

Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia
Facoltà di Ingegneria

**Modellistica e Simulazione
del Comportamento Dinamico di
Beccheggio di un Trattore Agricolo**

Relatore:

Prof. Roberto Zanasi

Correlatori:

Ing. Michele Forte

Ing. Riccardo Morselli

Tesi di Laurea di:

Francesco Piccinini

OBIETTIVO DELLO STUDIO



- Tesi svolta in collaborazione con l'ufficio sperimentazione di CASE NEW HOLLAND Italia Spa, sede di Modena.
- CNH è leader nella produzione di trattori e macchinari agricoli in genere.
- Programma di sviluppo del comfort per il conducente del trattore, che include la minimizzazione del beccheggio del mezzo.



PROGETTARE UN MODELLO SIMULATIVO DEL TRATTORE PER DETERMINARE COME E QUANDO AVVIENE IL BECCHEGGIO

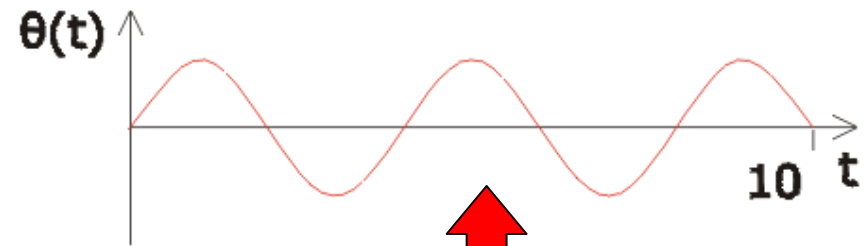
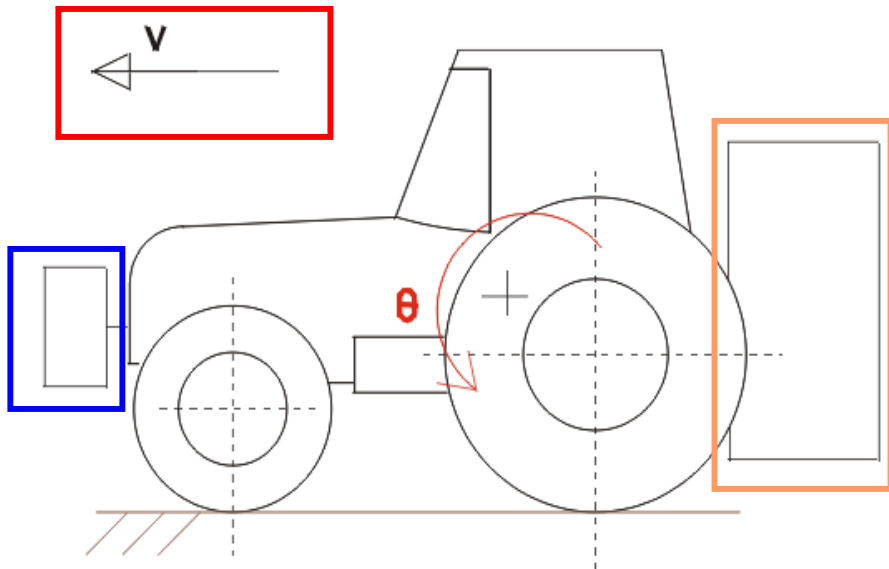
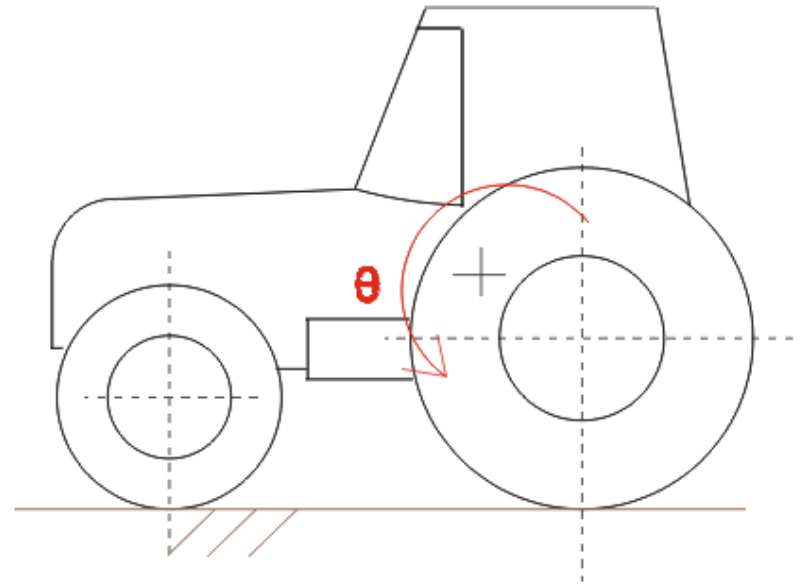
IL BECCHEGGIO

Il beccheggio è una rotazione della cassa del trattore nel suo piano laterale, attorno ad un asse ortogonale a tale piano.

Il beccheggio si manifesta a velocità di marcia specifiche.

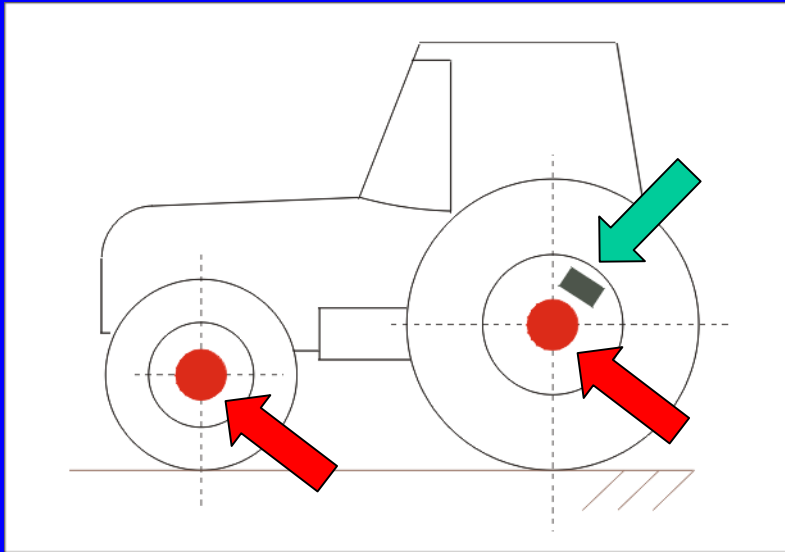
Esse dipendono dai caricamenti anteriore e posteriore.

