POLITECNICO DI TORINO

Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Analisi e sperimentazione di un sistema di livellamento treno

Relatori

Prof. Massimo SORLI

Prof. Andrea DE MARTIN

Ing. Agostino DI PAOLA

Ing. Federico Andrea CORRADI

Candidato

Mariangela ALTAVILLA

2021/2022

Sommario

Quando si viaggia a bordo di un treno alta velocità vi è sempre la necessità di garantire comfort ai passeggeri durante la marcia, ma è anche necessario migliorare l'accesso al treno quando esso è in sosta in stazione, per favorire ad esempio, l'accesso ai passeggeri con limitate capacità motorie in modo autonomo. Questi obiettivi vengono perseguiti andando a migliorare le prestazioni e la gestione del sistema di sospensioni secondarie al fine di renderlo più sensibile alle necessità menzionate.
L'obiettivo del seguente elaborato, sviluppato in collaborazione con la **ALSTOM Ferroviaria SpA di Savigliano (CN)**, è quello di creare e validare un modello Matlab/Simulink di una sospensione secondaria, utilizzando un attuatore ad aria, che risponde a tutti i requisiti indicati in precedenza.
Ricevute come input le specifiche e i componenti del sistema e del banco, per creare il modello si definiscono tutte le equazioni che regolano i fenomeni fisici che avvengono durante l'azionamento. Si pone particolare attenzione al valore di alcuni parametri quali area e smorzamento dell'attuatore, effettuando prove per verificarne il loro valore.
Definiti tutti i parametri e le equazioni si procede a creare i blocchi del modello Simulink per ogni componente.
Per poter validare il modello è necessario in primo luogo sottoporre il modello (impianto pneumatico e controllore) e un banco di prova, di dimensioni scalate, a uguali input, confrontandone i risultati.
La validazione prosegue sul banco SW tramite integrazione del modello Simulink in ambiente *LabVIEW* per consentirne l'interfaccia con il software *Levelling* e quindi la gestione del controllore in anello chiuso come da specifica.
Le risposte vengono confrontate ancora con il comportamento del banco scalato.
In conclusione, analizzando le risposte ottenute nelle diverse fasi di verifica e validazione del modello Simulink, si determinano i possibili punti di miglioramento della modellazione Simulink, in modo da garantire una risposta più

fedele al comportamento reale del sistema in oggetto.

Indice

Elenco delle tabelle VII

Elenco delle figure VIII

Acronyms XI

1 Introduzione 1

2 Sistema di livellamento treno 2
2.1 Composizione sospensioni treno Alstom 6
2.2 Sistema elettro-pneumatico 9

3 Banco di prova 12

4 Modello Matlab-Simulink Sistema Levelling 16
4.1 Controllore 18
4.2 Elettrovalvola 20
4.3 Tubazioni Pneumatiche 23
4.4 Serbatoio e Attuatore ad Aria 28
4.4.1 Verifica area attuatore 31
4.4.2 Smorzamento attuatore 33
4.5 Raddoppio modello 35
4.6 Esecuzione prove modello 36
4.6.1 Funzionamento in anello chiuso 36
4.6.2 Funzionamento in anello aperto 39

5 Validazione modello simulink 43
5.1 Prova 1. Esecuzione prova test bench 45
5.2 Prova 1. Esecuzione prova simulink 47

5.3 Prova 2. Esecuzione prova test bench 50
5.4 Prova 2. Esecuzione prova simulink 51

6 Integrazione Modello Simulink in ambiente LabVIEW 54
6.1 Prove di validazione 60

7 Conclusioni 66

Bibliografia 70

A Matlab script 71

Elenco delle tabelle

4.1 Area Attuatore 31
4.2 Parametri modificabili anello chiuso 36
4.3 Parametri modificabili anello aperto 39

5.1 Parametri Controllore 43
5.2 Parametri Prova 1 45
5.3 Limiti parametri da specifica 51

6.1 Parametri Prova 004862 61

Elenco delle figure

2.1 Molle a balestra [2] 3
2.2 Molle ad aria. Soluzione 1 4
2.3 Molle ad aria. Soluzione 2 4
2.4 Sistema riferimento treno 7
2.5 BME Key Car 8
2.6 Composizione Sistema Leveling 10
2.7 Schema elettropneumatico 11

3.1 Banco di prova. LATO 1 13
3.2 Banco di prova. LATO 2 13
3.3 Schema banco di prova 13
3.4 Armadio elettrico 14
3.5 Coding Panel 15

4.1 Schema controllo sospensione secondaria 17
4.2 Controllore 18
4.3 Controllore simulink 19
4.4 Elettrovalvola 20
4.5 Blocco valvola 22
4.6 Elettrovalvola simulink 22
4.7 Piping 23
4.8 Tubazioni simulink 27
4.9 Serbatoio e Attuatore 28
4.10 Attuatore simulink 30
4.11 Variazione Area 32
4.12 Diagramma di corpo libero attuatore 33
4.13 Smorzamento attuatore 34
4.14 Modello doppia sospensione 35
4.15 Altezza di riferimento 37

4.16 Altezza 37
4.17 Pressione 38
4.18 Altezza Banco di prova 40
4.19 Pressione Banco di prova 40
4.20 Segnale comando valvola 41
4.21 Altezza anello aperto 41
4.22 Pressione anello aperto 42

5.1 Altezza banco di prova. Prova 1 46
5.2 Riferimento altezza. Prova 1 47
5.3 Confronto Altezza Prova 1 48
5.4 Confronto Pressione Prova 1 48
5.5 Confronto comandi valvola Prova 1 49
5.6 Altezza banco di prova. Prova 2 50
5.7 Confronto altezza Prova 2 52
5.8 Confronto comandi valvola Prova 2 53

6.1 Gestione sospensioni da BME 56
6.2 Interfaccia LabVIEW 58
6.3 Interfaccia Train Tracer 59
6.4 Comandi manuali sospensione 101 61
6.5 Altezza sospensione 101 62
6.6 Comandi manuali sospensione 102 62
6.7 Altezza sospensione 102 63
6.8 Comandi valvola prova 004921 64
6.9 Altezza prova 004921 65

Acronyms

BME

Boogie Monitoring Equipment

TCMS

Train Control Management System

101-PC1

Passengers Cars

Cmode

Modalità di funzionamento Levelling

Capitolo 1

Introduzione

Quando si viaggia a bordo di un treno alta velocità vi è sempre la necessità di garantire comfort ai passeggeri durante la marcia, ma è anche necessario migliorare l'accesso al treno quando esso è in sosta in stazione, per favorire ad esempio, l'accesso ai passeggeri con limitate capacità motorie in modo autonomo. Questi obiettivi vengono perseguiti andando a migliorare le prestazioni e la gestione del sistema di sospensioni secondarie al fine di renderlo più sensibile alle necessità menzionate.
L'obiettivo del seguente elaborato, sviluppato in collaborazione con la **ALSTOM Ferroviaria SpA di Savigliano (CN)**, è quello di creare e validare un modello Matlab/Simulink di una sospensione secondaria, utilizzando un attuatore ad aria, che risponde a tutti i requisiti indicati in precedenza.
Il sistema di sospensioni di un treno è composto da due sospensioni, una disposto tra ruote e carrello e una tra carrello e carrozzeria. Le sospensioni sono necessarie non solo per isolare la vettura da vibrazioni e urti, ma anche per ridurre le forza scambiate tra ruote e rotaie.
La sospensione secondaria è solitamente formata da molle ad aria e la qualità della guida, percepita dai passeggeri, è determinata dalla progettazione della sospensione stessa. Ad essa, infatti, viene affidato il compito di filtrare le frequenze che causano disagio dal telaio al carrello, mantenendo gli spostamenti della carrozzeria entro limiti accettabili [1].

Capitolo 2

Sistema di livellamento treno

Tutti i veicoli ferroviari usano carrelli per portare e guidare le carrozze lungo il binario. I carrelli ferroviari sono gli elementi che raggruppano funzioni necessarie a garantire la marcia del veicolo. Sul carrello sono montate le sospensioni, elemento di interfaccia tra il corpo del veicolo e le ruote, che servono a ridurre le vibrazioni percepite mentre il treno è in marcia. Il sistema di sospensioni è composto da una sospensione primaria, solitamente una molla ad elica, ed una sospensione secondaria, molla ad aria.
Il carrello è composto da un telaio su cui sono collegate sia le boccole mediante gli elementi della sospensione primaria che la cassa, tramite una struttura solidale ad essa, detta traversa oscillante, mediante gli elementi della sospensione secondaria.
Per garantire elasticità nelle varie direzioni ed un certo grado di smorzamento si agisce sull'apparato delle sospensioni. Esistono diverse soluzioni:

1. Sospensione primaria
   - Verticale
   - Laterale
   - Longitudinale
2. Sospensione secondaria
   - Verticale
   - Laterale

- Longitudinale
- Rollio
- Imbardata

I primi veicoli usavano come sistema di smorzamento molle a balestra come mostrato in Figura 2.1, montate sugli assali del veicolo. Alla sospensione era consentito solo un movimento verticale.

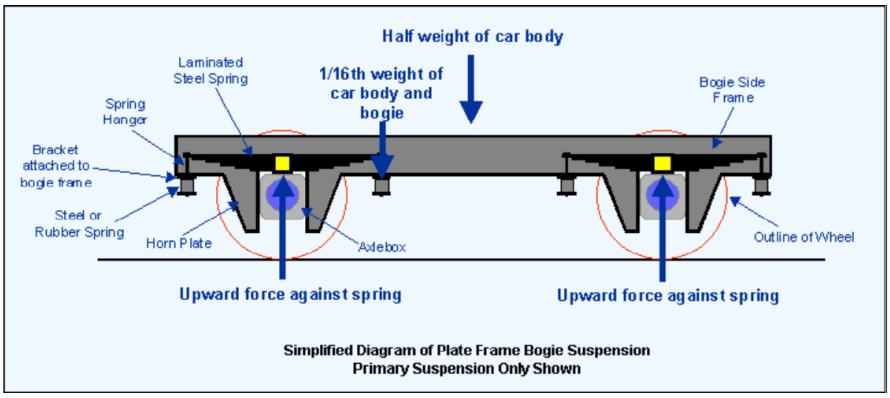

Figura 2.1: Molle a balestra [2]

Con lo sviluppo dei veicoli a telaio rigido si è avuta una modifica del sistema sospensione. Tale sistema prevedeva l'uso di molle a balestra e una sospensione secondaria tra la carrozzeria e il carrello. La sospensione secondaria era montata trasversalmente al centro.
Negli anni '60 comparve, per la prima volta, l'uso dell'aria compressa nel sistema di sospensione. Al giorno d'oggi le sospensioni pneumatiche sono uno standard per i treni; che, oltre a fornire una guida migliore, hanno la capacità di generare un segnale accurato di carico/peso che può essere usato per modificare l'accelerazione e la frenata di un treno a unità multiple.
Le molle ad aria sono elementi costituiti da un soffietto in gomma telata, accoppiato ad elementi metallici con lo scopo di vincolare l'espansione della parte in gomma e permettere il suo fissaggio. L'obiettivo principale del soffietto è quello di contenere una colonna d'aria compressa di cui si sfruttano le caratteristiche fisiche legate alla dinamica del gas.
L'uso di una molla ad aria ha una serie di vantaggi:

- Variazione del carico mantenendo l'altezza costante
- Rigidezza crescente con la pressione

- Controllo altezza
- Elevato smorzamento intrinseco.

Purtroppo però ci sono anche una serie di svantaggi:

- Instabilità nel caso di carichi e spostamenti laterali elevati
- Incapacità di espletare le sue funzioni in caso di guasti all'impianto pneumatico.

La sospensione ad aria può essere montata nel mezzo del carrello (Figura 2.2), oppure lateralmente (Figura 2.3), prevedendo due sospensioni per lato.

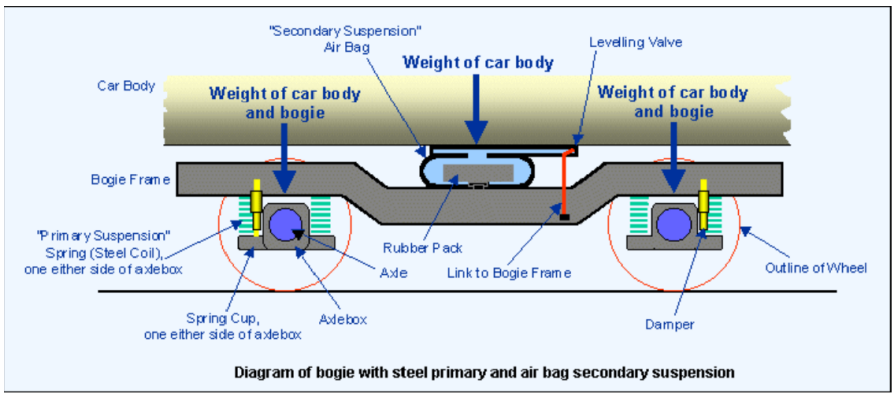

Figura 2.2: Molle ad aria. Soluzione 1

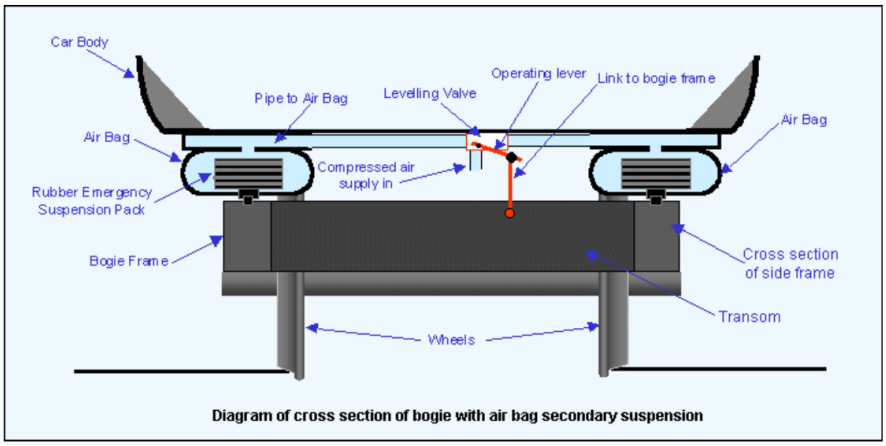

Figura 2.3: Molle ad aria. Soluzione 2

Nella prima soluzione l'aria compressa viene immessa nel cuscino attraverso una valvola di livellamento, attaccata nella parte inferiore della carrozzeria. La valvola è azionata da una leva che ha un'estremità collegata con il condotto dell'aria di alimentazione, mentre l'altra estremità è fissata al telaio del carrello. Qualsiasi movimento verticale tra carrozzeria e carrello viene rilevato dalla leva, che regola di conseguenza la valvola di livellamento. Quando il carico sul vagone viene modificato, a causa dei passeggeri che salgono e scendono in stazione, il peso della carrozzeria varia e la valvola di livellamento regola la pressione dell'aria nel cuscino. L'effetto è che si mantiene un'altezza quasi costante dal livello delle rotaie, indipendentemente dal carico.
Nella seconda soluzione si nota che all'interno di ogni molla ad aria è presente una molla di emergenza per mantenere in funzione il sistema di sospensioni, nel caso dovesse esserci un gusto nella sospensione ad aria. Per una maggiore stabilità del sistema, fino ad oggi, la variazione dell'altezza della sospensione ad aria era effettuata solo con treno in sosta; invece, con lo sviluppo della tecnologia e la presenza di controllori sempre più precisi nel mercato, si stanno sviluppando delle tecniche che permettono la modifica dell'altezza anche quando il treno è in marcia.

2.1 Composizione sospensioni treno Alstom

Il sistema di sospensioni analizzato nella tesi in oggetto, è composto da:

1. Sospensione primaria con molla ad elica
2. Sospensione secondaria con molla ad aria.

La caratteristica peculiare del sistema sviluppato da ALSTOM è la possibilità di eseguire un'operazione di livellamento che permetta la gestione dell'altezza dell'intero veicolo rispetto ad una altezza predefinita, sia in condizioni di marcia che in sosta treno. Questo sistema, quindi, oltre a garantire il facile accesso ai viaggiatori in fase di sosta in stazione, soprattutto per gli utenti con problemi di mobilità, garantisce anche un maggiore comfort nelle fasi di marcia.
La modifica dell'altezza del veicolo viene eseguita tenendo conto di una serie di parametri come:

- Consumo ruote veicolo
- Altezza sospensione primaria
- Altezza sospensione secondaria
- Carico.

Noti questi parametri e il valore di target da raggiungere si va a modificare l'altezza della molla ad aria attivando le opportune valvole.
La gestione dell'altezza è affidata al BME (Boogie Monitoring Equipment), in cui è contenuto il software *Levelling* che si occupa del livellamento treno. Tale software, dopo aver ricevuto dalla centralina elettronica TCMS (Train Control Management System) il valore target da raggiungere, provvede a modificare l'altezza della sospensione secondaria intervenendo sulle elettrovalvole.
Poichè un treno può procedere in entrambi i sensi di marcia, è necessario individuare un veicolo centrale (Key Car) che faccia da punto di riferimento. Il treno rispetto al suo punto di riferimento è un elemento di tipo speculare (Figura 2.4).

Ogni carrello è condiviso da due carrozze, ad accezione delle locomotive che non soggette a livellamento. La gestione dei carrelli è affidata ad un singolo BME che è in grado di gestire l'altezza della sospensione destra e sinistra rispettivamente di due carrozze adiacenti. La comunicazione tra

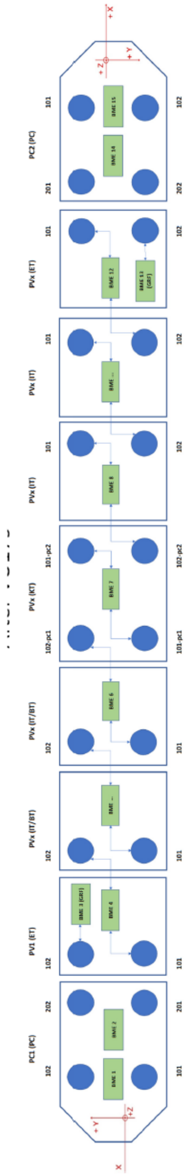

Figura 2.4: Sistema riferimento treno

due sospensioni appartenenti alla medesima carrozza è per via pneumatica, mediante l'uso di una valvola differenziale. Ovviamente tutti i BME comunicano tra loro attraverso protocollo CAN, in modo da massimizzare il controllo del treno. In caso di guasto di un BME il livellamento viene assicurato dalla presenza della valvola differenziale.
Fa eccezione la Key Car (Figura 2.5) in cui il BME-7 controlla le sospensioni

101-pc1 e 101-pc2 appartenenti alla stessa carrozza, mentre le sospensioni 102-pc1 e 102-pc2 sono controllate dal BME della carrozza precedente e successiva, rispettivamente dal BME-6 e BME-8.

