametro $k$ .....	74
<b>Figura 54:</b> $kv$ e $kd$ .....	75
<b>Figura 55:</b> Architettura di controllo .....	76
<b>Figura 56:</b> Schematizzazione del modulo frontale e delle corrispondenti velocità .....	77
<b>Figura 57:</b> Caratteristica di $k$ in funzione della velocità e della velocità angolare del robot .....	78
<b>Figura 58:</b> $kv$ al variare della derivata seconda della velocità e $kd$ al variare della velocità angolare .....	80
<b>Figura 59:</b> Schema di controllo .....	80
<b>Figura 60:</b> Caratteristica $k$ .....	81
<b>Figura 61:</b> Riferimento di velocità .....	82
<b>Figura 62:</b> Confronto traiettorie $v=0.5$ m/s .....	83
<b>Figura 63:</b> Andamento della somma della potenza assorbita da tutti e quattro i motori di Agri.Q nel tempo .....	84
<b>Figura 64:</b> variazione del contributo di coppia del posteriore durante l'eseguimento della traiettoria a spirale e confronto con l'eseguimento della stessa traiettoria con coppia fornita dai soli motori anteriori.....	85
<b>Figura 65:</b> variazione del contributo di coppia del posteriore durante l'eseguimento della traiettoria a spirale a velocità costante di 0,5 m/s .....	85
<b>Figura 66:</b> Andamento della somma della potenza assorbita da tutti e quattro i motori di Agri.Q nel tempo .....	86

## Indice delle tabelle

<b>Tabella 1:</b> Dettagli dei componenti meccanici adottati .....	12
<b>Tabella 2:</b> Scheda tecnica batteria .....	12
<b>Tabella 3:</b> Descrizione delle coordinate .....	23
<b>Tabella 4:</b> parametri di contatto delle ruote.....	31
<b>Tabella 5:</b> Nomenclatura modello Adams.....	34
<b>Tabella 6:</b> Potenza totale assorbita dai motori al variare del raggio di curvatura a velocità del robot $v = 0.5$ m/s .....	68
<b>Tabella 7:</b> Potenza totale assorbita dai motori al variare del raggio di curvatura a velocità del robot $v = 1$ m/s .....	68

## Bibliografia

- [1] A. Castrignanò, «Innovazioni Tecnologiche : l'Agricoltura di Precisione,» in *Alimentazione: la sfida del nuovo millennio*, L'Erma di Bretschneider, 2012, pp. 117-126.
- [2] “International Society of Precision Agriculture,” Gennaio 2021. [Online]. Available: <https://www.ispag.org/about/definition>.
- [3] F. J. Pierce. and P. Novak., «Aspects of Precision Agriculture.,» in *Advances in Agronomy*, volume 67, Academic Press, 1999, pp. 1-85.
- [4] R. Finger, S. Swinton, N. El Benni e A. and Walter, «Precision farming at the nexus of Agricultural Production and the Environment,» in *Annual Review of Resource Economics*, volume 11, 2019, pp. 1-23.
- [5] A. B. L. C. G. Q. Paride Cavallone, «The Agri.q mobile robot: preliminary experimental tests,» in *IFTToMM*, 2020.
- [6] C. V. L. C. a. A. B. a. G. Paride Cavallone, «Design of the mobile robot Agri.q,» Politecnico di Torino, Torino, 2021.
- [7] VignaTech, «vignatech,» [Online]. Available: <https://www.vignatech.it/italiano/impianti/nuova-pagina/>.
- [8] P. C. L. T. G. C. L. C. G. Q. Andrea Botta, «Modelling and simulation of articulated mobile robots,» *International Journal of Mechanics and Control*, Vol XX, 2020.
- [9] G. Genta, *Motor Vehicle Dynamics Modelling and Simulation*, Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. , 2006.
- [10] P. C. L. C. L. T. G. Q. Andrea Botta, «Modelling and Experimental Validation of Articulated Mobile Robots with Hybrid Locomotion System,» in *Advances in Italian Mechanism Science*, Springer, 2021, pp. 758-767.
- [11] G. Velardocchia, «Appunti di fondamenti di Meccanica del Veicolo,» Torino, 2019.
- [12] N. Flaugnatti, «Controllo di trazione: metodi per lo sviluppo di algoritmi,» Università degli Studi di Padova , Padova, 2011.

- [13] S. Carpentieri, «Panda 4WD-Hybrid: Prototipo virtuale per strategie di controllo,» Torino, 2019.
- [14] B. A. C. P. T. L. Q. G. Carbonari Luca, «Data-Driven Analysis of Locomotion for a Class of Articulated Mobile Robots,» *JOURNAL OF MECHANISMS AND ROBOTICS*, 2021.
- [15] S. R. S. N. Bolzern Paolo, *Fondamenti di controlli automatici*, McGraw-Hill Companies, 2008.
- [16] C. V. L. C. A. B. P. C. Giuseppe Quaglia, «Agri.q: A Sustainable Rover For Precision Agriculture,» in *Solar Energy Conversion in Communities Proceedings of the Conference for Sustainable Energy (CSE) 2020*, Braşov, Romania, Springer, 2020, pp. 81-93.
- [17] R. Laneve, «Traction Control System development for an AWD hybrid vehicle,» Torino, 2020.
- [18] Wikipedia, «Wikipedia,» [Online]. Available: [https://it.wikipedia.org/wiki/Agricoltura\\_di\\_precisione](https://it.wikipedia.org/wiki/Agricoltura_di_precisione).
- [19] R. a. A. V. Gebbers, «Precision agriculture and food security,» *Science*, pp. 327, pp. 828-831, 2010.
- [20] L. G. B. E. C. L. B. Giuseppe Quaglia, «UGV Epi.q-Mod,» in *Advances on Theory and Practice of Robots and Manipulators*, Springer, 2014, pp. 331-339.
- [21] Q. G. Botta A, «Low-Cost Localization For Mobile Robot With Fiducial Markers,» in *2nd International Jc-IFTtoMM Symposium*, Kanagawa , 2019.
- [22] M. Guiggiani, *The Science of Vehicle Dynamics*, Springer, 2018.
- [23] «Wikipedia.org,» 11 Gen 2022. [Online]. Available: [https://it.wikipedia.org/wiki/Controllo\\_automatico](https://it.wikipedia.org/wiki/Controllo_automatico).
- [24] E. Moreno, «Strategie di guida autonoma in retromarcia per,» Torino, 2021.