$t = 10$



L'angolo di beccheggio varia nel tempo in modo periodico

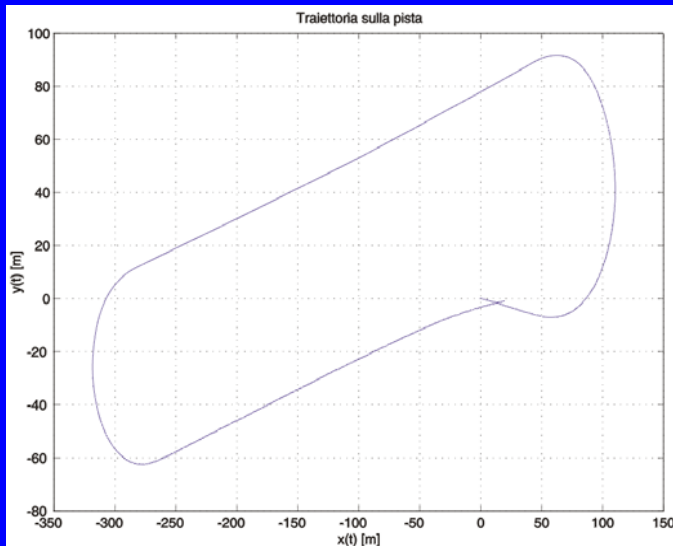
PROVE SPERIMENTALI



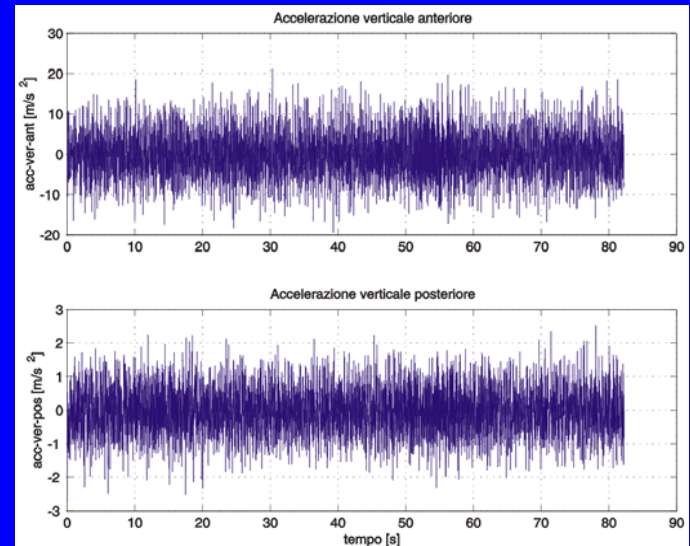
Sensori posizionati sul trattore durante le prove su circuito:

- 2 accelerometri, uno per ogni assale;
- 2 tachimetri, uno su ciascuna ruota posteriore.

Ricostruzione del circuito seguito:

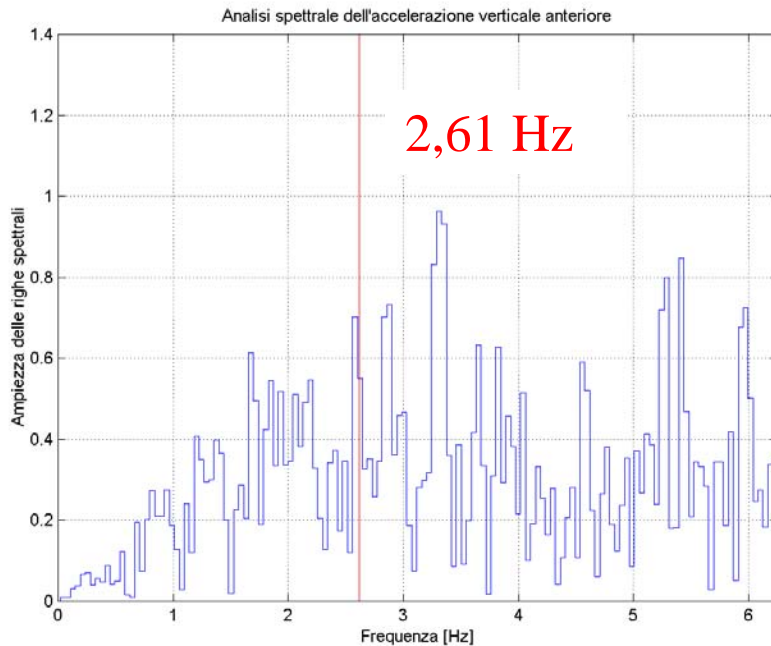


Andamento nel tempo dei dati forniti dagli accelerometri:

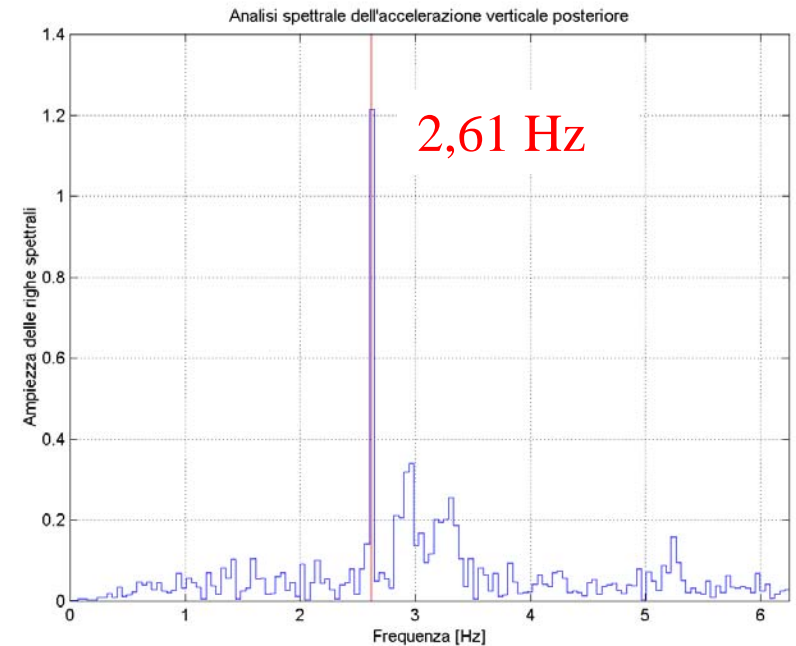


ANALISI SPETTRALE DEI DATI

Spettro delle ampiezze del segnale
accelerazione verticale ANTERIORE



Spettro delle ampiezze del segnale
accelerazione verticale POSTERIORE

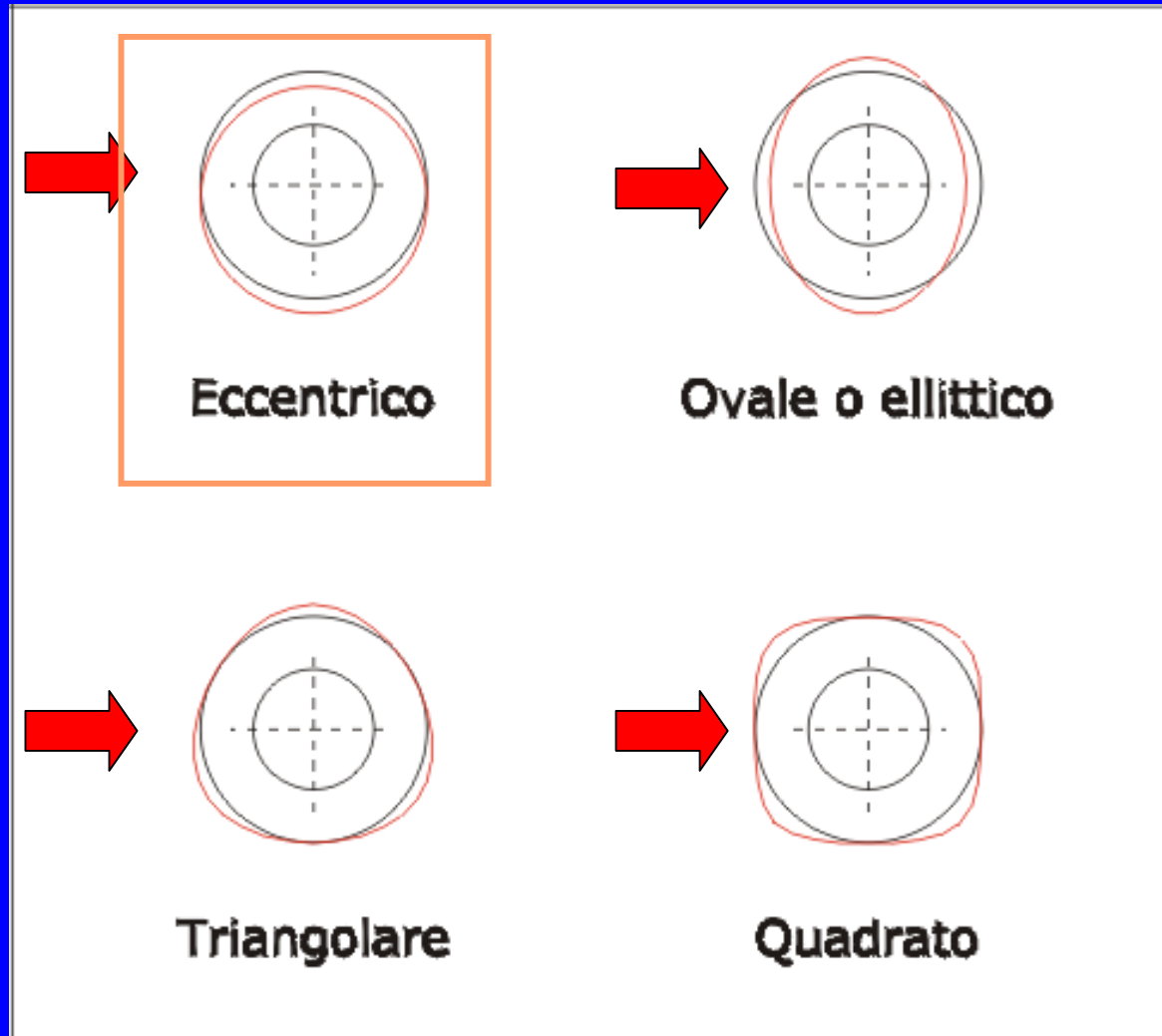


Nella prova analizzata, condotta a velocità costante, il picco di risonanza per l'accelerazione verticale dell'assale posteriore si trova esattamente in corrispondenza della frequenza di rotazione delle ruote posteriori: il trattore “sobbalza” sul posteriore

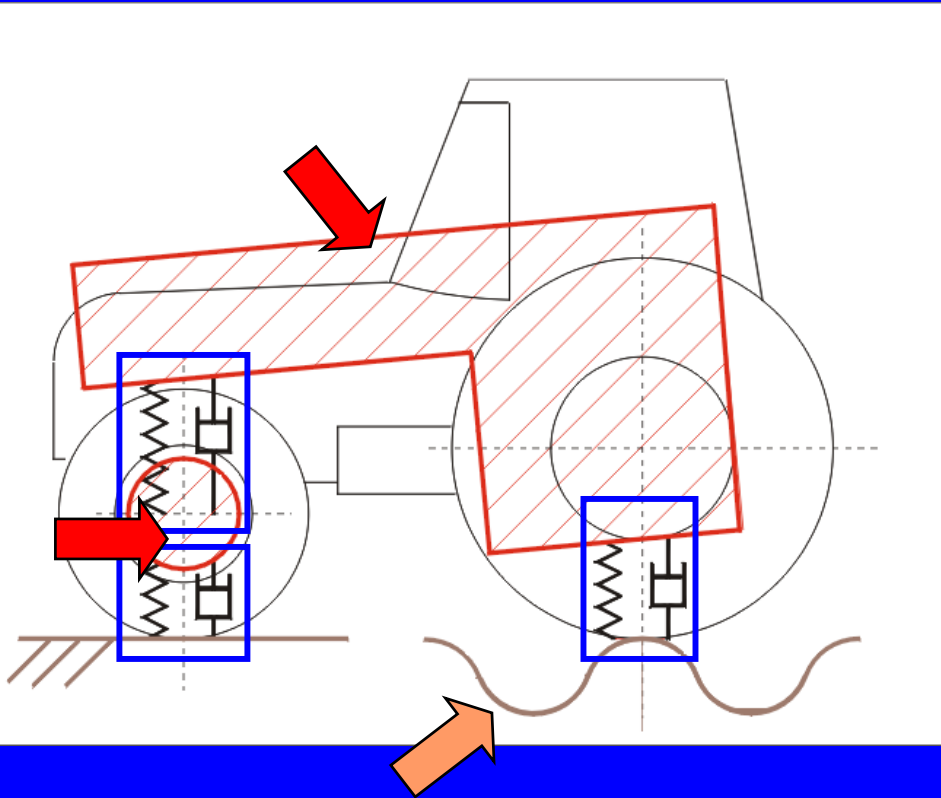
CAUSA DEL BECCHEGGIO

Ogni pneumatico è affetto da inevitabili imprecisioni costruttive. Il pneumatico può presentarsi lievemente:

La causa del beccheggio è l'eccentricità del pneumatico posteriore: essa rende periodica la traiettoria seguita dal centro ruota, con pulsazione proprio pari alla velocità angolare della ruota posteriore, così da sollecitare la risonanza dello spettro.



MODELLO A PARAMETRI CONCENTRATI



Il profilo del terreno assume un andamento periodico per simulare l'eccentricità del pneumatico posteriore.