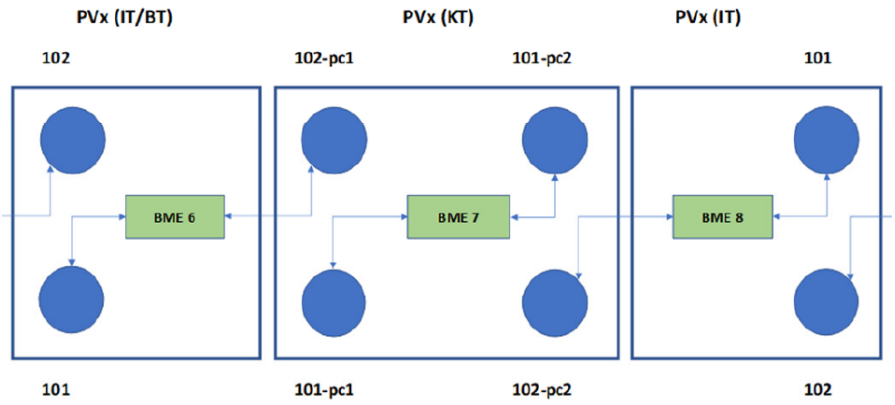

Figura 2.5: BME Key Car

La funzione di levelling ha undici modi di funzionamento, molti dei quali hanno lo scopo di verificare il funzionamento del sistema. I principali sono:

- **Cmode = 0: Running mode** in cui si va a comandare l'elettrovalvola per mantenere l'altezza della sospensione secondaria al valore nominale.
- **Cmode = 1: Station mode** in cui le valvole sono controllate per mantenere l'altezza della sospensione secondaria al valore tale da correggere le dispersioni. Le correzioni tengono conto dell'evoluzione del carico e le conseguenze della sua variazione sulla sospensione primaria.
- **Cmode = 2: Preparation to running mode** in cui le valvole sono controllate per far raggiungere alla sospensione secondaria il valore di altezza nominale.

2.2 Sistema elettro-pneumatico

Per poter attuare la funzione di livellamento del sistema è necessario agire sulle elettrovalvole che permettono il riempimento delle molle ad aria.
La funzione di livellamento va ad agire su un sistema (Figura 2.6) composto da:

- Elettrovalvola 3 posizioni 3 vie ad azionamento elettrico, tensione 110 V
- Serbatoio disposto a monte della sospensione secondaria per garantire continuità nell'alimentazione della sospensione
- Sospensione primaria a molla
- Sospensione secondaria a singolo cuscino
- Ruota
- High stop valve: valvola di sicurezza che si apre quando la sospensione ha raggiunto un'altezza massima
- Low stop garantisce che la sospensione non venga completamente sgonfiata quando la sospensione è in condizioni di altezza minima.

Il BME va ad agire contemporaneamente su due sistemi come quelli rappresentati in Figura 2.6, mentre il livellamento di due sospensioni appartenenti alla stessa carrozza avviene mediante una valvola differenziale, come visibile nello schema elettropneumatico, Figura 2.7.

Dal modello elettropneumatico, che rappresenta il circuito reale presente a bordo treno, si evince che la condotta di alimentazione (azzurra in figura) mette in pressione le condutture che vanno poi ad alimentare le due elettrovalvole. Quando le elettrovalvole ricevono il segnale in tensione che le comanda in apertura, la condotta di alimentazione viene messa in comunicazione con i serbatoi e i cuscini da sollevare. Se gli attuatori dovessero raggiungere un'altezza superiore al valore consentito, le valvole a comando meccanico VV(FC) vengono azionate mettendo in scarica le condutture, facendo diminuire la pressione negli attuatori e la loro relativa altezza. Tra le due sospensioni sono presenti due valvole differenziali che servono a garantire un equilibrio di pressione tra i due rami.
L'intero sistema viene quindi controllato andando a creare un sistema in anello chiuso in cui si interviene sull'elettrovalvola con un comando.

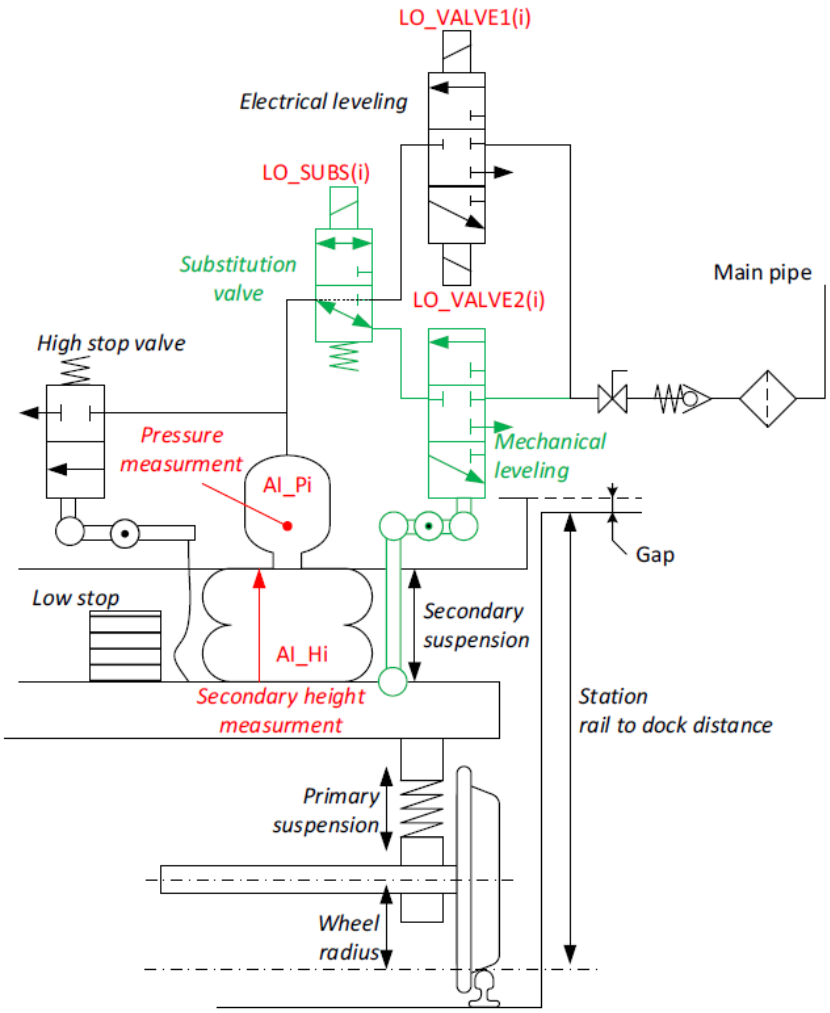

Figura 2.6: Composizione Sistema Leveling

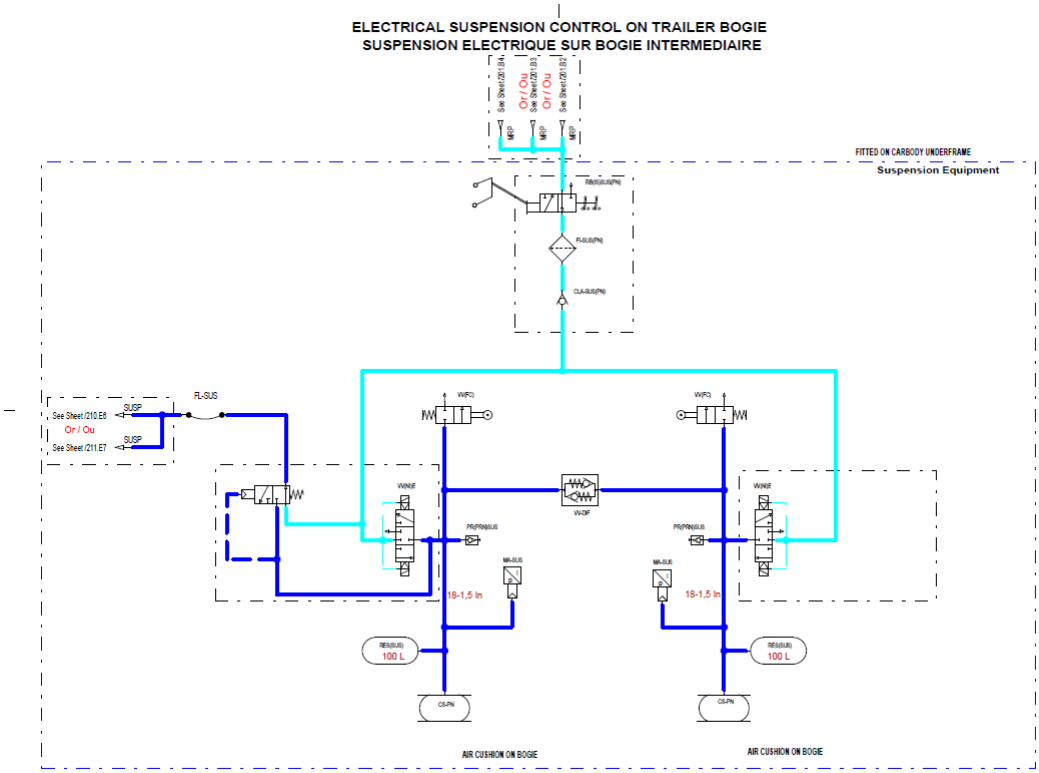

Figura 2.7: Schema elettropneumatico

Capitolo 3

Banco di prova

Il banco di prova sito presso il laboratorio Esperienze del sito Alstom in Savigliano, viene presentato mediante la trattazione dei componenti di cui esso si costituisce. Esso si sviluppa su un basamento in cui sono presenti:

- Due elettrovalvole NORGREN ISO 1 5/3 COP
- Due serbatoi da $V = 10$ l
- Due attuatori ad aria CONTINENTAL SZ 35-11
- Due encordes BAUMER EAM580R-SC
- Una valvola differenziale
- Due valvole di sicurezza high stop pneumatiche
- Una valvola di emergenza
- Due valvole di sicurezza e rubinetti d'arresto
- Pesi da 20.5 kg ognuno

Il banco di prova realizzato è una riproduzione in scala del sistema di sospensioni presente a bordo treno, per consentire una migliore esecuzione di prove atte alla validazione dei vari software che gestiscono il funzionamento dell'apparato. Il banco di prova utilizzato per l'esecuzione di tali prove è rappresentato in Figure 3.1 e 3.2, mentre il rispettivo schema pneumatico è rappresentato in Figura 3.3.

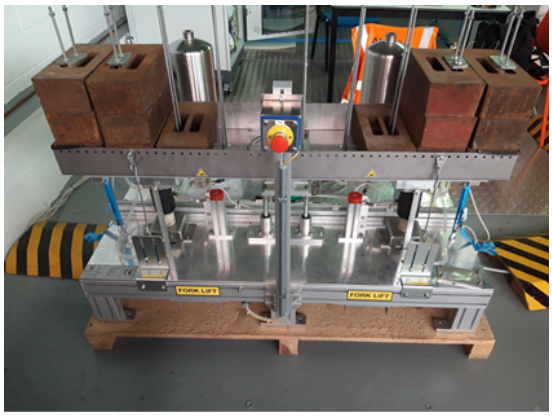

Figura 3.1: Banco di prova. LATO 1

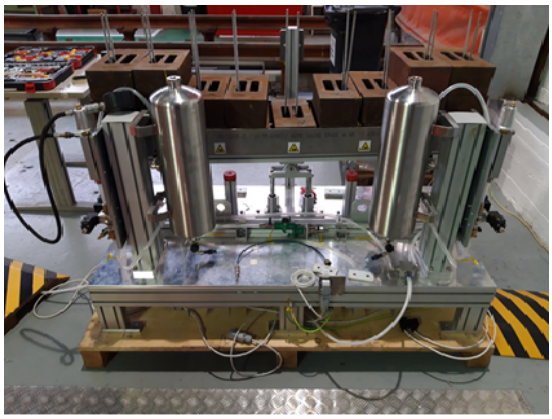

Figura 3.2: Banco di prova. LATO 2

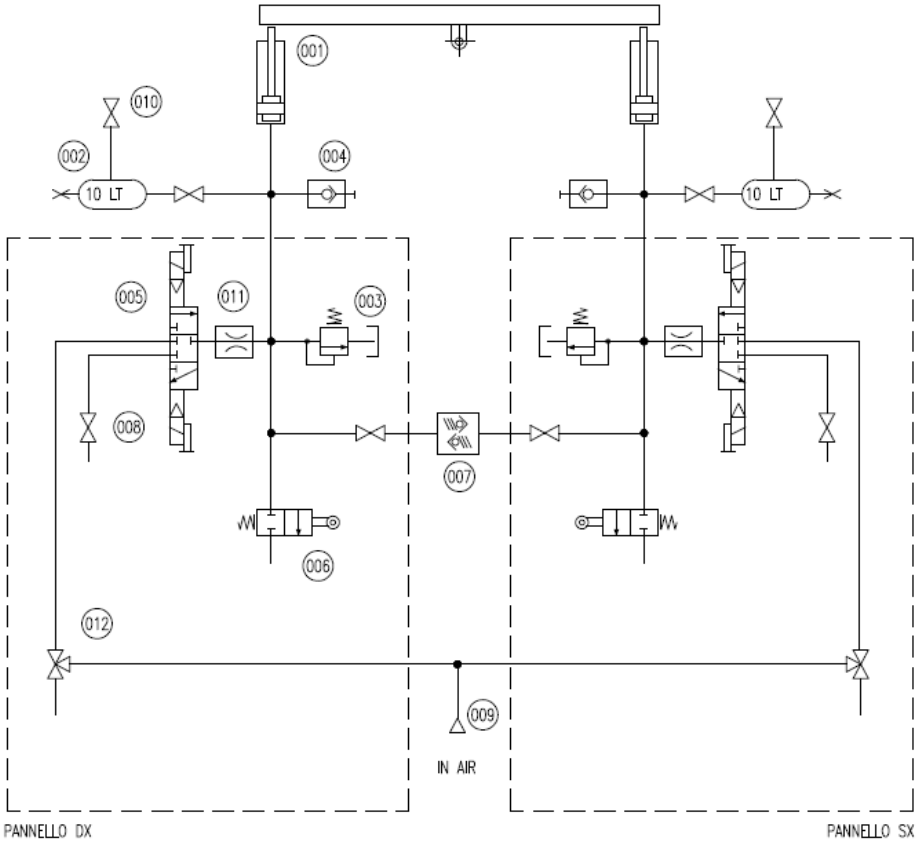

Figura 3.3: Schema banco di prova

La gestione del banco è eseguita inviando le informazioni all'unità di controllo situata all'interno dello scaffale dei comandi (Figura 3.4).

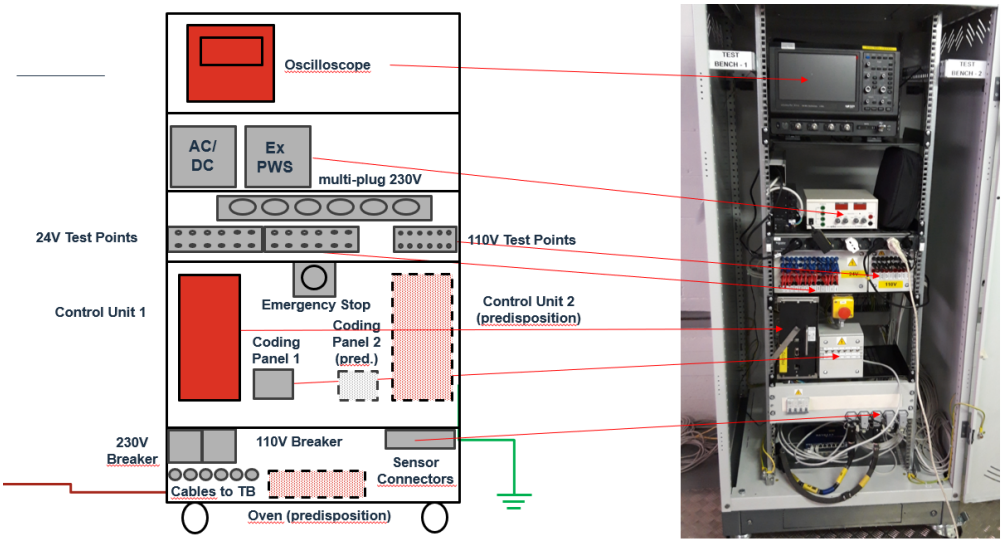

Figura 3.4: Armadio elettrico

Lo scaffale dei comandi si compone di :

- Oscilloscopio
- Ex PWS
- Test point a 24 V e 110 V
- Pulsante di emergenza
- Control Unit
- Coding panel
- Sensor connettor

Per eseguire il caricamento dei comandi BME nelle opportune Control Unit si sfrutta una connessione mediante cavo ethernet; allo stesso tempo bisogna a configurare il sistema per identificare il BME che si sta simulando, questa operazione è eseguita in modo manuale andando ad agire su opportuni interruttori nel coding panel Figura 3.5. Dallo scaffale di comando si evidenzia la presenza di connettori che trasportano i segnali provenienti dalle sonde che

simulano la sonda temperatura dell'olio nella boccola e i sensori di misura altezza (encoder).

Figura 3.5: Coding Panel

Il sistema è predisposto per poter inserire in futuro, una seconda Control Unit in modo da simulare il funzionamento in contemporanea di due BME, quindi di quattro sospensioni.

Capitolo 4

Modello Matlab-Simulink Sistema Levelling

Per consentire una simulazione accurata del comportamento del sistema di sospensioni secondarie è stato sviluppato un modello Matlab/Simulink. Questo è una riproduzione del banco presente in Savigliano, quindi con dimensioni scalate rispetto al sistema che ritroviamo a bordo treno.
Per lo sviluppo sono state effettuate una serie di ipotesi semplificative:

- BME controlla il livellamento di una singola sospensione
- Assenza di collegamento meccanico-pneumatico tra due sospensioni della stessa carrozza
- Il modello riproduce l'azionamento di un singolo attuatore/cuscino.