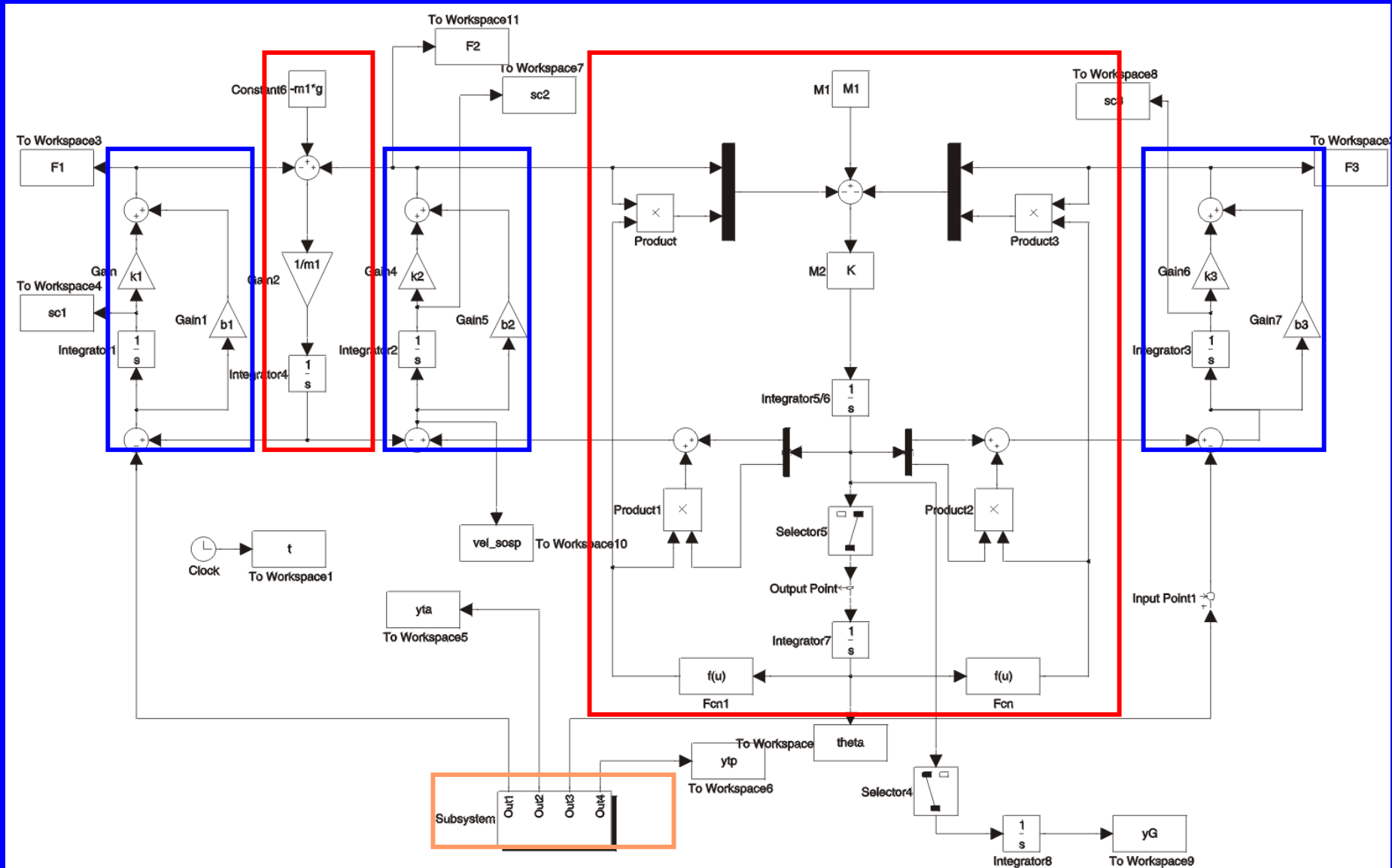
Il modello di riferimento è bidimensionale, ottenuto proiettando il trattore sulla vista laterale.

Le grandezze fisiche incluse sono:

- rigidità e smorzamento del pneumatico anteriore equivalente;
- rigidità e smorzamento del pneumatico posteriore equivalente;
- rigidità e smorzamento della sospensione che il trattore monta anteriormente;
- massa dell'assale e delle ruote anteriori;
- massa della cassa del trattore, dell'assale e delle ruote posteriori.

TRADUZIONE IN SIMULINK (SCHEMA DI BASE)

Primo schema simulink: tutte le rigidzze e gli smorzamenti sono costanti



LINEARIZZAZIONE NELL'INTORNO DEL PUNTO DI LAVORO

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (1)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & a \cos \theta_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -p \cos \theta_p & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{k_1}{m_1} & \frac{k_2}{m_1} & 0 & -\frac{(b_1 + b_2)}{m_1} & \frac{b_2}{m_1} & \frac{ab_2 \cos \theta_a}{m_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{k_2}{m_2} & -\frac{k_3}{m_2} & \frac{b_2}{m_2} & -\frac{(b_2 + b_3)}{m_2} & a_{56} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ -1 & \frac{b_1}{m_1} & 0 \\ -1 & 0 & \frac{b_3}{m_2} \\ 0 & 0 & -\frac{pb_3 \cos \theta_p}{J} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

I coefficienti $a_{i,j}$ sono così definiti:

$$\begin{aligned} a_{56} &= \frac{-ab_2 \cos \theta_a + pb_3 \cos \theta_p}{m_2}, & a_{62} &= -\frac{ak_2 \cos \theta_a}{J}, \\ a_{63} &= \frac{pk_3 \cos \theta_p}{J}, & a_{64} &= \frac{ab_2 \cos \theta_a}{J}, \\ a_{65} &= \frac{-ab_2 \cos \theta_a + pb_3 \cos \theta_p}{J}, & a_{66} &= \frac{-a^2 b_2 \cos^2 \theta_a - p^2 b_3 \cos^2 \theta_p}{J} \end{aligned}$$

Lo schema simulink precedente è non lineare.

Linearizzato nell'intorno del punto di lavoro si ottengono le equazioni (1) riportare a fianco:

- x è il vettore delle variabili di stato (9 componenti);
- u il vettore degli ingressi (3 componenti);
- y il vettore delle uscite (5 componenti).