Il modello sviluppato riproduce l'azionamento dell'elettrovalvola, in fase di carico o scarico della sospensione secondaria, attraverso un controllo in anello chiuso. In base al valore di altezza ricevuto come input e all'altezza misurata sulla sospensione si va a calcolare un errore per differenza. Se l'errore è positivo, quindi altezza di input maggiore dell'altezza di feedback, l'elettrovalvola viene azionata in apertura con fase di carico, se l'errore è negativo allora si aziona l'elettrovalvola in apertura, ma in fase di scarico. Se l'errore è nullo, con una precisa tolleranza, non si agisce sul comando dell'elettrovalvola. I componenti considerati sono un sottogruppo del sistema in Figura 4.1:

- Elettrovalvola (005)

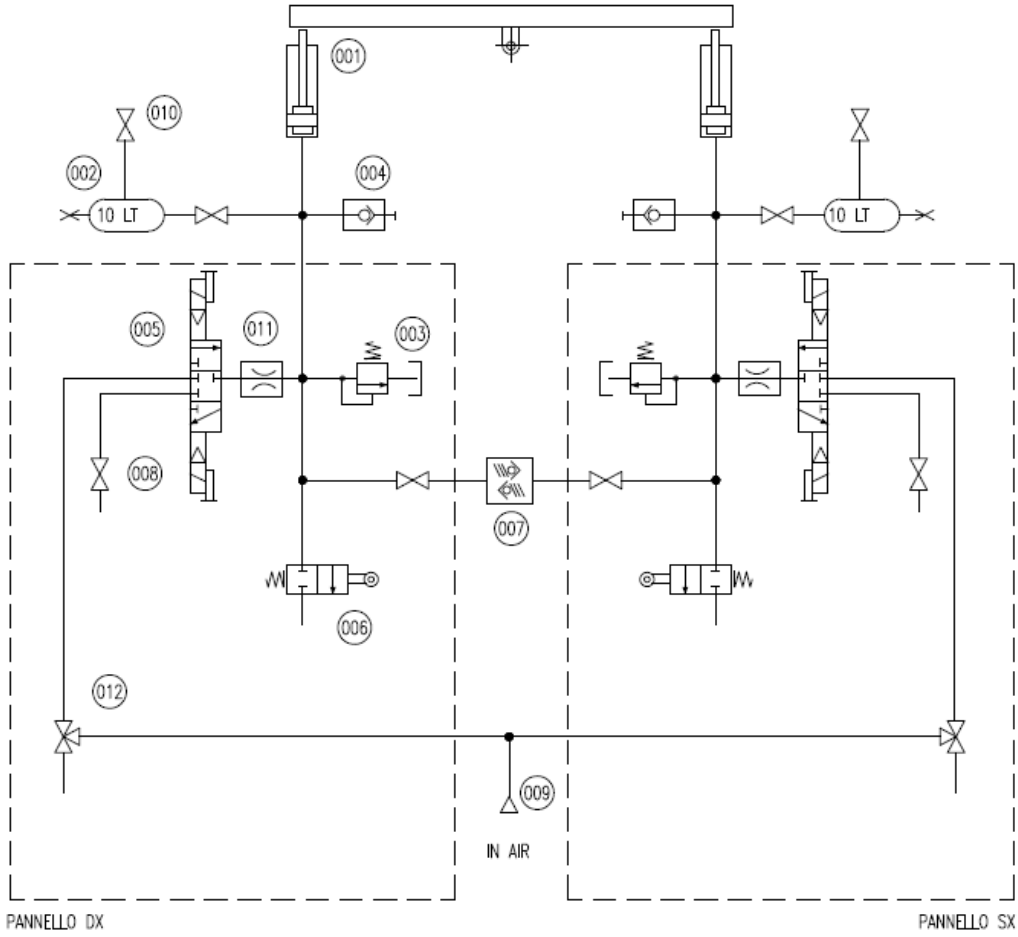

Figura 4.1: Schema controllo sospensione secondaria

- Tubazioni pneumatiche
- Serbatoio (002)
- Attuatore a soffietto (001)

La creazione del modello è stata eseguita andando ad analizzare i singoli componenti, ricavando per ognuno di loro le equazioni matematiche che regolano i vari fenomeni fisici [3].

4.1 Controllore

Il controllore è il componente principale del sistema, in quanto in base al segnale da esso generato si va a variare l'altezza della sospensione secondaria. Lo scopo del controllore è quello di andare a confrontare due valori di altezza, uno ricevuto come input dal BME e un secondo proveniente dal sensore di misura presente sulla sospensione. Calcolata la differenza tra il valore di riferimento e il valore di feedback è possibile determinare l'errore 4.1. Determinato il valore di errore, il controllore (Figura 4.2) può intervenire inviando tre tipologie di segnali all'elettrovalvola:

- **Admission**: elettrovalvola riceve un segnale di tensione positivo, quindi l'attuatore è in fase di carica
- **Holding**: elettrovalvola è bloccata, non vi è passaggio di aria
- **Release**: elettrovalvola riceve un segnale di tensione negativo, quindi l'attuatore è in fase di scarico

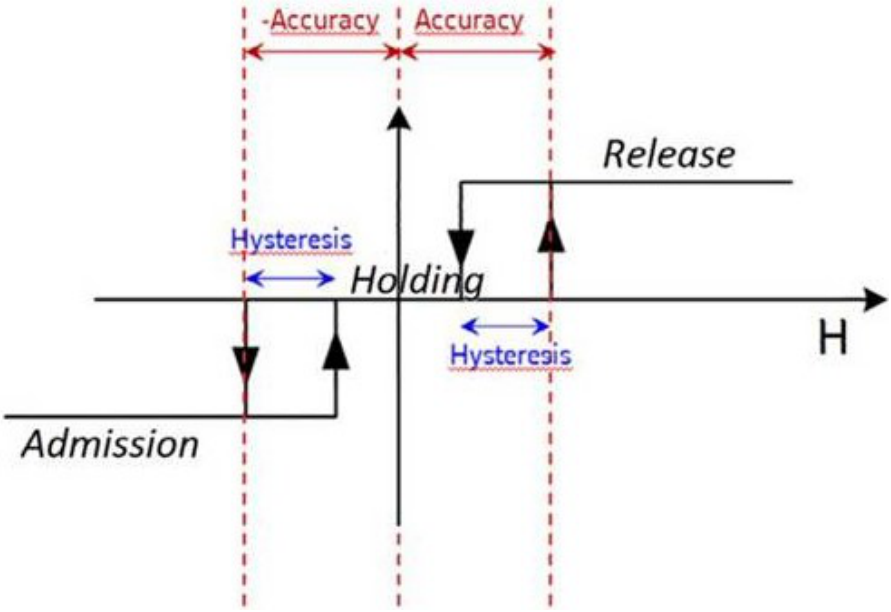

Figura 4.2: Controllore

$$e = h_{feedback} - h_{input} \tag{4.1}$$

La transizione tra i diversi stati è controllata sulla base di valori di accuracy che variano in base al modo di funzionamento del sistema (Cmode). I valori di isteresi sono imposti uguali a quelli di accuracy, ovvero l'arresto del rilascio e l'arresto dell'ammissione, quando viene raggiunta l'altezza target.
Il blocco realizzato in simulink rappresentante il controllore è mostrato in Figura 4.3.

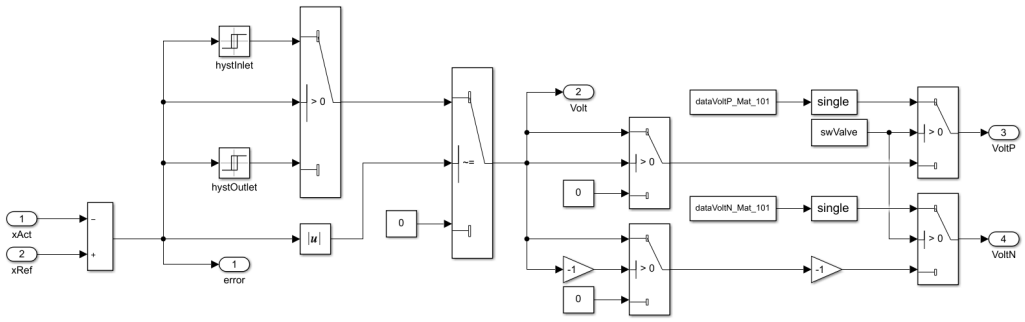

Figura 4.3: Controllore simulink

4.2 Elettrovalvola

L'elettrovalvola è il componente che permette, grazie alla sua commutazione il passaggio dell'aria compressa e quindi l'aumento o diminuzione dell'altezza della sospensione secondaria. Essendo una valvola a comando elettrico, la sua commutazione avviene quando riceve come input il segnale in tensione proveniente dal controllore. Questo elemento è ha tre modalità di funzionamento, è a tre vie e se non è presente alcun segnale è normalmente chiusa, vale a dire alimentazione non connessa alle utenze e scarico chiuso. In Figura 4.4 la porta 1 rappresenta l'alimentazione, porta 2 l'utilizzatore e la porta 3 lo scarico. Non essendo una valvola proporzionale in pressione, né tanto

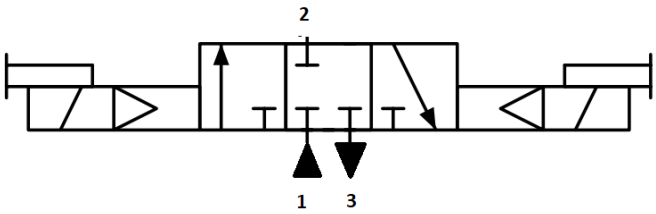

Figura 4.4: Elettrovalvola

meno una proporzionale in portata, la sua commutazione è di tipo ON/OFF. All'interno del modello Simulink, il blocco elettrovalvola riceve come dati di input:

- Pressione di alimentazione [Pa]
- Pressione di scarico [Pa]
- Pressione in uscita valvola [Pa]
- Segnale di tensione [V]

L'output del modulo è:

- Portata attraverso la valvola [m^3/s]

Per calcolare la portata che fluisce attraverso la valvola seguiamo la normativa ISO 6358 [4], secondo cui in base al rapporto di pressioni tra

monte e valle dell'elemento, possiamo avere un flusso sonico oppure subsonico. Per poter determinare la quantità di aria che si riesce a smaltire nell'unità di tempo è necessario conoscere i parametri caratteristici della valvola stessa; questi sono:

- Conduttanza valvola C [Nm^3/sPa]
- Rapporto critico delle pressioni b [-]

Definita:

- P_1 pressione di monte [Pa]
- P_2 pressione a valle della valvola [Pa]
- Q portata che fluisce attraverso la valvola [m^3/s]
- T Temperatura aria [K]
- $T_n = 293\ K$ Temperatura aria di riferimento [K].

Il calcolo della portata secondo normativa è determinato da:

$$0 < \frac{P_2}{P_1} < b \qquad Q = CP_1 \sqrt{\frac{T}{T_n}} \tag{4.2}$$

$$b \leq \frac{P_2}{P_1} < 1 \qquad Q = CP_1 \sqrt{\frac{T}{T_n}} \sqrt{1 - \left(\frac{\frac{P_2}{P_1} - b}{1 - b}\right)^2} \tag{4.3}$$

$$1 < \frac{P_2}{P_1} < \frac{1}{b} \qquad Q = -CP_2 \sqrt{\frac{T}{T_n}} \sqrt{1 - \left(\frac{\frac{P_1}{P_2} - b}{1 - b}\right)^2} \tag{4.4}$$

$$\frac{P_2}{P_1} > \frac{1}{b} \qquad Q = -CP_2 \sqrt{\frac{T}{T_n}} \tag{4.5}$$

Le equazioni 4.2 e 4.3 vengono utilizzate in fase di carico sospensione, quindi aumento dell'altezza; il segnale di tensione che riceve la valvola è pari a 110 V. Le equazioni 4.4 e 4.5 vengono utilizzate in fase di scarico sospensione, quindi necessità di diminuzione dell'altezza; il segnale di tensione che riceve la valvola è pari a -110 V. Il blocco realizzato in simulink è rappresentato in Figura 4.6.

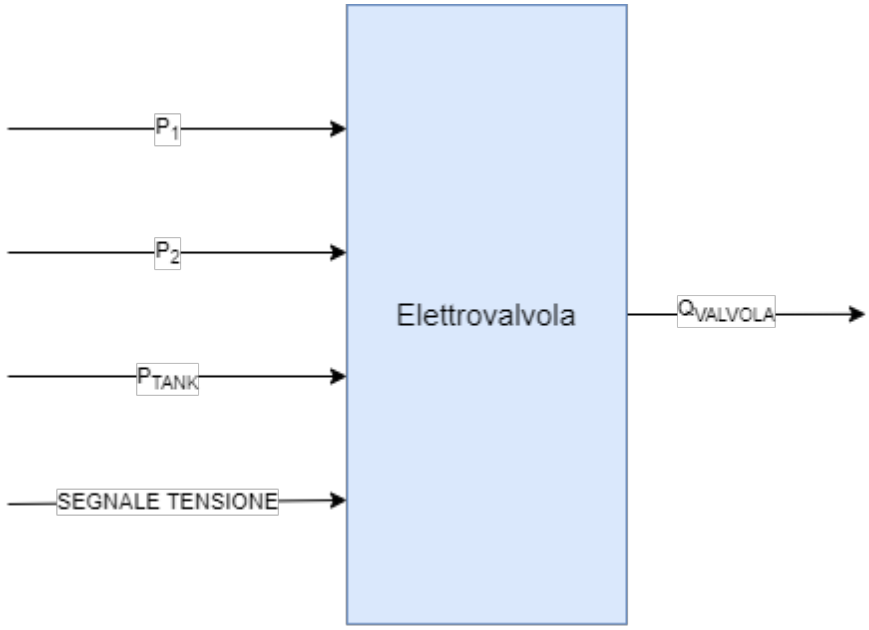

Figura 4.5: Blocco valvola

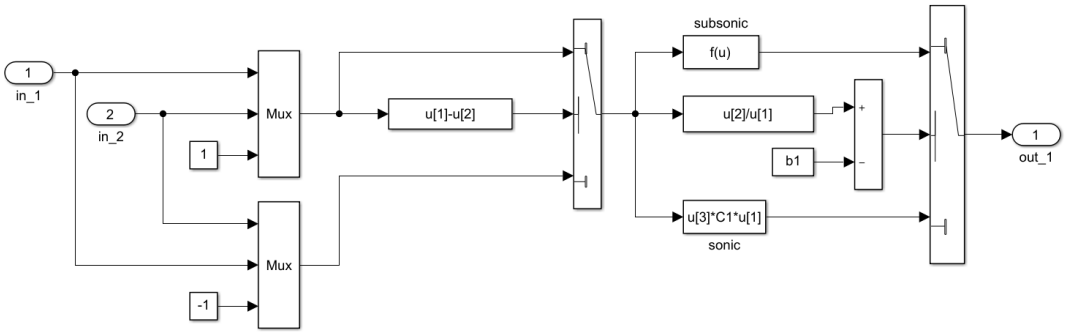

Figura 4.6: Elettrovalvola simulink

4.3 Tubazioni Pneumatiche

Le tubazioni pneumatiche permettono il collegamento dei vari componenti, sono costituite in rilsan, materiale dalle ottime caratteristiche meccaniche con elevata stabilità sia in presenza di umidità sia alle basse temperature. Nella nostra analisi dobbiamo distinguere due diverse tipologie di tubazioni:

1. Collegamento tra alimentazione e valvola
2. Collegamento tra valvola e attuatore.

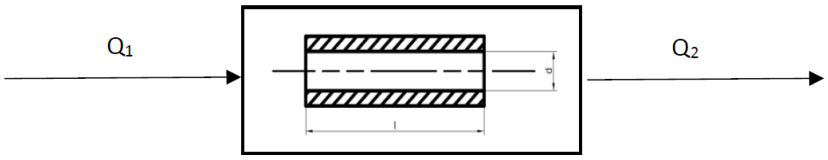

Figura 4.7: Piping

Per analizzare il comportamento fluidodinamico dobbiamo considerare il piping (Figura 4.7) come un volume costante in cui si ha un accumulo di massa con una pressione iniziale. Successivamente, a causa delle cadute di pressione che si hanno all'interno delle tubazioni, si verifica una diminuzione di pressione.
Per il calcolo delle portate che attraversano queste tubazioni e le rispettive cadute di pressione si sfrutta l'equazione di continuità 4.6 e le espressioni per le cadute di pressione 4.9, 4.10, 4.11, 4.12.

$$G_1 - G_2 = \frac{dm}{dt} = \frac{d\left(\rho V\right)}{dt} = \rho\frac{dV}{dt} + \frac{d\rho}{dt} \tag{4.6}$$

Considerato che il volume delle tubazioni non varia nel tempo, possiamo dire che:

$$\frac{dV}{dt} = 0$$

Inoltre, supponendo una trasformazione isoterma e richiamando l'equazione dei gas reali, possiamo scrivere:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{RT}\frac{dp}{dt}$$

Sostituendo nell'equazione 4.6, otteniamo:

$$Q_1 - Q_2 = \frac{V}{RT\rho}\frac{dp}{dt} \tag{4.7}$$

Da cui ricaviamo la variazione di pressione in uscita:

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{p_2}{V}(Q_1 - Q_2) \tag{4.8}$$

In cui:

- V [m^3] volume del piping
- p_2 [Pa] pressione in uscita piping
- Q_1 [m^3/s] portata in ingresso piping
- Q_2 [m^3/s] portata in uscita piping.

Per il calcolo delle cadute di pressione dobbiamo considerare le cadute di pressione localizzate, distribuite e quelle dovute alla variazione di portata. Per le perdite di carico localizzate abbiamo:

$$\Delta p = \beta\frac{\rho}{2}v^2 \tag{4.9}$$

In cui:

- Δp [Pa] cadute di pressione all'interno del piping
- β friction factor
- v [m/s] velocità media del flusso.

Il coefficiente β è calcolato tenendo conto dei raggi di curvatura e degli angoli di curvatura del piping in tutta la sua lunghezza.
Le perdite di carico distribuite vengono invece calcolate secondo:

$$\Delta p = \lambda\frac{L}{D}\frac{\rho}{2}v^2 \tag{4.10}$$

In cui:

- Δp [Pa] cadute di pressione all'interno del piping

- λ friction factor
- L [m] lunghezza piping
- D [m] diametro piping
- ρ [kg/m^3] densità aria
- v [m/s] velocità media del flusso.

Per calcolare il valore di friction factor λ dobbiamo prima determinare la tipologia di flusso che scorre all'interno del piping, quest'ultimo può essere laminare o turbolento e la distinzione tra i due viene effettuata mediante il calcolo del numero di Reynolds.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

In cui:

- ρ [kg/m^3] densità aria
- v [m/s] velocità media del flusso
- D [m] dimensione caratteristica, nel caso analizzato diametro piping
- μ [kg/sm] viscosità dinamica del fluido

Se il numero di Reynolds è minore di 3000 allora siamo in moto laminare, altrimenti abbiamo moto turbolento.

$$\lambda = \frac{64}{Re} \qquad se\ Re < 3000,\ moto\ laminare$$

$$\lambda = 0.316 Re^{-0.25} \qquad se\ Re > 3000,\ moto\ turbolento$$

Note tutte le altre grandezze si procede al calcolo delle perdite di pressione distribuite.
Infine, le perdite per variazione di portata si calcolano utilizzando l'analisi a parametri concentrati sfruttando l'analogia con le grandezze elettriche, quale induttanza.

$$\Delta p = L\rho \frac{dQ}{dt} \tag{4.11}$$

In cui:

- $L = l/D$ [m^{-1}] induttanza pneumatica
- ρ [kg/m^3] densità aria
- $\frac{dQ}{dt}$ variazione di portata nel tempo

All'interno del sistema potrebbe essere presente un orifizio; questo apporterà ulteriori cadute di pressione calcolate attraverso:

$$\Delta p = \left(\frac{A_{orifizio}}{A_{tubo}C_d}\right)^2 \frac{\rho}{2} v^2 \tag{4.12}$$

In cui:

- $A_{orifizio}$ [m^2] Area orifizio
- A_{tubo} [m^2] Area piping
- C_d coefficiente di efflusso
- ρ [kg/m^3] densità aria
- v [m/s] velocità media del flusso

La somma dei contributi calcolati con le equazioni 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 rappresenta la caduta di pressione totale del piping.
Il sistema di tubazioni è stato realizzato in simulink con lo schema presente in Figura 4.8.