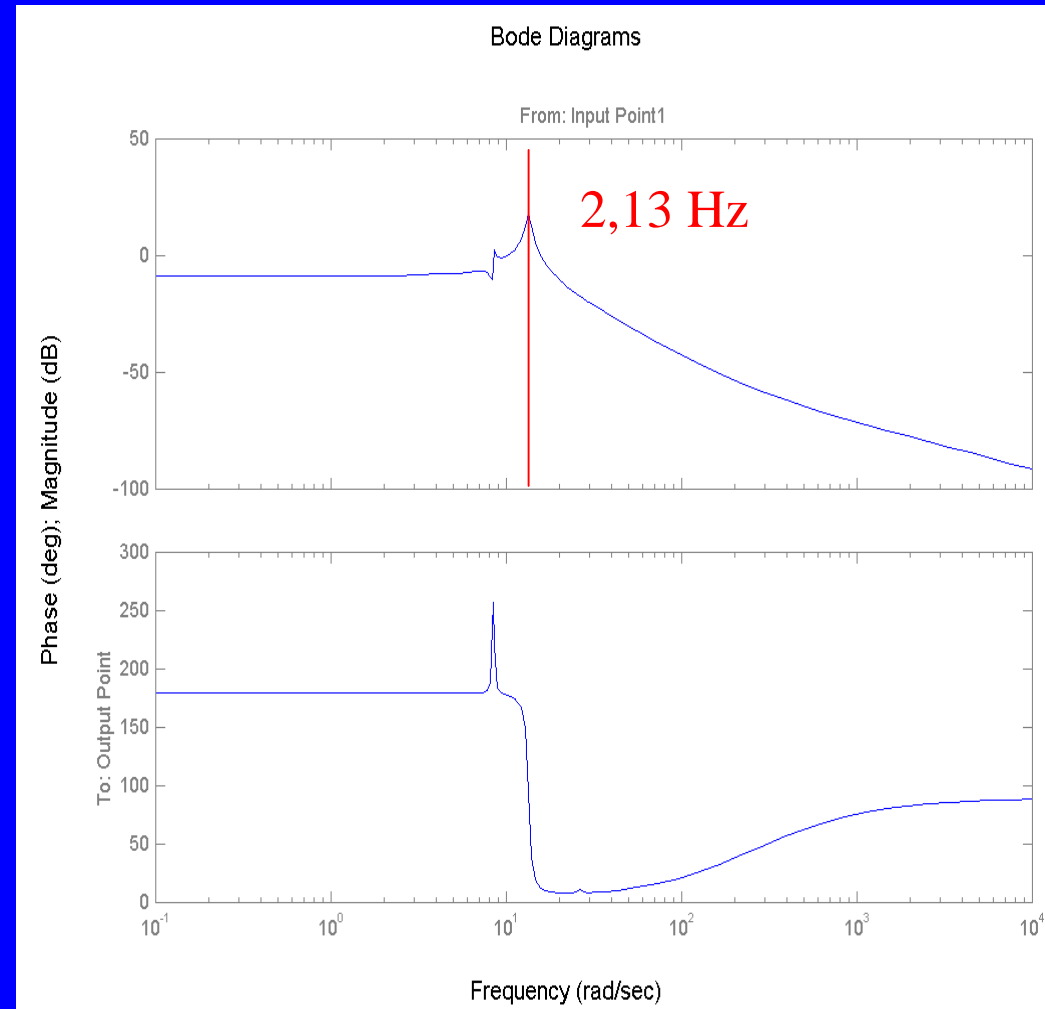
Il sistema lineare è caratterizzato da una matrice di trasferimento 3x5

DIAGRAMMI DI BODE

Si immettono nel sistema lineare (1) tutti i parametri necessari a descrivere proprio la prova su strada di cui si sono graficati i dati (geometria e distribuzione delle masse del trattore impiegato).

Si seleziona la funzione di risposta armonica fra il disturbo sotto il pneumatico posteriore e l'angolo di beccheggio.

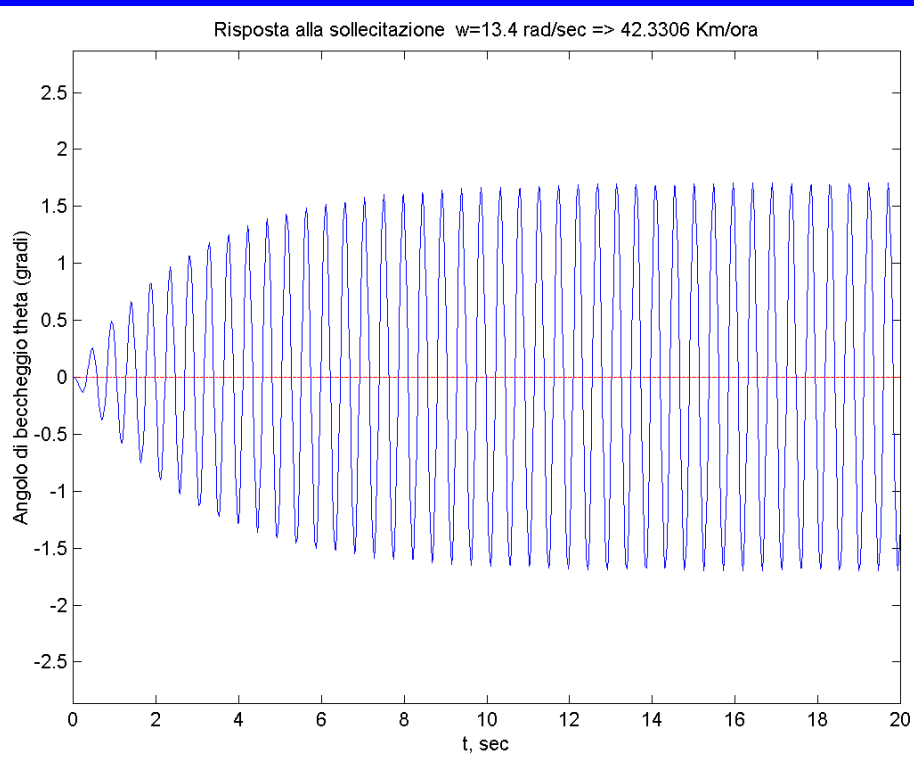
Se ne tracciano i diagrammi di Bode e si ritrova il picco di risonanza in prossimità della velocità angolare alla quale la ruota posteriore gira durante la prova su strada, ma non proprio su tal pulsazione.



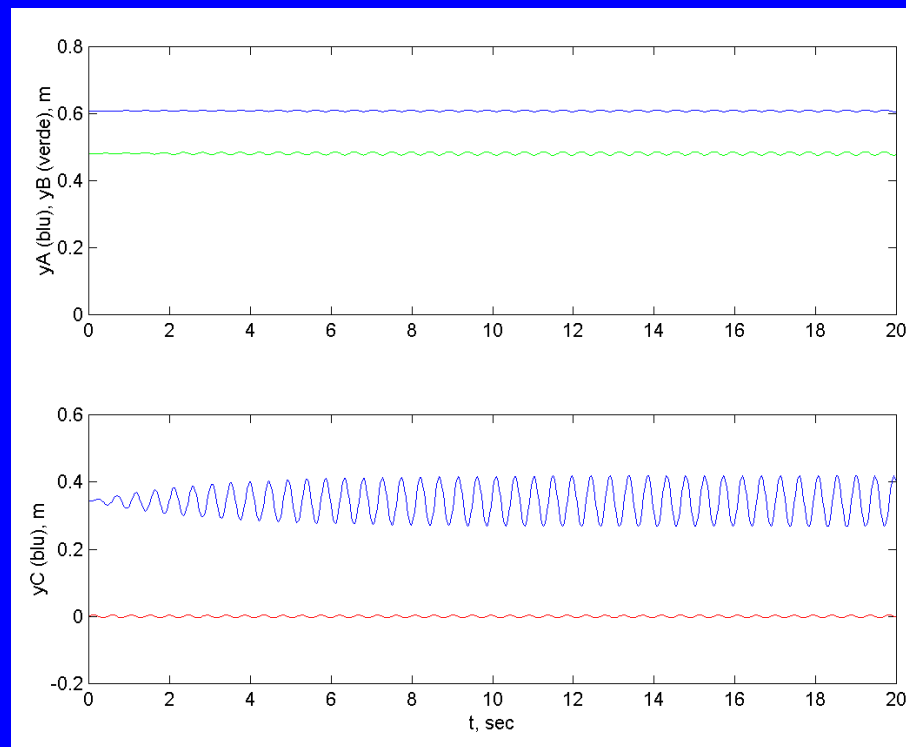
SIMULAZIONE

Lanciando una simulazione per una pulsazione del disturbo di 2,13 Hz possiamo osservare come variano alcune grandezze nel tempo:

Angolo di beccheggio pari a $1,5^\circ$



Schiacciamenti anteriori (in alto) e posteriori. Il trattore saltella sul posteriore, come nella prova su circuito.