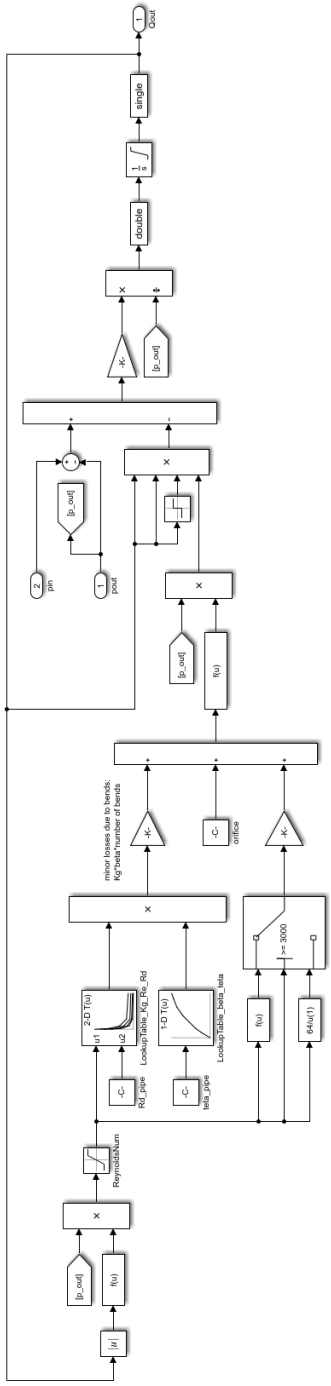

Figura 4.8: Tubazioni simulink

4.4 Serbatoio e Attuatore ad Aria

L'ultimo blocco schematizzato nel modello Simulink è rappresentato dal serbatoio e dall'attuatore ad aria, come in Figura 4.9. Il primo componente ha come obiettivo quello di garantire continuità nell'alimentazione del sistema, nel caso in cui la valvola dovesse impiegare più tempo del previsto per sollevare l'attuatore, il secondo invece, rappresenta la sospensione secondaria.
Per poter calcolare la variazione dell'altezza dell'attuatore, ci serviamo dell'equazione di continuità (4.13) e dell'equazione del moto (4.16).

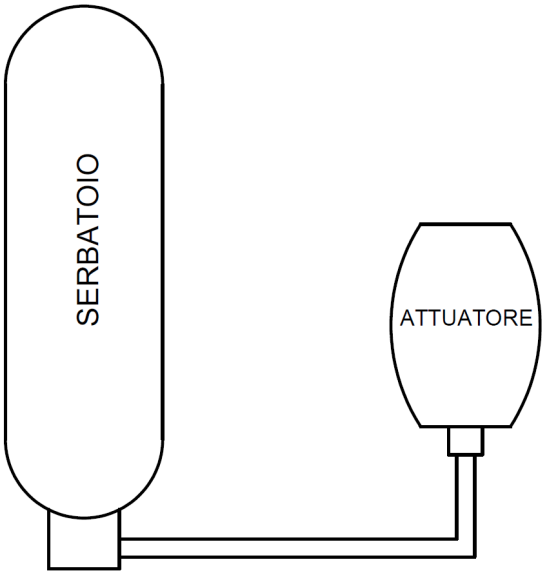

Figura 4.9: Serbatoio e Attuatore

$$G = \frac{dm}{dt} = \frac{d\left(\rho V\right)}{dt} = \rho\frac{dV}{dt} + \frac{d\rho}{dt} \tag{4.13}$$
$$V = V_0 + Az = 0.0099 + 0.0028 * z$$

Nel volume iniziale V_0 si è tenuto conto anche del volume iniziale del serbatoio di accumulo.

$$\frac{dV}{dt} = A\frac{dz}{dt}$$

Supponendo una trasformazione isoterma e richiamando l'equazione dei gas reali, possiamo scrivere:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{RT}\frac{dp}{dt}$$

Sostituendo nell'equazione 4.13, otteniamo :

$$Q = \frac{G}{\rho} = A\frac{dz}{dt} + \frac{1}{p}V(z) \tag{4.14}$$

Dall'equazione 4.14 ricaviamo la variazione della pressione nel tempo in ingresso all'attuatore.

$$\frac{dp}{dt} = \frac{p}{V(z)}\left(Q - A\frac{dz}{dt}\right) \tag{4.15}$$

L'equazione del moto del sistema è:

$$m(\ddot{z} + g) + K_{damp}\dot{z} = (p_1 - p_0)A - F_{ext} \tag{4.16}$$

Da cui:

$$\ddot{z} = \frac{(p_1 - p_0)A - F_{ext} - K_{damp}\dot{z}}{m} - g \tag{4.17}$$

In cui:

- m [kg] massa del carico
- K_{damp} [Ns/m] coefficiente di smorzamento dell'attuatore
- F_{ext} [N] forza esterna
- p_1 [Pa] pressione alimentazione attuatore
- p_0 [Pa] pressione iniziale in attuatore
- A [m^2] area attuatore
- $\ddot{z}$ [m/s^2] accelerazione attuatore
- $\dot{z}$ [m/s] velocità attuatore
- z [m] altezza attuatore

Integrando due volte l'equazione 4.17, si determina l'altezza della sospensione secondaria.
Il blocco serbatoio/attuatore realizzato in simulink è rappresentato in Figura 4.10.

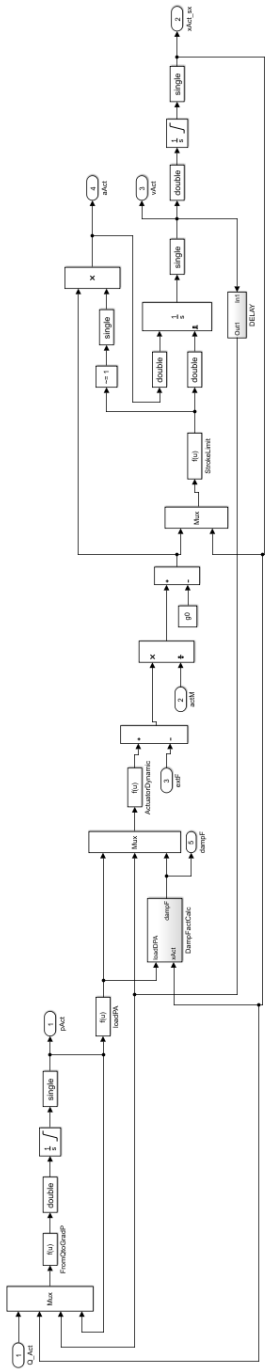

Figura 4.10: Attuatore simulink

4.4.1 Verifica area attuatore

Nello sviluppo del modello dell'attuatore è necessario determinare dei parametri geometrici come l'area dell'attuatore. Essendo un corpo il cui volume è variabile a seconda della quantità di aria presente al suo interno e il valore del carico che grava su di esso, sono state eseguite diverse prove su banco per determinare il valore reale dell'area. Le prove eseguite hanno previsto l'alimentazione del sistema con pressioni tali da equilibrare il carico statico, raggiunto l'equilibrio si è valutata l'area secondo l'equazione 4.18. L'esecuzione di tali prove è stata effettuata tenendo condo della presenza di entrambi gli attuatori.

$$A = \frac{mg}{p} \tag{4.18}$$

Le grandezze utilizzare nell'equazione 4.18 rappresentano:

- m [kg] massa del carico
- g [m/s^2] accelerazione gravitazionale
- p [Pa] pressione nell'attuatore per sorreggere il carico statico

I carichi utilizzati per le prove e i rispettivi valori di area ottenuti sono elencati in tabella 4.1 Dall'analisi dei risultati ottenuti si evince una mancanza di

Massa [kg]	Area [m^2]
36	0.00103
96	0.00239
116	0.00261
156	0.00253
216	0.00233
236	0.00238
256	0.002561

Tabella 4.1: Area Attuatore

proporzionalità tra carico e valore di area ottenuto, ma si nota come, ad eccezione del carico con m = 36 kg, i valori siano circa costanti Figura 4.11. Di conseguenza, si è optato per il calcolo di una media quadratica dei valori ottenuti, con il risultato di:

$$A = 0.0025\ [m^2]$$
$$\Phi = 0.057\ [m]$$
$$\Phi/2 = 0.028\ [m]$$

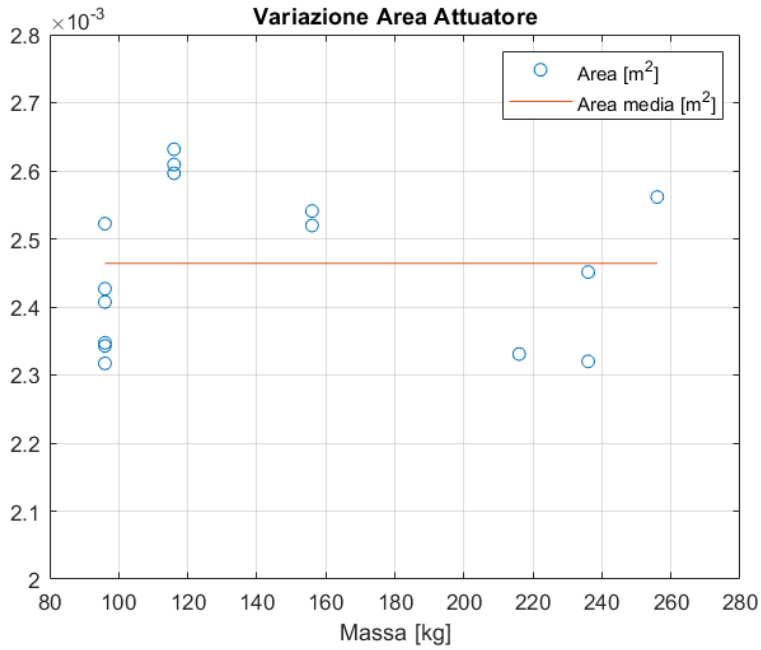

Figura 4.11: Variazione Area

4.4.2 Smorzamento attuatore

La valutazione dello smorzamento dell'attuatore è stata eseguita andando a studiare la risposta ad un impulso a gradino. Definito il diagramma di corpo libero del sistema (Figura 4.12) e l'equazione dinamica del moto 4.19 si ricava lo smorzamento del sistema β.

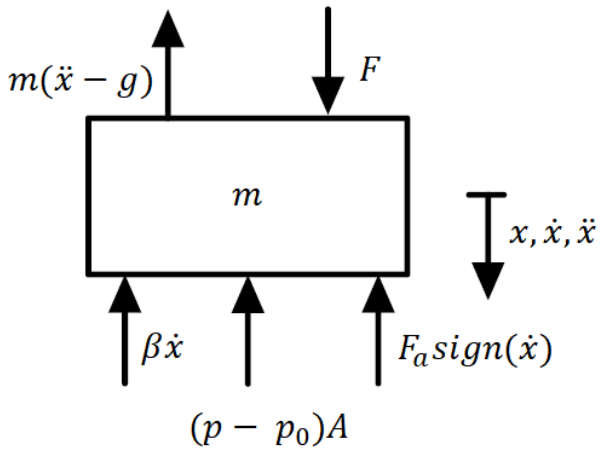

Figura 4.12: Diagramma di corpo libero attuatore

$$m(\ddot{x} - g) + \beta\dot{x} = F - (p - p_0)A - F_a \; sign(\dot{x}) \tag{4.19}$$

In cui:

- m [kg] massa del carico
- β [Ns/m] coefficiente di smorzamento dell'attuatore
- F [N] impulso a gradino
- p [Pa] pressione attuatore
- A [m^2] area attuatore
- $\ddot{x}$ [m/s^2] accelerazione attuatore
- $\dot{x}$ [m/s] velocità attuatore

Le prove sono state effettuate andando a caricare le sospensioni con diversi pesi e alimentando il banco a pressioni diverse. Una volta raggiunto l'equilibrio tra carico e pressione di alimentazione si è andato ad aggiungere un ulteriore peso con $massa = 20.5$ kg, in modo da creare un impulso a gradino. Successivamente si è studiata la risposta a tale impulso. Per ottenere dei dati ancora più precisi si è valutata la risposta del sistema anche alla rimozione del peso aggiunto in precedenza.
Con analisi dei risultati delle diverse prove si è stata determinata una distribuzione dei valori di smorzamento al variare della massa di carico usata per le verifiche (Figura 4.13). Osservando la Figura 4.13, si nota come l'andamento dei valori sia pressocché costante, quindi si è scelto come valore di smorzamento un valore costante, pari a $\beta = 2150$Ns/m.

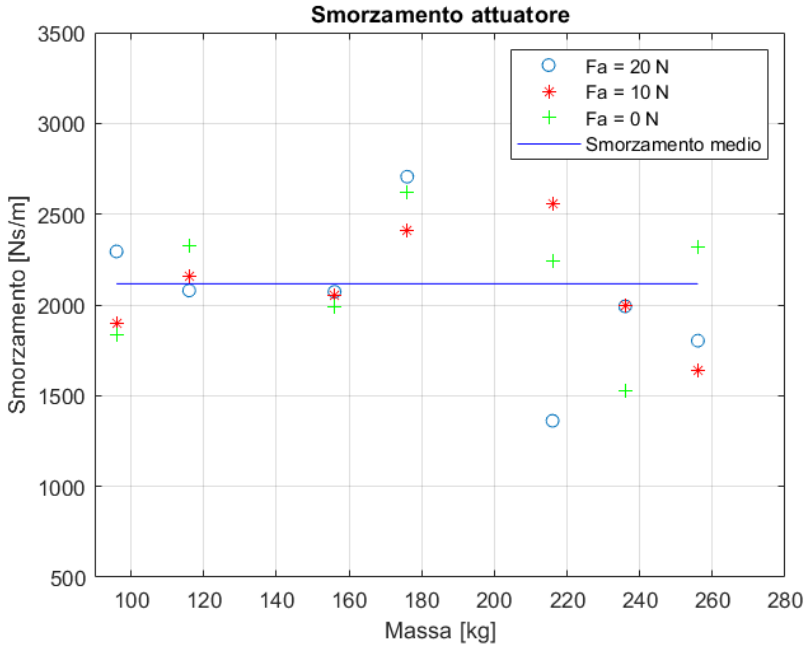

Figura 4.13: Smorzamento attuatore

4.5 Raddoppio modello

Per poter integrare il modello con il controllore contenuto all'interno del software *Levelling*, è stato eseguito il raddoppio del modello, quindi aggiunta una seconda sospensione, i modo da garantire al BME la gestione di entrambe le sospensioni come da specifica di progetto.

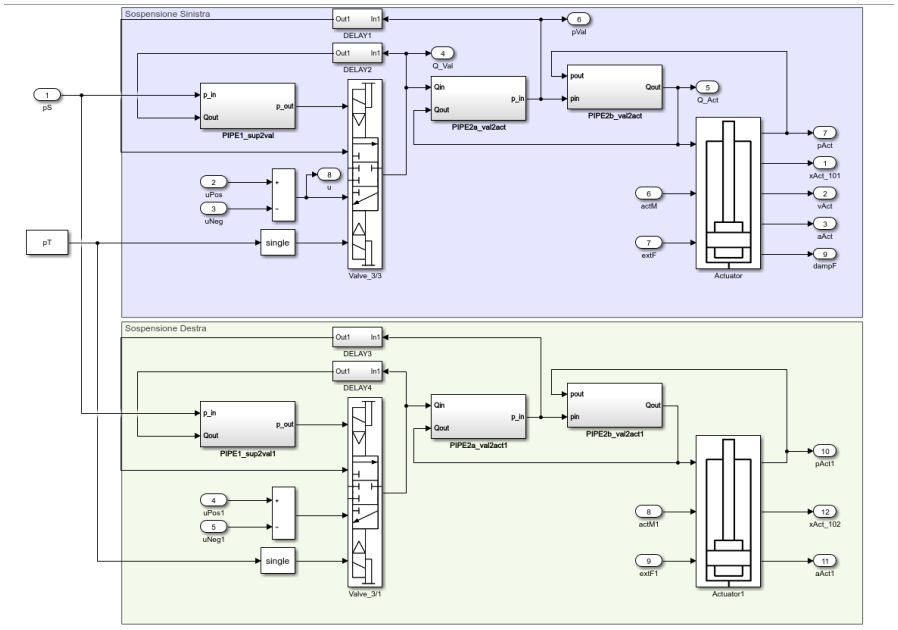

Figura 4.14: Modello doppia sospensione

4.6 Esecuzione prove modello

Determinate le equazioni e i parametri del modello, sono stati creati i vari blocchi con gli input e output comunicanti tra loro. Il modello è costruito in modo da poter funzionare in anello aperto o anello chiuso. Nel primo caso questo riceve come input solo i segnali che vanno ad azionare le valvole in quanto il controllore è interno al BME, nel secondo caso invece si va a fornire al modello un profilo di altezza che varia nel tempo e si va ad analizzare la risposta del sistema.

4.6.1 Funzionamento in anello chiuso

Per simulare il funzionamento in anello chiuso è stato fornito al modello un profilo di altezza di riferimento come in Figura 4.15, mentre le condizioni di carico e pressione di alimentazione utilizzate sono elencate in Tabella 4.2.

Massa [kg]	79.5
Pressione alimentazione [Pa]	$4 \cdot 10^5$

Tabella 4.2: Parametri modificabili anello chiuso

I risultati ottenuti dalla simulazione sono mostrati in Figura 4.16 per l'andamento dell'altezza e in Figura 4.17 per l'andamento della pressione.