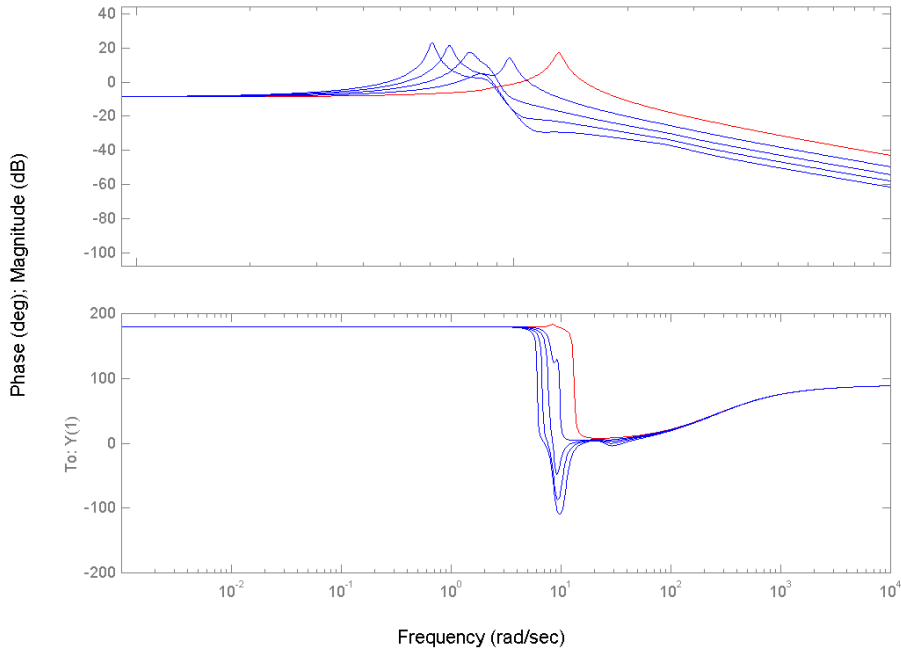
ANALISI PARAMETRICA

Variando un parametro per volta nel sistema lineare (1), si può osservare il modo in cui si sposta il picco di risonanza.

Variazione del carico posteriore del trattore. Più il carico cresce, più il picco si presenta a pulsazioni minori

Bode. Variazioni parametriche: m2p=[0:2:9]*1000

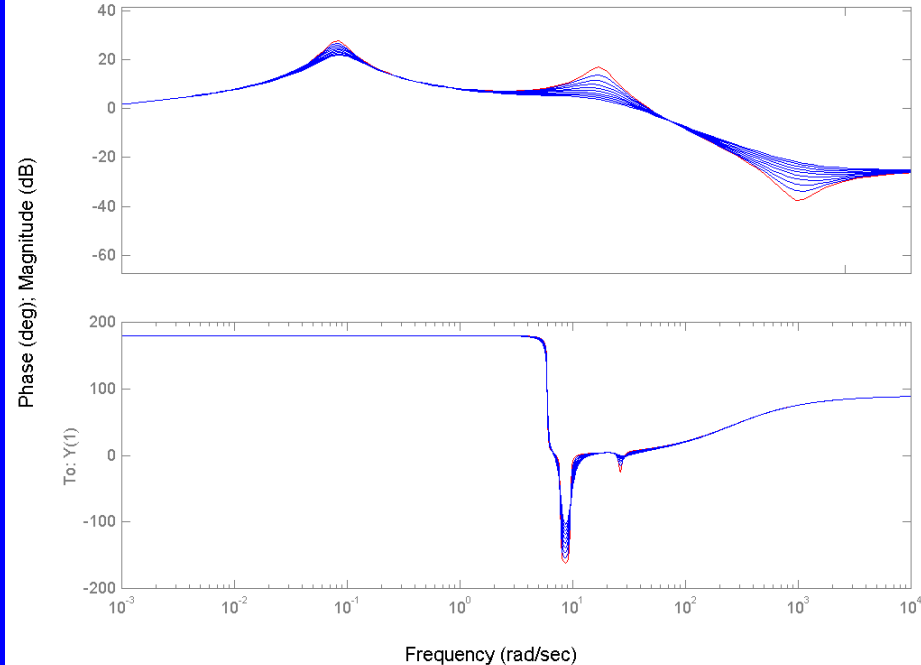
From: U(1)



Variazione dello smorzamento della sospensione. Più lo smorzamento cresce, più i picchi si smussano.

Bode. Variazioni parametriche: b2=[0.1:0.1:1]*10000

From: U(1)



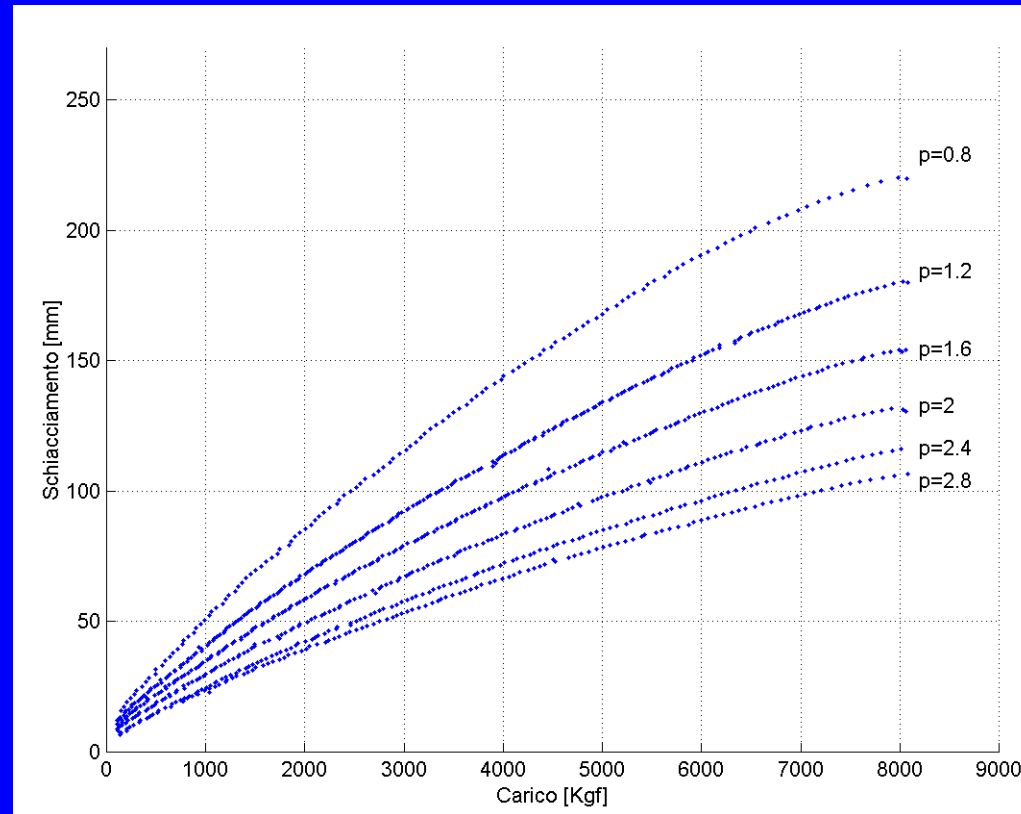
NON LINEARITA' (1): IL PNEUMATICO

La caratteristica carico-schiacciamento dei pneumatici non è lineare come si era supposto. Da prove sperimentali si sono ottenuti i grafici a fianco.