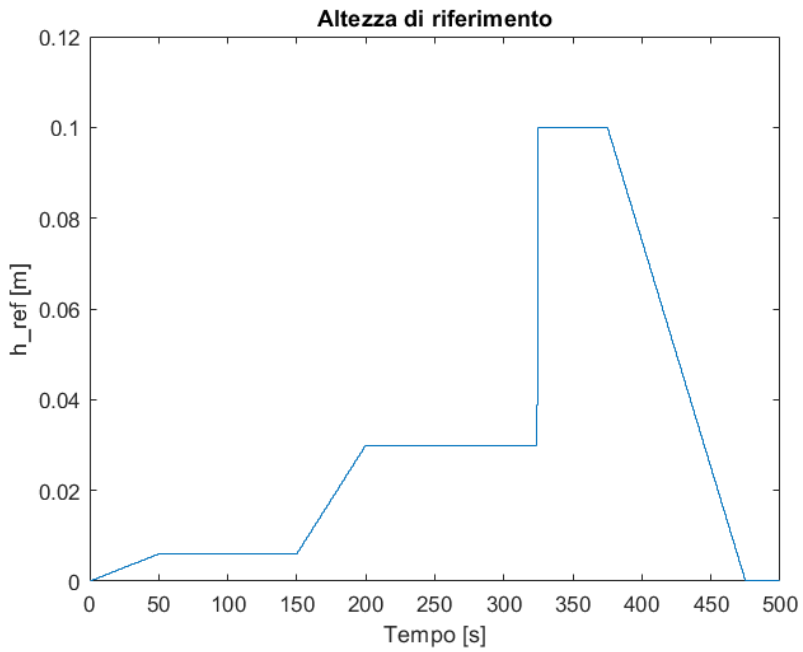

Figura 4.15: Altezza di riferimento

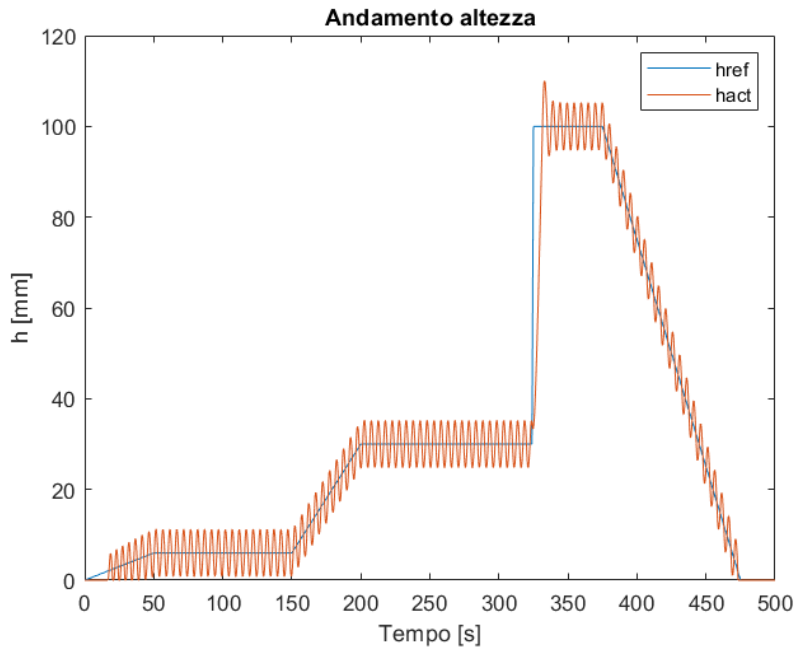

Figura 4.16: Altezza

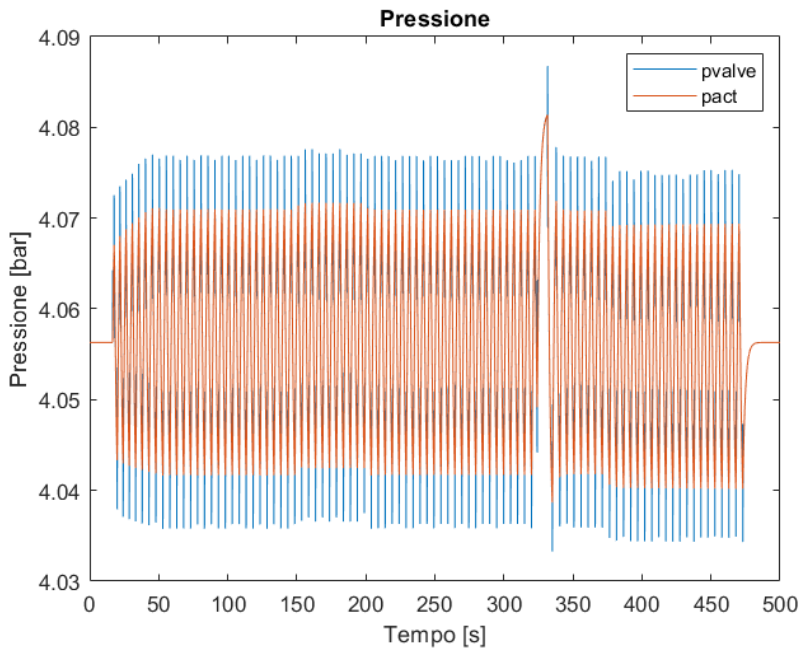

Figura 4.17: Pressione

Osservando la Figura 4.16 si nota facilmente come l'altezza oscilli intorno al valore di riferimento senza mai raggiungere il valore target. Questo andamento è dovuto alla natura del controllore, che essendo di tipologia ON/OFF, non riesce a generare un segnale che sia proporzionale all'errore, quindi controllare con la miglior efficienza l'altezza. Questo va a generare un errore del 17%.

4.6.2 Funzionamento in anello aperto

Nel funzionamento in anello aperto il modello non è dotato di controllore in quanto integrato all'interno del software *Levelling* presente nel BME. Nelle simulazioni in anello aperto vengono forniti gli input delle valvole registrati da precedente prova eseguita su banco e si confronta la risposta finale del sistema con le registrazione effettuate su banco.
I comandi valvola vengono ricevuti dal modello sono sotto forma di vettori di 0 e 1. Esistono due vettori, uno per comandare in carico la valvola e uno per lo scarico; il comando 0 indica la non attività della valvola, mentre 1 indica il funzionamento. Il modello riceve questi vettori e li processa trasformandoli in un segnale in tensione che varia da 110V a -110V.
Nella prova effettuata i valori di pressione e carico scelti sono riportati in Tabella 4.3. Le registrazioni eseguite su banco prova sono rappresentate in

Massa [kg]	79.5
Pressione alimentazione [Pa]	$5.5 \cdot 10^5$

Tabella 4.3: Parametri modificabili anello aperto

Figura 4.18 e Figura 4.19, in cui si rappresentano rispettivamente l'altezza e le pressioni del banco di prova.

In seguito alla prova eseguita su banco sono stati estrapolati i segnali di comando valvola (Figura 4.20).

Inserendo questi comandi nel modello si ottengono i risultati dell'altezza e pressione Figura 4.21 4.22 e si nota come i risultati siano fedeli alle risposte registrare su banco di prova.

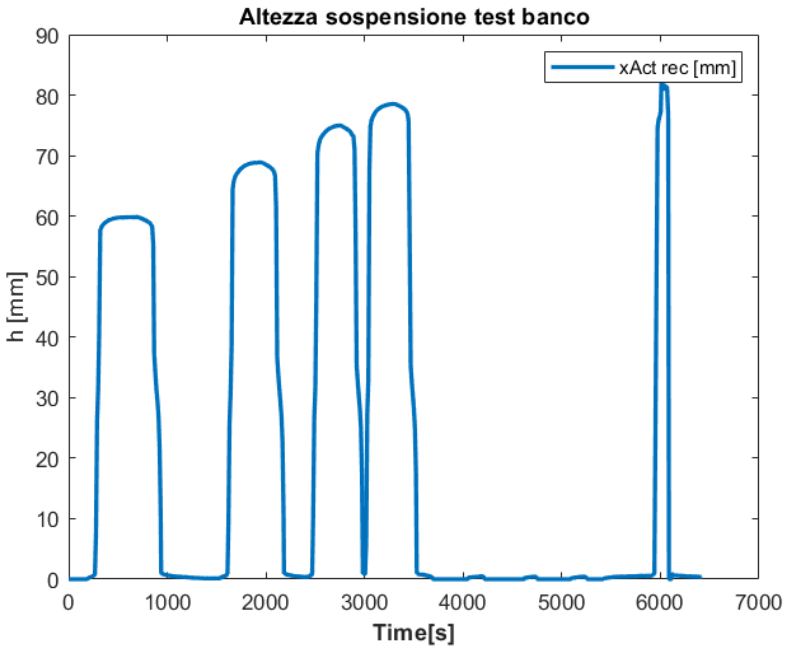

Figura 4.18: Altezza Banco di prova

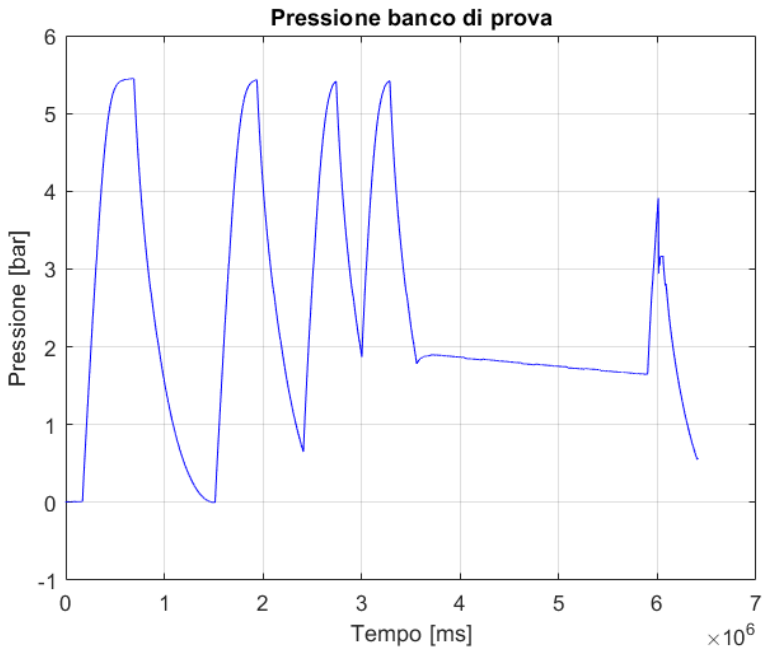

Figura 4.19: Pressione Banco di prova

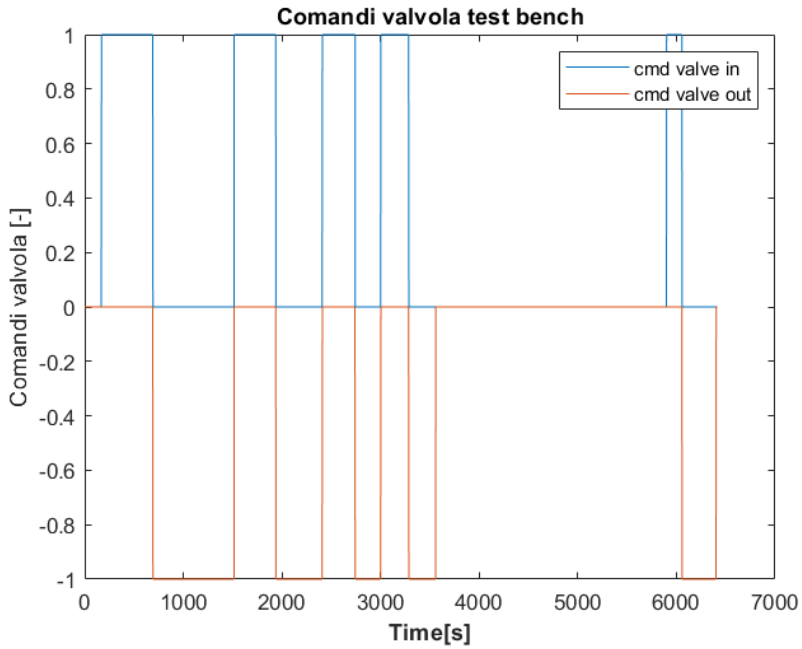

Figura 4.20: Segnale comando valvola

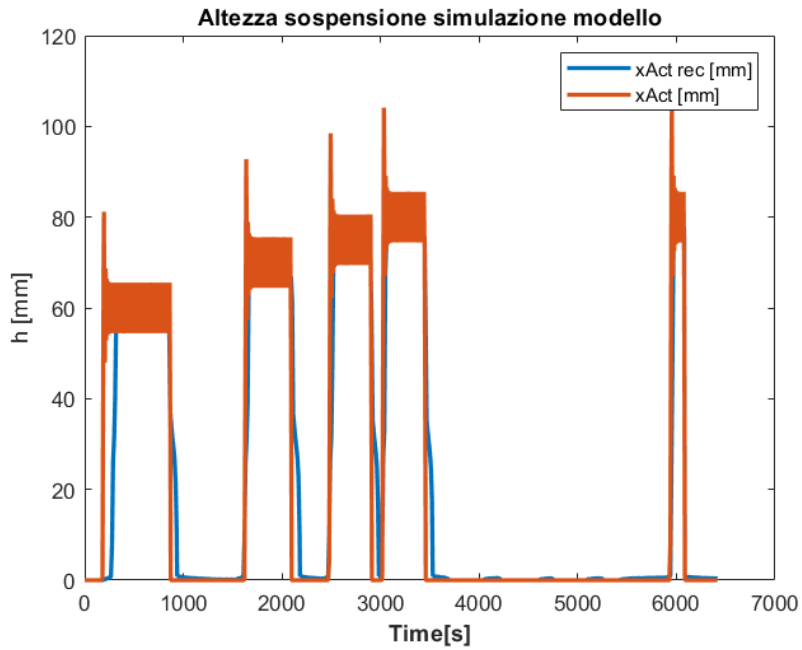

Figura 4.21: Altezza anello aperto

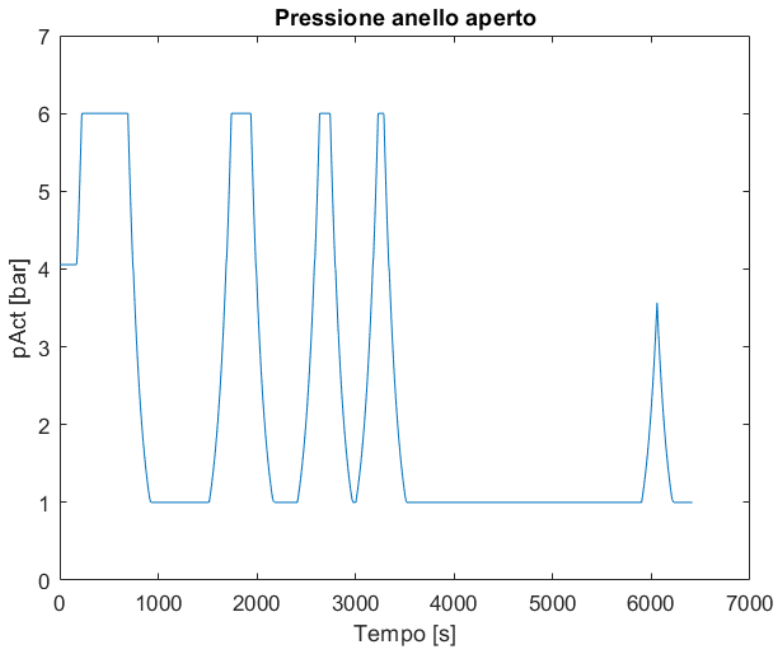

Figura 4.22: Pressione anello aperto

Capitolo 5

Validazione modello simulink

La validazione del modello è stata eseguita andando definire le prove da eseguire sia su banco di prova che sul modello simulink. Le prove scelte hanno come obiettivo quello di mostrare tutti i possibili punti di funzionamento del sistema di sospensioni.
Le prove scelte sono:

- BMS-SRTS-004921 senza variazione di massa
- BMS-SRTS-004921 con variazione di massa

In base alla tipologia di test scelto varia il valore che assume l'accuracy e l'isteresi del controllore; i possibili valori che possono essere scelti variano in base alla modalità di funzionamento e sono riassunti in Tabella 5.1. Dai

Cmode	Inlet Accuracy	Outlet Accuracy
Cmode 0	25 mm	25 mm
Cmode 1	1.5 mm	4 mm
Cmode 2	2 mm	2 mm

Tabella 5.1: Parametri Controllore

test eseguiti su banco di prova si ricavano otteniamo le tracce di altezza, pressione e comandi valvola che si registrano nelle fasi di esecuzione in modo da poterli confrontare poi con i risultati delle simulazioni. Ogni prova è

effettuata andando a scegliere un determinato valore di carico per il banco e pressione di alimentazione. Attraverso il software *TrainTracer*, che gestisce l'azionamento del banco, si sceglie la modalità di funzionamento da simulare e si verifica che i valori di altezza raggiunti siano all'interno di range imposti dalla specifica Alstom.

5.1 Prova 1. Esecuzione prova test bench

La prova scelta per il test eseguito su banco è volta a mettere in evidenza la modalità di funzionamento Levelling in Running. Prima di eseguire la prova è stato necessario settare tutti i valori iniziali del sistema e del controllore riassunti in Tabella 5.2.

P_s	6 bar
Inlet/Outlet Accuracy	25 mm
m	156 kg
Valvola differenziale chiusa	

Tabella 5.2: Parametri Prova 1

Poiché la valvola differenziale è chiusa, i risultati che otteniamo con una singola sospensione sono identici ai risultati ottenuti per entrambe le sospensioni; pertanto nel corso della trattazione considereremo i risultati ottenuti sulla singola sospensione.
Prima di analizzare i risultati ottenuti, è necessario premettere che le misurazioni di pressione sono affette da errore in quanto l'attuatore ha delle perdite pneumatiche. Osservando l'andamento dell'altezza registrato su banco (Figura 5.1), si osserva che il sistema tenda ad oscillare intorno ad un valore di riferimento, in questo caso un'altezza pari a $h = 46$ mm. Si raggiunge il valore di riferimento solo dopo essere intervenuti sul banco, tramite una riduzione della sezione di passaggio dello scarico valvola, al fine di rendere più stabile il sistema.

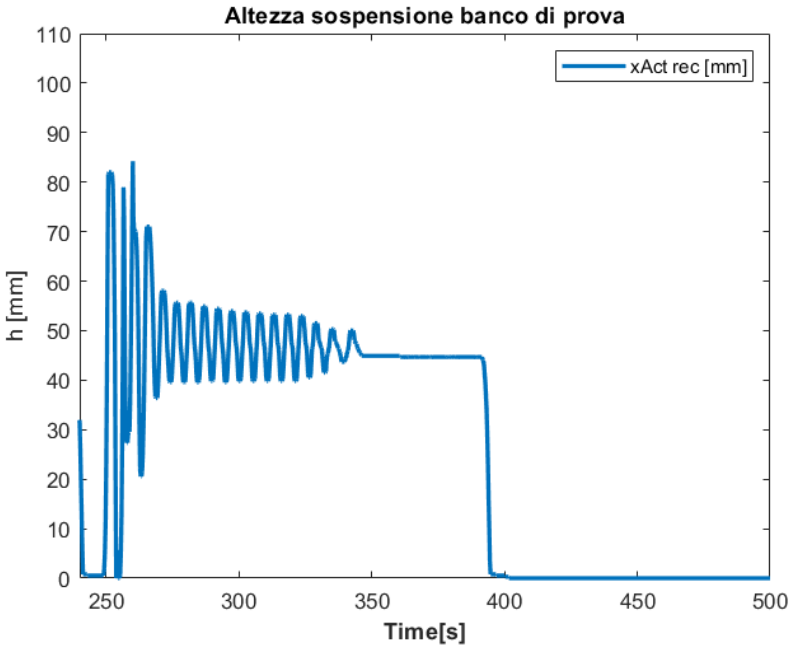

Figura 5.1: Altezza banco di prova. Prova 1

5.2 Prova 1. Esecuzione prova simulink

Per validare il modello è stato necessario inviare al modello simulink gli stessi input dati su banco di prova. Nel nostro caso, invece di comandare il modello facendo variare il valore del Cmode, sottoponiamo il modello ad un determinato valore di altezza corrispondente al valore attribuito al Cmode. Il profilo di altezza inviato al modello è rappresentato in Figura 5.2 e ha come obiettivo il raggiungimento e mantenimento dell'altezza di riferimento $h = 46$mm con carico costante.