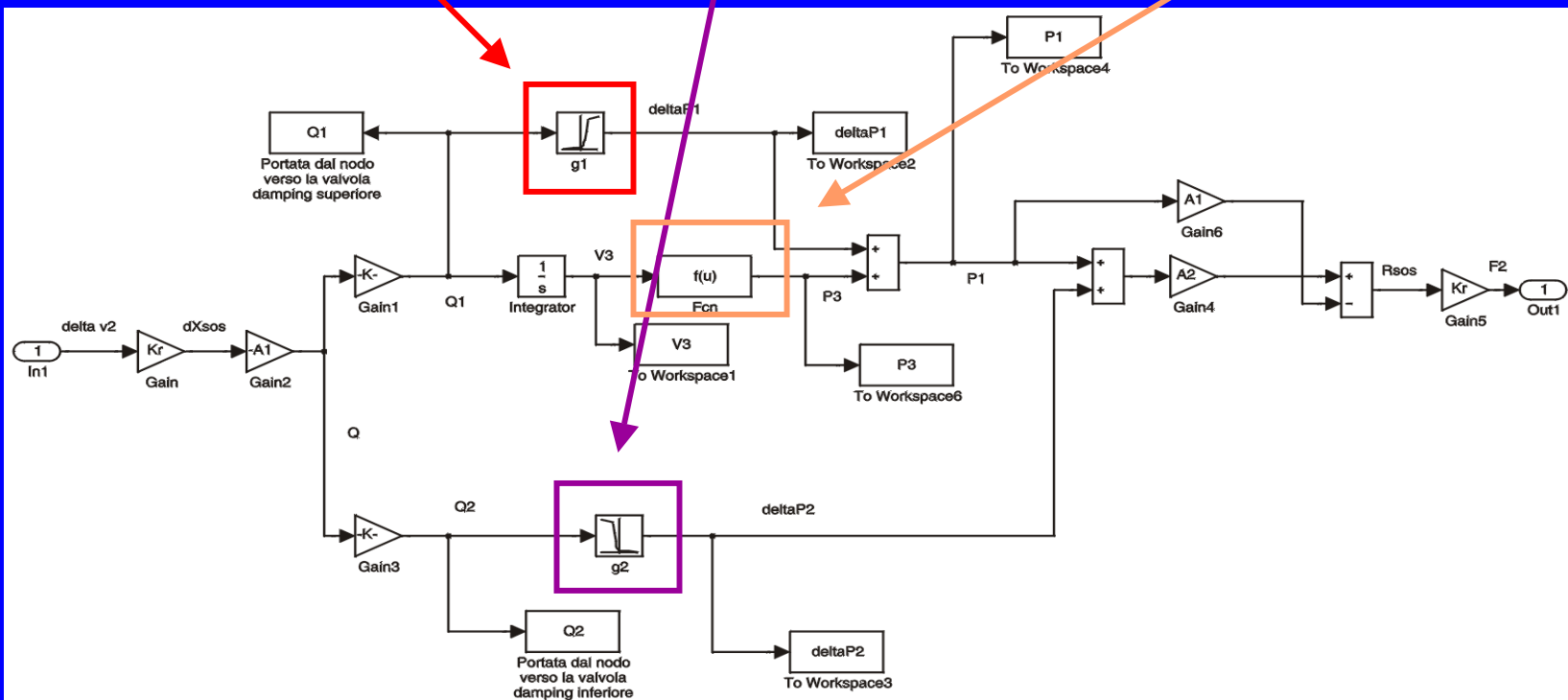
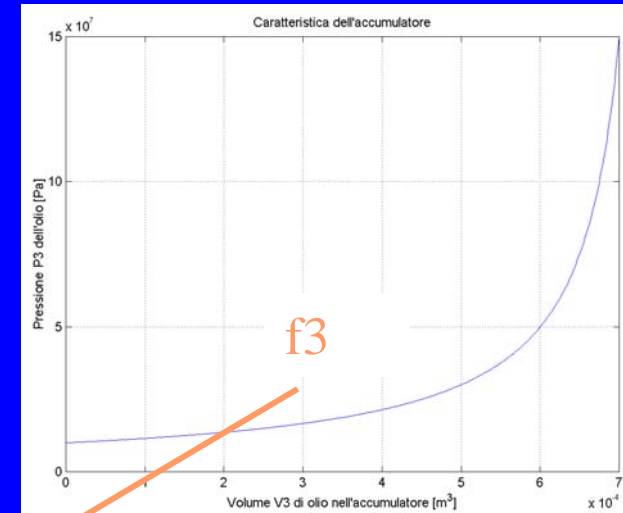
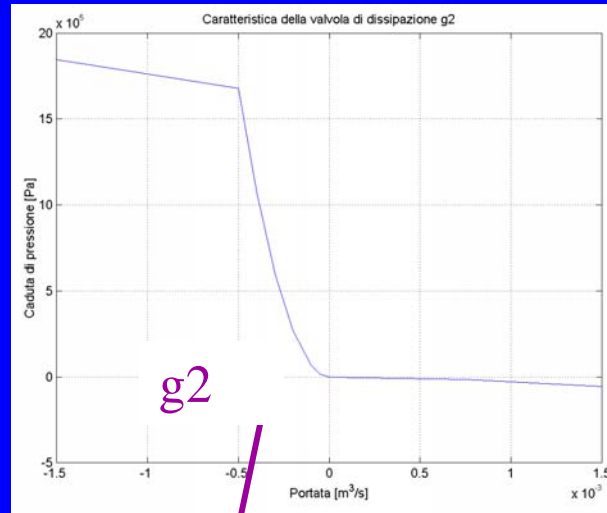
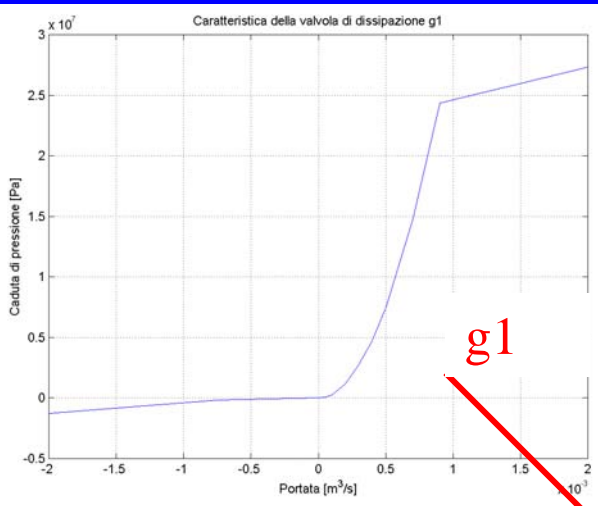
Da essi si è desunto che vale la seguente relazione:

$$k = \frac{Q^{1-A_2}(A_0 + A_1 p)}{A_2}$$

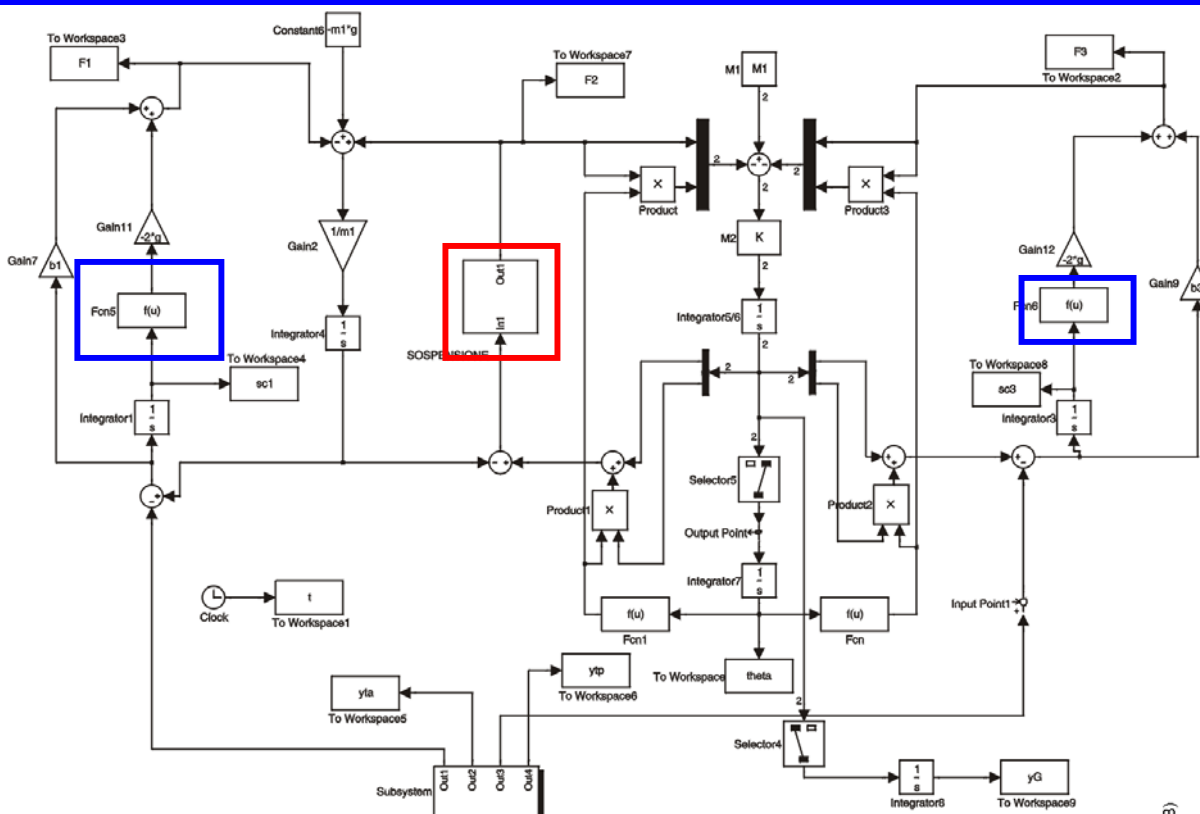
- k = rigidezza;
- Q = carico;
- A_1, A_2, A_3 parametri tipici di ogni pneumatico;
- p pressione di gonfiaggio;



NON LINEARITA' (3): LA SOSPENSIONE



SCHEMA SIMULINK EVOLUTO

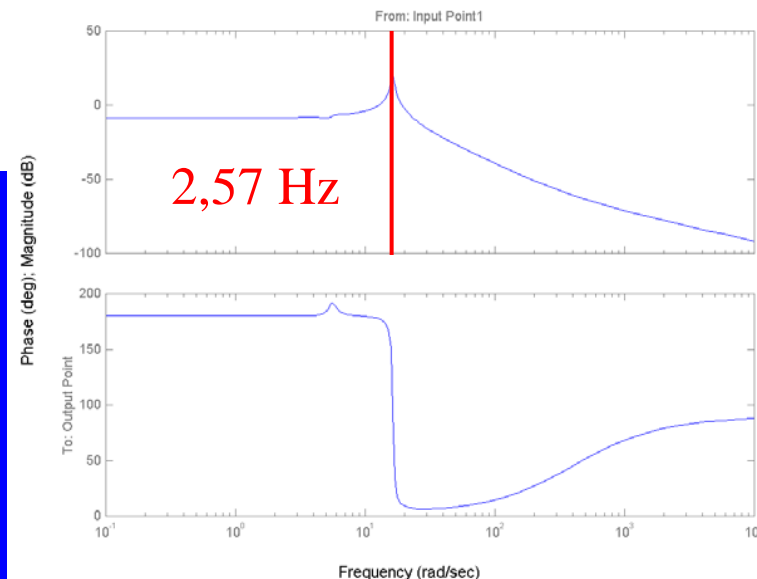


Nello schema simulink si sono inserite le non linearità:

- del pneumatico anteriore;
- del pneumatico posteriore;
- della sospensione nel sottosistema.

Attraverso il toolbox di “Linear analysis” di Matlab è ancora possibile tracciare i diagrammi di Bode. Se nello schema simulink si sono inseriti i parametri della prova su strada, il picco cade esattamente sulla pulsazione della velocità angolare della ruota posteriore

Bode Diagrams



CONCLUSIONI

- E' stato elaborato un modello di base del trattore che non comprendeva le non linearità principali.
- L'evoluzione del modello invece le include e i risultati ottenuti approssimano bene il comportamento reale di beccheggio del trattore.
- Il modello può essere ulteriormente migliorato prevedendo come varia lo smorzamento dei pneumatici (per ora ritenuto costante) in funzione del carico.
- Il passo futuro sarà progettare un controllore da inserire nel modello. Il controllore potrà ad esempio variare i parametri della sospensione in modo da spostare il picco di risonanza lontano dalla frequenza dell'eccitazione, oppure in modo da smussarlo.
- Se il controllore modifica attivamente la caratteristica dell'accumulatore, ad esempio variando la pressione dell'azoto, cambia la rigidità della sospensione.
- Se il controllore modifica l'apertura degli strozzatori, cambia lo smorzamento della sospensione. E' la soluzione che CNH pensa di seguire.

GRAZIE PER L'ATTENZIONE