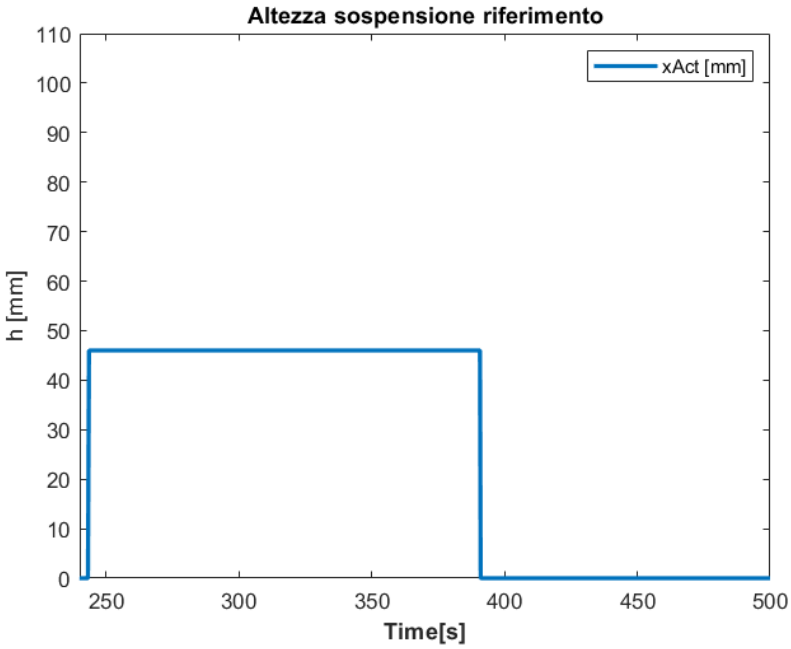

Figura 5.2: Riferimento altezza. Prova 1

I risultati ottenuti sono rappresentati nelle Figure 5.3, 5.4 e 5.5.

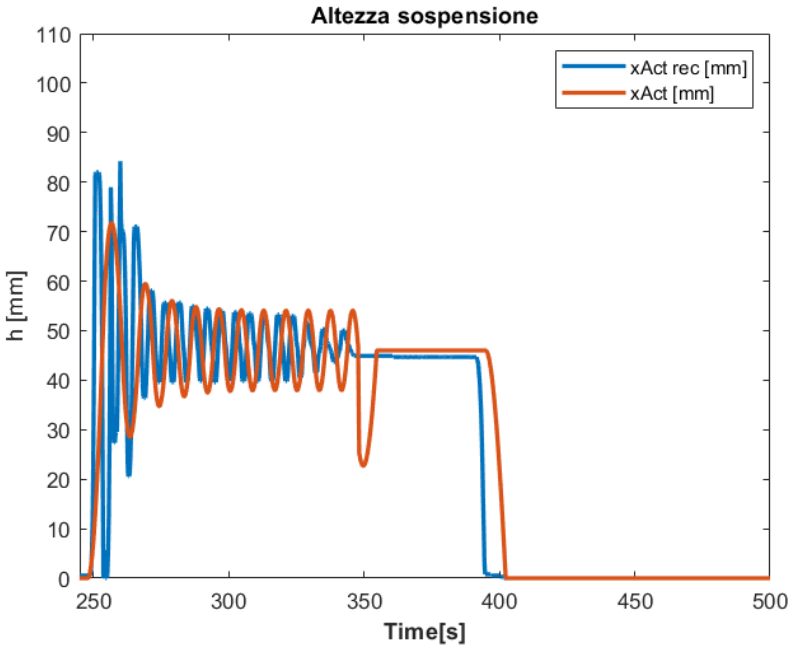

Figura 5.3: Confronto Altezza Prova 1

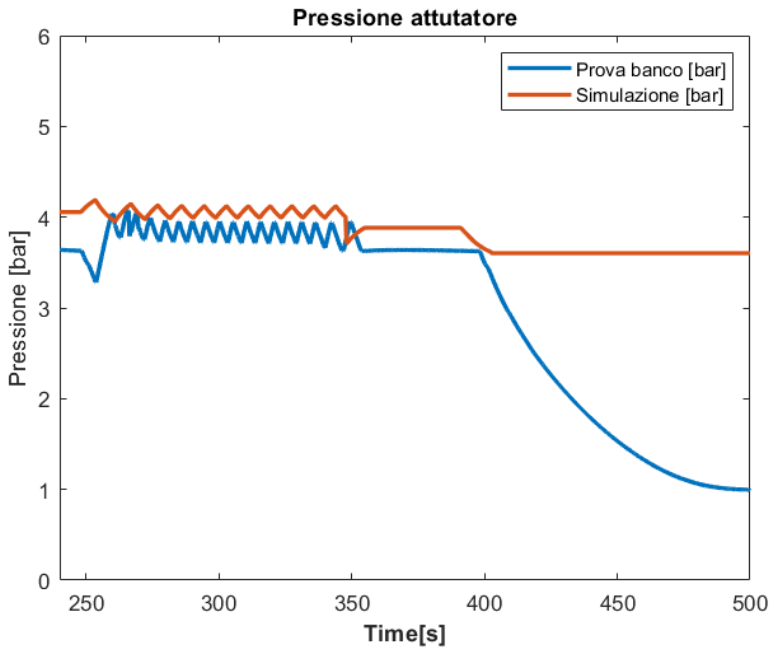

Figura 5.4: Confronto Pressione Prova 1

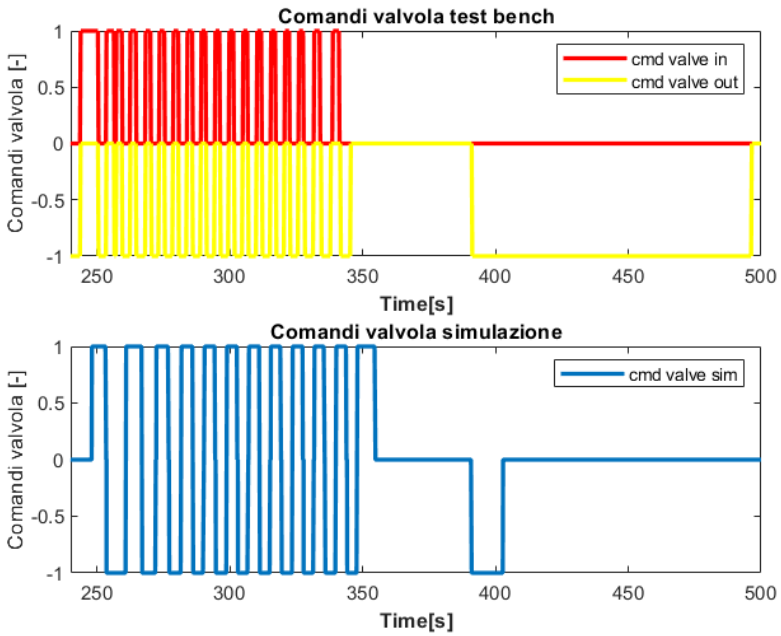

Figura 5.5: Confronto comandi valvola Prova 1

Confrontando i risultati ottenuti su prove da banco e quelle invece ottenute da simulazione, si evince come il modello converga all'altezza di riferimento solo dopo essere intervenuti sul modello andando a simulare la chiusura dello scarico valvola.
Il comportamento dell'altezza e di conseguenza della pressione è frutto della natura del controllore, che non riesce a gestire in modo corretto l'altezza in quanto i valori di isteresi e accuracy, utilizzati in modalità running, hanno una tolleranza troppo piccola.
Osservando l'andamento della pressione (Figura 5.4, il diverso comportamento tra simulazione e registrazione è dovuto al controllore implementato nel BME che, anche dopo aver raggiunto l'altezza di riferimento (vedi Figura 5.3), invia un segnale di apertura valvola in fase di scarico, come si può osservare da Figura 5.5 all'istante $t = 390$ s. Nel controllore simulato nel modello non si ha questo comportamento, in quanto, una volta raggiunto il riferimento la valvola è chiusa.

5.3 Prova 2. Esecuzione prova test bench

La seconda prova scelta per la validazione è un test in cui è prevista una variazione di massa.
Le condizioni di alimentazione del sistema sono le stesse della prova 1 (vedi requisiti Tabella 5.2), mentre i risultati ottenuti sono rappresentati in Figura 5.6.

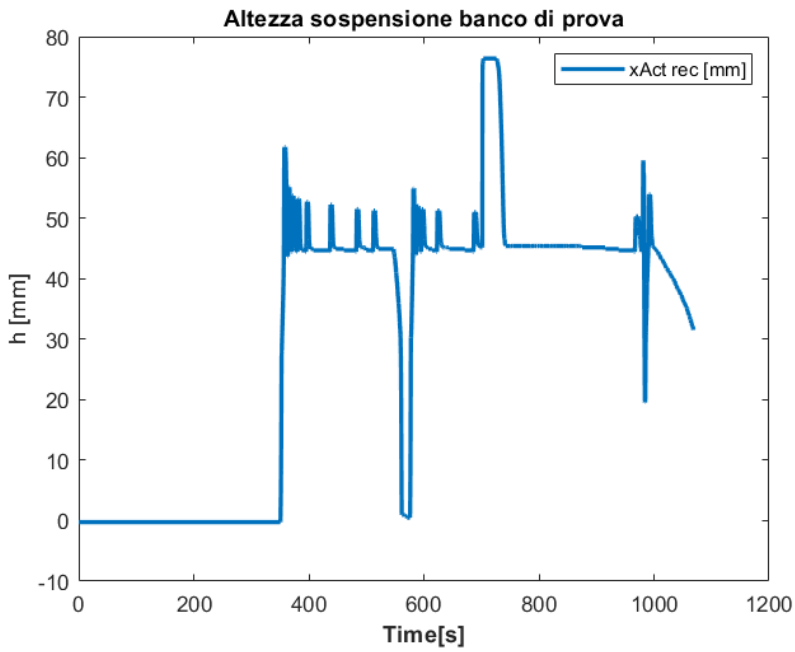

Figura 5.6: Altezza banco di prova. Prova 2

Il test è eseguito impartendo come comandi i vari Cmode, secondo specifica, e andando a verificare che l'altezza rientri nei limiti stabiliti, allo stesso tempo, si è fatto variare il carico durante il funzionamento in modalità running. In particolar modo, la variazione di massa è apprezzabile nell'intorno di tempo pari a $t = 700$s in cui si nota che l'altezza del sistema cresce fino a raggiungere il fine corsa dell'attuatore, per poi ristabilirsi vicino all'altezza di riferimento.
Anche in questo caso, per garantire una migliore risposta del sistema, si è intervenuti sullo scarico della valvola.

5.4 Prova 2. Esecuzione prova simulink

La seconda prova è stata simulata con il modello Similink. Anche in questo caso, come nella Prova 1, gli input trasmessi al modello sono volti a riprodurre un certo profilo di altezza; in questo caso, però, si esegue anche una variazione di massa.
I limiti di altezza da rispettare sono espressi con le equazioni 5.1 , 5.2, 5.3 e 5.4.
I parametri contenuti nelle equazioni sono riassunti in Tabella 5.3.

Running Air Gap THSR	46 mm
BME Weight Offset	2.5mm
Running Ramp Inlet THSR	10 mm
Running Ramp Outlet THSR	10 mm
Running Inst Outlet THSR	25 mm

Tabella 5.3: Limiti parametri da specifica

$$\begin{aligned} \textbf{Air Gap} &\geq Running\ Air\ Gap\ THSR\ +\ BME\ Weight\ Offset \\ \textbf{Air Gap} &\leq Running\ Air\ Gap\ THSR\ +\ BME\ Weight\ Offset\ + \\ &\quad Running\ Ramp\ Outlet\ THSR \end{aligned} \tag{5.1}$$

$$\begin{aligned} \textbf{Air Gap} \geq\ & Running\ Air\ Gap\ THSR\ +\ BME\ Weight\ Offset\ + \\ & Running\ Inst\ Outlet\ THSR \end{aligned} \tag{5.2}$$

$$\begin{aligned} \textbf{Air Gap} &\geq Running\ Air\ Gap\ THSR\ +\ BME\ Weight\ Offset- \\ &\quad Running\ Ramp\ Inlet\ THSR \\ \textbf{Air Gap} &\leq Running\ Air\ Gap\ THSR\ +\ BME\ Weight\ Offset \end{aligned} \tag{5.3}$$

$$\textbf{Air Gap} = 0 \pm 0.05mm \tag{5.4}$$

L'equazione 5.1 è da verificare dopo 90 s dal comando Cmode = 0, che corrisponde ad un'altezza di riferimento pari a h_{ref} = 46 mm mentre

l'equazione 5.4 è da verificare quando si passa il comando Cmode = 3, quindi $h_{ref} = 0$ mm . Quando eseguiamo la variazione di massa, bisogna verificare che dopo un tempo $t = 1$s sia verificata l'equazione 5.2 e dopo un tempo $t = 45$ s sia verificata l'equazione 5.3.
Le prove con il modello hanno prodotto i risultati mostrati in Figura 5.7 per quanto riguarda l'andamento dell'altezza, e in Figura 5.8 per il confronto tra comandi valvola registrati a banco e quelli ottenuti da modello.
Analizzando l'andamento dell'altezza, si nota che non raggiunge mai il valore di riferimento, ma oscilla intorno ad esso. Nonostante ciò, i limiti imposti dalla specifica sono rispettati, tranne il limite inferiore dell'equazione 5.1 e il limite superiore dell'equazione 5.3. Questo è dovuto alla mancata modifica sullo scarico, ma la prova può essere ritenuta valida.
L'andamento dei comandi valvola, invece, sembra essere in disaccordo con quanto registrato a banco, ma è da evidenziare il fatto che per poter garantire una risposta stabile al banco è stato necessario parzializzare lo scarico della valvola, mentre nel modello l'orifizio è mantenuto ad una dimensione fissa con un diametro $\phi = 3$ mm.

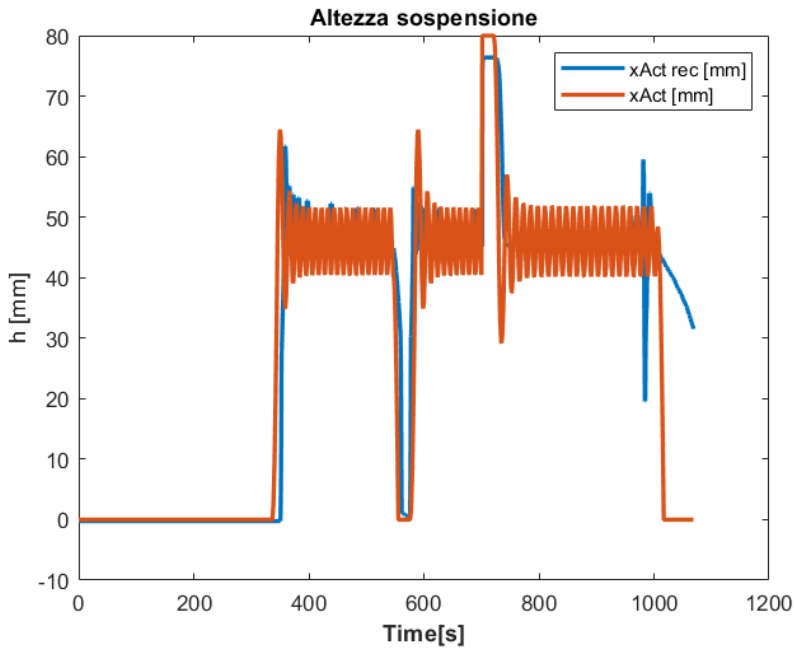

Figura 5.7: Confronto altezza Prova 2

In conclusione, dopo aver analizzato le risposte ottenute con le diverse

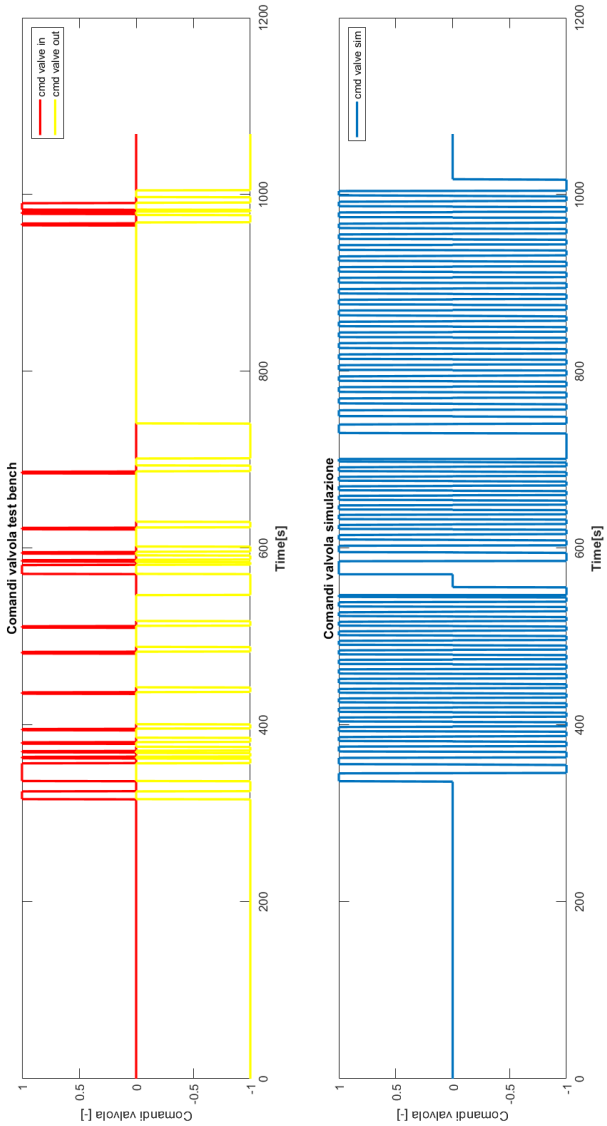

Figura 5.8: Confronto comandi valvola Prova 2

simulazioni, possiamo considerare il modello validato.

Capitolo 6

Integrazione Modello Simulink in ambiente LabVIEW

Terminate le prove di validazione con il confronto dati del banco scalato, il modello è stato integrato in un banco la cui gestione è completamente affidata ai BME.
All'interno di ogni BME, sono contenuti tutti i software che si occupano della gestione dei vari componenti del treno, tra cui il *Levelling* dedicato alla gestione del gruppo di sospensioni. Come indicato nel *Capitolo 2*, il livellamento della sospensione secondaria viene eseguito tenendo conto anche della deformazione della sospensione primaria e del consumo ruote, gestite dal TCMS; quest'ultimo invia le informazioni al *Levelling* che aziona le elettrovalvole per gestire il riferimento di altezza sulla sospensione secondaria.
Per poter studiare il comportamento del modello Simulink gestito dal BME, è stato necessario esportare il modello in un file ".so". Questo file successivamente è stato importato in ambiente LabVIEW per poterlo far interagire con il BME. Per garantire la corretta esecuzione del modello in LabVIEW, è stato necessario andare a verificare che il modello riuscisse a essere eseguito con un tempo di campionamento tale da avere un segnale delle variabili di output stabile. La determinazione del limite di periodo di campionamento è stata realizzata incrementando lo stesso fin quando non si è verificata una perdita di stabilità del segnale nello svolgere la simulazione. Partendo da un tempo di campionamento pari a $T = 5\ ms$, i risultati della simulazione hanno

presentato stabilità fino ad un periodo di $T = 10\ ms$; oltre questo valore il segnale di pressione presenta una instabilità tale per cui non è più possibile considerare veritiero il risultato. Quindi, il periodo di campionamento scelto è stato pari a $T = 5\ ms$, in modo da rendere il segnale più preciso.
Definito il tempo di campionamento, sono state determinate le variabili globali del sistema, le quali possono essere modificate dall'interfaccia GUI di LabVIEW. Nel caso in esame le variabili modificabili sono:

- Massa carico [kg]
- Comandi valvole
- Portata massima e minima $[m^3/s]$
- Damping Factor [Ns/m]
- Carico esterno [N]

L'esecuzione del modello può avvenire solo se le variabili in ingresso e uscita del modello comunicano con il software *Levelling*.
Le variabili che arrivano dal software a modello sono i comandi valvola:

- In valve 101
- Out valve 101
- In valve 102
- Out valve 102

Le variabili in uscita dal modello e in ingresso software sono le altezze degli attuatori:

- Actuator 101 height
- Actuator 102 height

Per garantire una comunicazione tra le variabili scambiate tra BME e modello, è stato necessario attribuire ad ogni variabile una specifica uscita su un modulo della CompactRio e attraverso un cablaggio metterle in comunicazione con i BME.
Il comando del sistema avviene attraverso un tool, creato da Alstom, per la gestione del BME; questo tool, noto come Train Tracer, permette, attraverso

la scelta di modalità di funzionamento del BME, di andare a eseguire il modello ed effettuare le prove desiderate.
Lo svolgimento delle prove è stato, quindi, eseguito grazie alla combinazione di LabVIEW e Train Tracer.
Per realizzare le prove scelte è stato necessario configurare LabVIEW con i dati del treno che si volevano simulare. In particolar modo è stato definito:

- Tipologia di treno
- Gruppo di sospensioni
- BME da considerare

Le simulazioni eseguite, hanno avuto come scopo quello di simulare due sospensioni appartenenti allo stesso carrello, ma gestite da due BME diversi, come rappresentato in Figura 6.1. In particolar modo, nel nostro caso, la

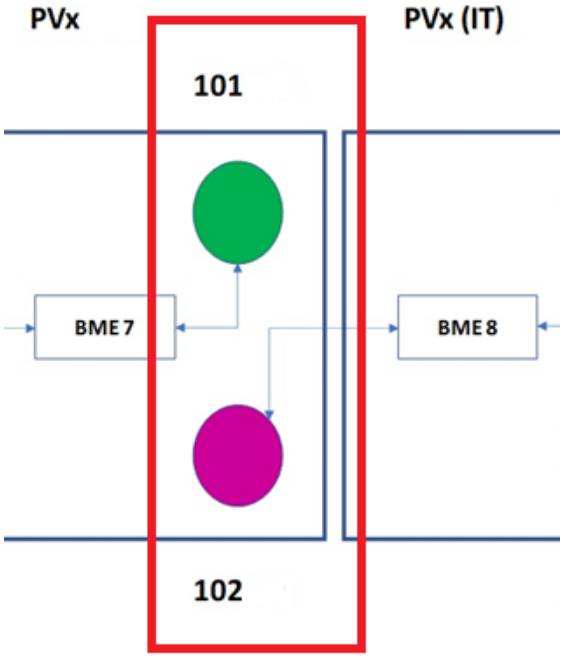

Figura 6.1: Gestione sospensioni da BME

sospensione 102 è gestita dal BME 7 e la sospensione 101 dal BME 8.
La configurazione scelta è visibile in Figura 6.2 in cui in alto a sinistra è

possibile individuare la tipologia di treno scelta e i BME coinvolti. Nel centro dell'interfaccia LabVIEW sono, invece, rappresentati tutti i parametri modificabili e quelli che comunicano con Train Tracer. L'interfaccia di Train Tracer, Figura 6.3, è quella che permette di avviare le simulazioni andando ad impostare il Cmode desiderato. In particolar modo andando a settare uno specifico valore di Cmode, risulta che le variabili di input/output delle valvole cambino il loro valore, di conseguenza varia anche l'altezza in base al target richiesto. Attraverso Train Tracer è possibile anche variare il target di altezza di riferimento, andando a intervenire sulla variabile *RUNNING AIRGAP TARGET*.

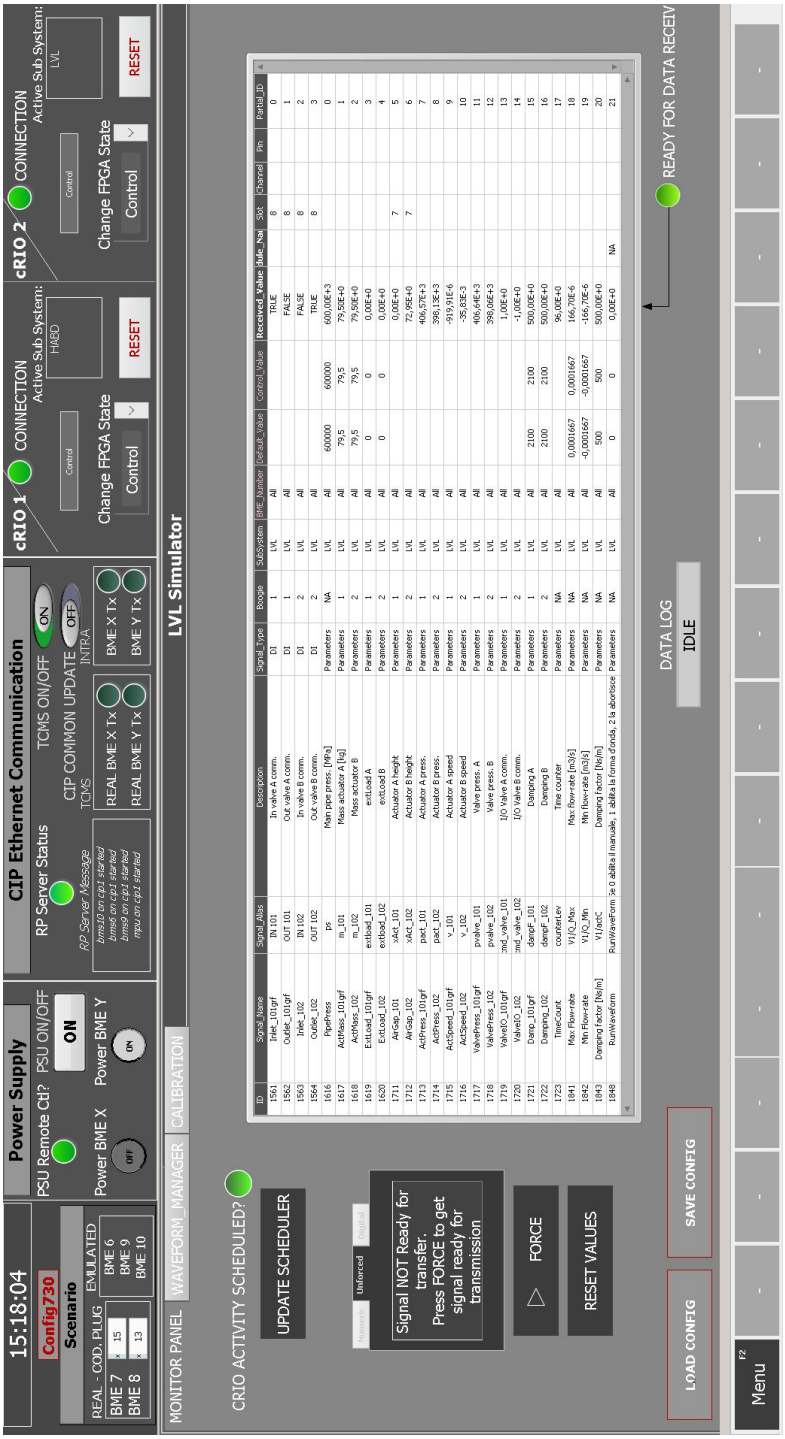

Figura 6.2: Interfaccia LabVIEW

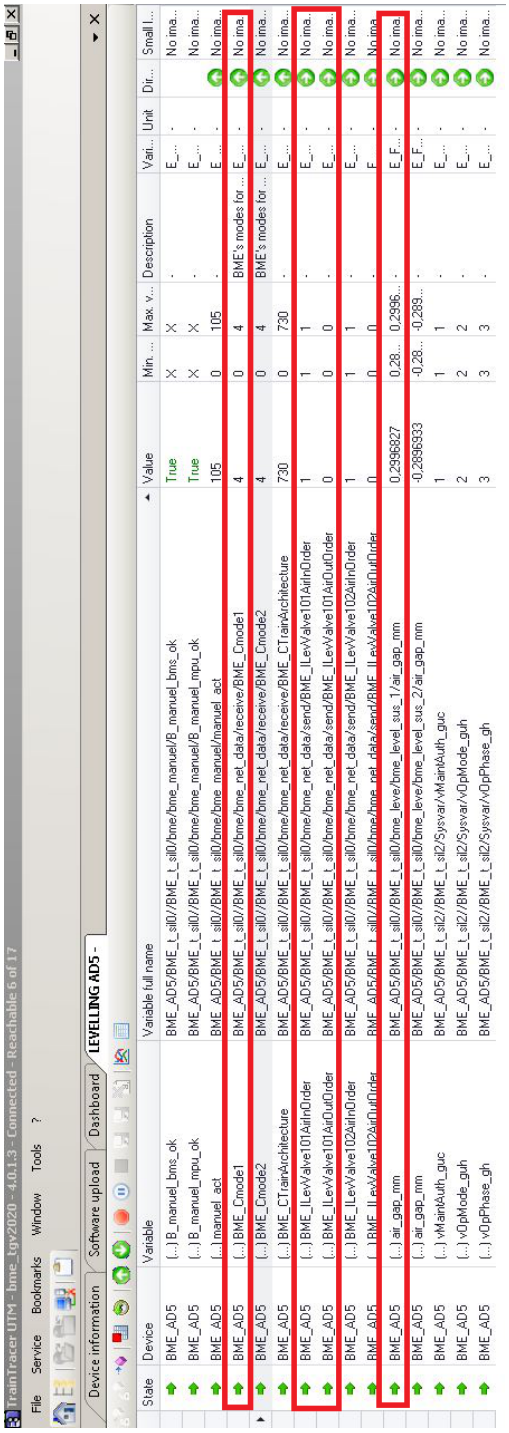

Figura 6.3: Interfaccia Train Tracer

6.1 Prove di validazione

Le prove effettuate sono volte a riprodurre il comportamento delle sospensioni quando azionate manualmente e in funzionamento Running con variazione di carico sulla sospensione.
Le prove riprodotte, secondo specifica, sono rispettivamente le seguenti:

- BMS-SRTS-004862

- BMS-SRTS-004921

La prova BMS-SRTS-004862, che mira all'esecuzione del modello usando comandi manuali, per essere riprodotta richiede il settaggio di un parametro da Train Tracer, noto come *manual levelling*; quando questo è pari a 1 è possibile comandare in carico o scarico le elettrovalvole.
Settando *manual levelling* = 1 è possibile comandare in apertura l'elettrovalvola imponendo il comando *manual mode sus 1* = 5, mentre con il comando *manual mode sus 1* = 4 l'elettrovalvola viene comandata in scarico.
I comandi impartiti e la conseguente variazione di altezza sono visibili nelle Figure 6.4 e 6.5. Ovviamente osservando l'andamento dell'altezza, poiché stiamo lavorando in comando manuale e il controllore non è in azione, ossia non è chiamato a gestire alcun riferimento di altezza, quest'ultima raggiunge il fine corsa.
La prova per ritenersi conclusa e quindi valida, deve essere eseguita anche sulla sospensione 102 che viene comandata dal BME 8. I comandi e la conseguente variazione di altezza sono visibili nelle Figure 6.6 e 6.7.
Si nota che da quando viene azionato il comando di apertura elettrovalvola trascorrano circa 90 s prima che l'altezza inizi a salire. Questo comportamento è evidente nel caso di prova sulla sospensione 101, in quanto è richiesto del tempo anche per riempire il serbatoio con un volume pari a 10 l. Nel caso della sospensione 102, invece, non si verifica questo ritardo, in quanto il sistema parte da un'altezza diversa da 0 e il serbatoio è già carico.
I parametri iniziali sono elencati in Tabella 6.1.

P_s	5 bar
Inlet/Outlet Accuracy	25 mm
m	156 kg

Tabella 6.1: Parametri Prova 004862

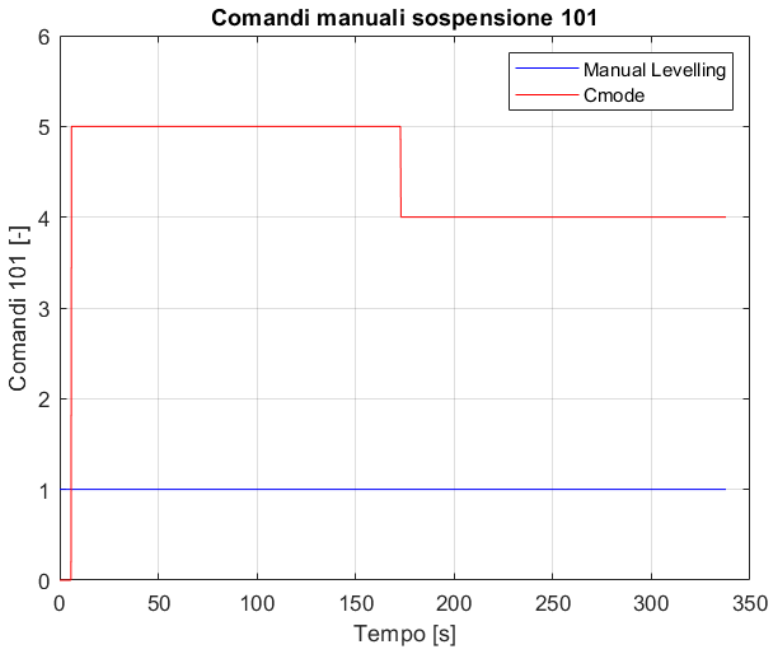

Figura 6.4: Comandi manuali sospensione 101

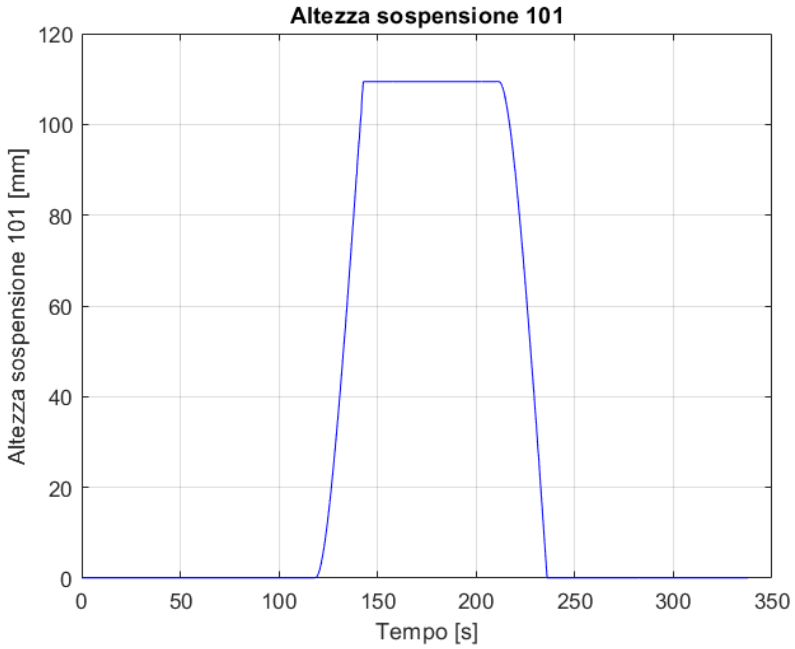

Figura 6.5: Altezza sospensione 101

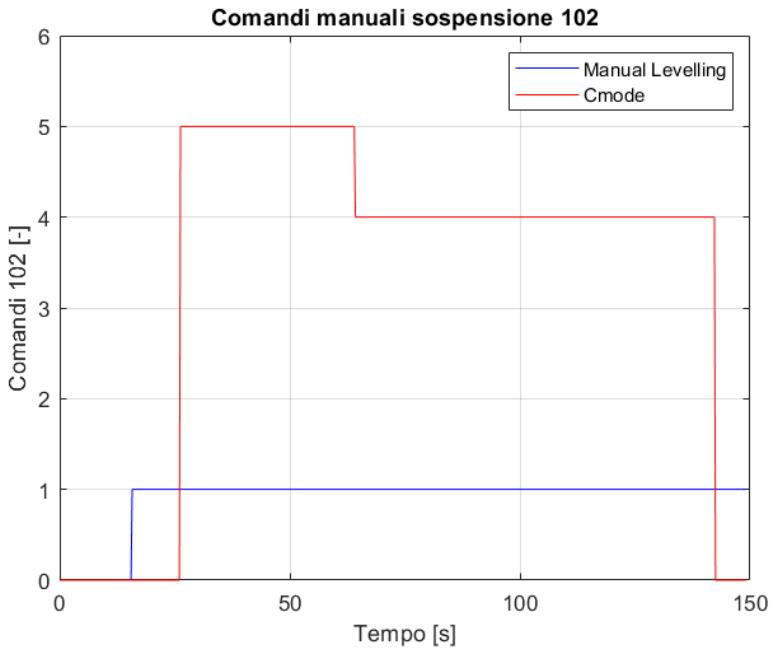

Figura 6.6: Comandi manuali sospensione 102

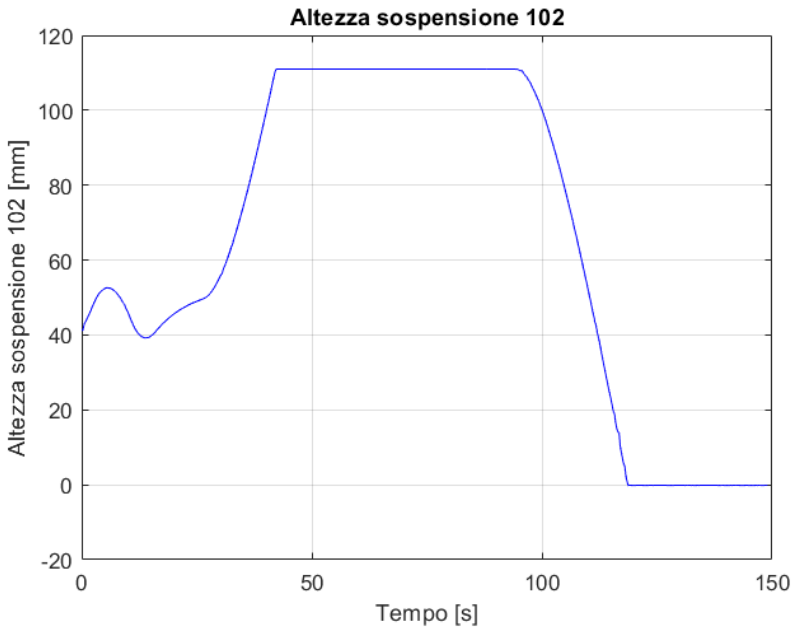

Figura 6.7: Altezza sospensione 102

La prova BMS-SRTS-004921 ha come scopo la riproduzione del funzionamento in modalità running, quindi mantenere un'altezza fissa, e la valutazione della risposta del sistema alla variazione della massa.
La prova in questo caso è stata effettuata andando a far lavorare il modello in modo automatico, quindi si va ad impartire il comando Cmode desiderato da Train Tracer, e il sistema manda in regolazione l'altezza. Con questa modalità di funzionamento il controllore è all'interno del BME, quindi il modello riceve come input i comandi valvola, prodotti al loro volta in base al valore di altezza di feedback che il BME riceve dal modello. Il riferimento di altezza è modificabile, e in questo caso il valore target è pari a $h_{ref} = 57\ mm$.
I comandi valvola e l'andamento dell'altezza sono rappresentati nelle Figure 6.8 e 6.9 e sono relativi alla sospensione 101; è stato omesso il comportamento della sospensione 102 in quanto analogo alla sospensione 101.
Le condizioni iniziali della prova sono uguali a quella della prova BMS-SRTS-004862, riassunti in Tabella 6.1.
La variazione di massa che viene imposta alla sospensione è di $m = 20.5\ kg$; in particolar modo, la rimozione di questa massa si ha nell'istante $t = 125\ s$, mentre l'addizione nell'istante $t = 255\ s$. A questa modifica di massa corrisponde rispettivamente un aumento dell'altezza che raggiunge il fine

corsa, e una riduzione che genera lo schiacciamento della stessa.
Affinché la prova risulti valida, è stato necessario verificare i limiti imposti dalla specifica Alstom. In questo caso, poiché la prova è stata eseguita sia su banco di prova che attraverso simulazione simulink, i limiti da rispettare sono espressi dalle equazioni 5.1, 5.2 e 5.3. Anche in questo caso i limiti sono rispettati, nonostante il target sia diverso. Inoltre, l'andamento dell'altezza è concorde con quanto analizzato nel *Capitolo 5*, confermando la corretta realizzazione del controllore del modello simulink.

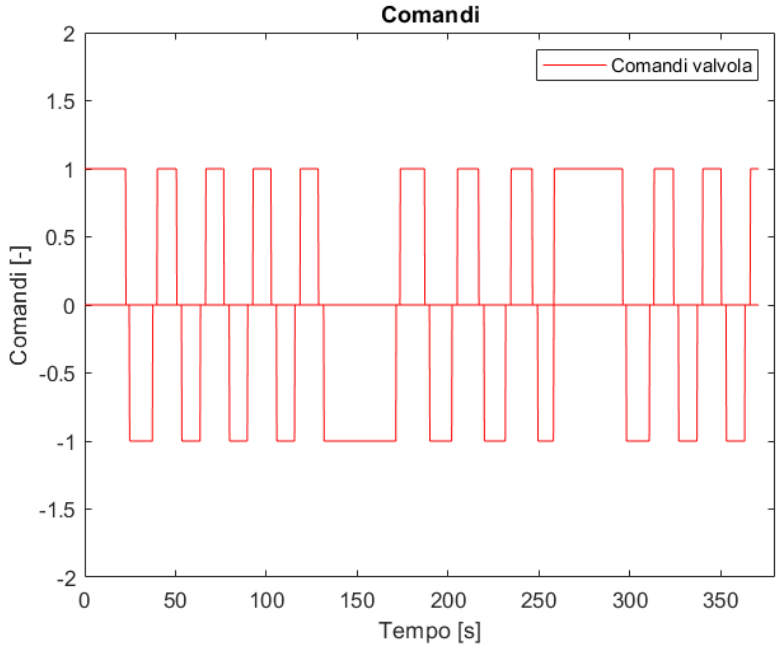

Figura 6.8: Comandi valvola prova 004921

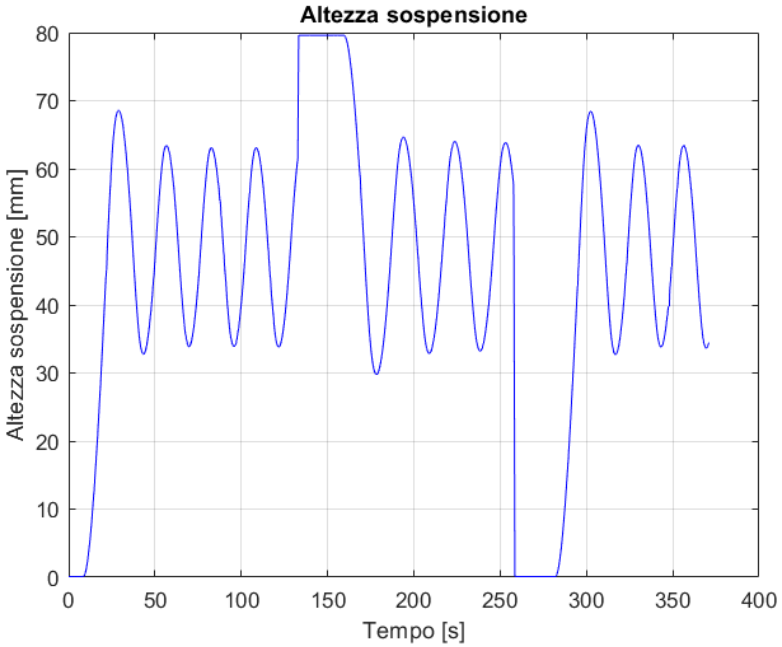

Figura 6.9: Altezza prova 004921

Capitolo 7

Conclusioni

La tesi in oggetto ha visto la creazione e validazione di un modello Matlab/Simulink di sospensioni secondarie di un treno alta velocità. Lo scopo di avere un modello validato è quello di poterlo utilizzare nei test che precedono le prove su treno e la finale messa in produzione dello stesso in modo più rapido e agevole. In questo modo si riuscirebbe a prevenire problemi il cui impatto sarebbe maggiore su test reali.
La realizzazione del modello ha visto la definizione dei fenomeni fisici che coinvolgono l'attuazione della sospensione e la successiva implementazione in simulink.
La validazione, invece, ha seguito due strade parallele. La prima ha visto coinvolto il banco di prova con dimensioni scalate. La validazione è stata eseguita confrontando le prove tra banco e modello, tenendo conto che la gestione del banco è affidata al BME, sul quale è implementato il software *Levelling*, mentre il modello ha un controllore implementato all'interno. La seconda, ha visto l'integrazione del modello con il software *Levelling*, e la verifica che le prove a cui veniva sottoposto rispettassero la specifica e i limiti imposti da Alstom.
Analizzando i risultati ottenuti, in particolar modo le simulazioni eseguite con il modello si evidenzia un rispetto dei limiti imposti da specifica Alstom, e un comportamento fedele con quanto avviene su banco di prova.
Una delle possibili cause delle elevate oscillazioni sarebbe da imputare al fatto che il banco di prova è un ibrido di componenti che realmente ritroveremo applicati su treno, come ad esempio i serbatoio da 10 l o le elettrovalvole, ma le dimensioni degli attuatori e le lunghezze del piping sono nettamente scalate rispetto alle reali applicazioni. La pressione di alimentazione scelta sul banco

è la stessa che si avrà a bordo treno, quindi per ridurre problemi legati di instabilità dovuti alle elevate portate ad alte pressioni è stato necessario intervenire aggiungendo orifizi a monte e valle delle elettrovalvole.
Quindi per determinare in definitiva la corretta realizzazione del modello Simulink sarà necessario esaminare i risultati che si ottengono dall'integrazione del software *Levelling* con il treno reale.
Inoltre, un possibile punto di miglioramento potrebbe essere rappresentato dell'implementazione un controllore di tipo PI o PID in modo da avere una gestione più accurata del sistema di regolazione e quindi dei comandi valvola. L'aver implementato un controllore di tipo ON/OFF non contribuisce a generare stabilità al modello determinando un funzionamento oscillante del sistema.
Possibili sviluppi futuri dal punto di vista del modello simulink sono rappresentati dallo studio delle proprietà elastiche dell'attuatore e dalle deformazioni orizzontali che si ottengono durante il sollevamento dello stesso, che in fase di realizzazione tesi sono state trascurate in quanto l'attuatore è dieci volte più piccolo rispetto a quello montato su treno. Inoltre, tutti quei parametri come area e smorzamento attuatore, considerati costanti, dovranno essere modellati in modo da considerare una loro variazione al variare del carico e della pressione di alimentazione.

Bibliografia

[1] Malin Presthus. «Derivation of Air Spring Model Parameters for Train Simulation». In: (2002) (cit. a p. 1).

[2] *Vehicle Suspension Systems*. Railway Technical Web Pages (cit. a p. 3).

[3] G. Belforte. *Manuale di pneumatica*. Tecniche nuove, 2005 (cit. a p. 17).

[4] G. Belforte. *Pneumatica. Principi di base, strumentazione, componenti, tecniche digitali e circuiti, impianti, applicazioni*. Tecniche nuove, 1987 (cit. a p. 20).

Appendice A

Matlab script

```
clear all
close all
clc

%% Control param.
% ------------------------------------------------------------------------------------

flagSim = input('Select (0) for code generation or (1) for simulation: ');
swValve = input('Select (0) for close-loop sim. or (1) for rec. data as input: '); % param. to switch bewteen simulation (0) or rec data as input (1)
swDamp = input('Select (0) for fix value, (1) for math.model or (2) for empiric table: '); % param. to switch between fix (0), math. (1) or empiric. dampFactor (2) [-]

Tstep = 5e-3; % solver tolerance --> tuning wrt TB performances

Q_MaxParam = 1320; % [l/min] max value for flow-rate
Q_MinParam = -Q_MaxParam; % [l/min] min value for flow-rate

actC_Param = 5e2; % [N*s/m] damping coeff.
cylR_Param = 0.0285; % [m] actuator radius

actM_sxParam = 79.5; % DEFAULT mass 140 [kg]
actM_dxParam = 79.5; % DEFAULT mass 140 [kg]
```

```

flagCtrl = 1;  % [-] flag for valve controller hysteresis (1 is DEFAULT value)

%% Input from TB SAV: rec. IN/OUT valve
% ______________________________________________________________________

if swValve
    addpath('.\recFilesTB_SAV')

     [timeIN_Val, airGapOUT_101, airGapOUT_102, dataIN_Val_101, dataOUT_Val_101, dataIN_Val_102, dataOUT_Val_102] = valveInTB_FUN('Prova Fabio.xlsx');
     %      [timeIN_Val, airGapOUT, dataIN_Val, dataOUT_Val] = valveInTB_FUN0('recTB_SAVtest0.xlsx');

    timeSim = timeIN_Val(end) / 1e3;
    t_valV = (0 : Tstep : timeSim)';

    x0_sx = airGapOUT_101(1) / 1e3;  % to match IC from rec [m]
    x0_dx = airGapOUT_102(1) / 1e3;  % to match IC from rec [m]
else
    timeSim = 5e2;
    t_valV = (0 : Tstep : timeSim)';
    timeIN_Val = t_valV * 1e3;

    x0_sx = 0;  % [m] init.condition left
    x0_dx = 0;  % [m] init.condition right

    dataDEF0 = zeros(size(t_valV));
    airGapOUT_101 = dataDEF0;
    airGapOUT_102 = dataDEF0;
    dataIN_Val_101 = dataDEF0;
    dataOUT_Val_101 = dataDEF0;
    dataIN_Val_102 = dataDEF0;
    dataOUT_Val_102 = dataDEF0;
end

dataVoltP_101 = interp1(timeIN_Val / 1e3, dataIN_Val_101, t_valV);
dataVoltN_101 = interp1(timeIN_Val / 1e3, dataOUT_Val_101, t_valV);
dataVoltP_101(dataVoltP_101 < 1) = 0;
```

```
dataVoltN_101(dataVoltN_101 < 1) = 0;

dataVoltP_Mat_101 = [t_valV dataVoltP_101];
dataVoltN_Mat_101 = [t_valV dataVoltN_101];

dataVoltP_102 = interp1(timeIN_Val / 1e3, dataIN_Val_102, t_valV
    );
dataVoltN_102 = interp1(timeIN_Val / 1e3, dataOUT_Val_102,
    t_valV);
dataVoltP_102(dataVoltP_102 < 1) = 0;
dataVoltN_102(dataVoltN_102 < 1) = 0;

dataVoltP_Mat_102 = [t_valV dataVoltP_102];
dataVoltN_Mat_102 = [t_valV dataVoltN_102];

%% Model init.


gainTB = 1e0;  % scaling from TB to train
pT = 1e5;  % [Pa] tank pressure
pS = (5e5 + pT);  % [Pa] manifold pressure

% Reference input for L/R side in case of close-loop simulation

t_hRefL = [0 0.1 0.3 0.4 0.45 0.65 0.75 0.95 1] * timeSim;
hRefL = [95 101 101 125 125 195 195 95 95] / 1e3;  % m
% t_hRefL = [0 0.1 0.3 (0.3 + eps) 0.45 0.65 (0.65 + eps) 0.95
    1] * timeSim;  % step time for RUNNING or WEIGHT MODE
% hRefL = [95 95 95 160 160 160 95 95 95] / 1e3;  % m: constant
    x_ref for RUNNING or WEIGHT MODE
xRefMatL = [t_hRefL(:) (hRefL(:) - 0.095) * 1];

t_hRefR = [0 0.1 0.3 0.4 0.45 0.65 0.75 0.95 1] * timeSim;
hRefR = [95 101 101 125 125 195 195 95 95] / 1e3;  % m
% t_hRefR = [0 0.1 0.3 (0.3 + eps) 0.45 0.65 (0.65 + eps) 0.95
    1] * timeSim;  % step time for RUNNING or WEIGHT MODE
% hRefR = [95 95 95 160 160 160 95 95 95] / 1e3;  % m: constant
    x_ref for RUNNING or WEIGHT MODE
xRefMatR = [t_hRefR(:) (hRefR(:) - 0.095) * 1];

% Left Suspension

xMax_sx = 0.08;  % [m] max stroke left
xMin_sx = x0_sx;  % [m] min stroke left

```

```
% Right Suspension

xMax_dx = 0.110;  % [m] max stroke right
xMin_dx = x0_dx;  % [m] min stroke right

% Init. condition and constant (hp: T constant)

T0 = 20 + 273;  % [K]
p0 = pT * T0 / 293;  % [Pa]: for hp, p = 1e5 Pa @ 20  C
R = 287.2;  % gas constant
rho0 = p0 / (R * T0);  % density [kg/m^3]
g0 = 9.81;  % [m/s^2]

mu_mat = load('viscAirT.txt');  % Dynamic viscosity: mu = mu(T C ) tab
mu = interp1(mu_mat(:, 1), mu_mat(:, 2), T0 - 273) * 1e-5;  % Kg / (s * m)  Dynamic viscosity

pMax = 8e5;  % [Pa] max pressure for safety valve
pMin = 5e4;  % [Pa] min pressure
Q_Max = Q_MaxParam / 6e4;  % [m ^3 / s] max flow-rate
Q_Min = Q_MinParam / 6e4;  % [m ^3 / s] min flow-rate

Nfilter = 1e2;  % rad / s: derivative filter constant - [1e2 for continuous state; 7e-1 for discrete]
Ndelay = Tstep;   % s: T value of TF delay

% Lookup table for controller param.

errMin = 0.002;  % [m]: 0.025 in case of external load sin() --> RUNNING MODE
errMinInlet = errMin;  % [m]
errMinOutlet = errMin;  % [m]
hystValInlet = errMinInlet * flagCtrl;  % [m]: * 1 is DEFAULT VALUE
hystValOutlet = errMinOutlet * flagCtrl;  % [m] * 1 is DEFAULT VALUE
voltMax = 110;  % [V] elettro-valve supply

% Lookup table for pipe's minor losses due to curvature/bending (Kg * beta) sand orifice (Cd)

Re = [6e3; 3e4; 1e5; 3e5; 1e6];
R_d_ratio = [0.75, 1, 2, 4];
```

```
K_g = [1.6 1 0.6 0.32 0.26; 1.38 0.8 0.42 0.2 0.16; 1.2 0.63 0.3 0.11 0.08; 1.02 0.52 0.22 0.08 0.05]';  % curve Kg = Kg(Re, R / d)

teta = [0 20  40   90 100  124 160  180];
beta = [0 0.3 0.54 1  1.06 1.2 1.34 1.4];  % curve beta = beta(teta)

ratioCd = [0 0.55 0.8 0.95 1];
Cd_vect = [0.611 0.7 0.775 0.875 1];

% Pipe 1: from supply to valve

Lsup2val = 780 / 1e3;                        % mm --> m Pipe length supply2valve
Dsup2val = 9 / 1e3;                          % mm --> m Pipe diameter ";
ng_sup2val = 0;                              % - Pipe bends number "
Rd_ratio_sup2val = 1;                        % - Pipe curve ratio "
teta_sup2val = 90;                           % Pipe curve angle "

orifON1 = 0; % 1 if pipe has an orifice
Dsup2valOrif = min(2 / 1e3, Dsup2val);       % mm --> m Orifice diameter ";
Cd1 = interp1(ratioCd, Cd_vect, (Dsup2valOrif / Dsup2val) ^2);  % - Minor losses coefficient

% Valve param.

d = 1e-3;   % [m] orifice diameter
l = 2e-3;   % [m] orifice length
C1 = (0.029 * d ^2) / (sqrt(l / d^1.25 + 510));  % [m^3/sPa] conductance valve + orifice
b1 = 474 * C1 / d^2;  % [-] critical ratio

% Pipe 2: from valve to actuator

Lval2act = 1050 / 1e3;                       % mm --> m Pipe length valve2actuator
Dval2act = 9 / 1e3;                          % mm --> m Pipe diameter ";
```

```
ng_val2act = 0;                                % - Pipe bends number "
Rd_ratio_val2act = 1;                          % - Pipe curve ratio "
teta_val2act = 90;                             % Pipe curve angle "

orifON2 = 0;  % 1 if pipe has an orifice
Dval2actOrif = min(3 / 1e3, Dval2act);                    % mm ---> m            Orifice diameter ";
Cd2 = interp1(ratioCd, Cd_vect, (Dval2actOrif / Dval2act) ^2);  % -            Minor losses coefficient

% Discharge orifice: from valve to tank

Dval = 12 / 1e3;                               % mm ---> m Pipe diameter ";
orifON3 = 1;  % 1 if pipe has an orifice
DvalOrif = min(0.2/ 1e3, Dval);                % mm ---> m Orifice diameter ";
Cd3 = interp1(ratioCd, Cd_vect, (DvalOrif / Dval) ^2);  % - Minor losses coefficient

% Actuator param. left side

actM_sx = actM_sxParam * gainTB;  % DEFAULT mass 140 [kg]
t_actMs_sx = [0 0.5 1] * timeSim;
% actMs_sx = [1 1.1 1.2] * actM_sx;  % ramp mass if x_ref is constant [kg]---> WEIGHT MODE
actMs_sx = ones(1, length(t_actMs_sx)) * actM_sx;  % constant mass [kg]
actMsMat_sx = [t_actMs_sx(:) actMs_sx(:)];

% Actuator param. right side

actM_dx = actM_dxParam * gainTB;  % DEFAULT mass 140 [kg]
t_actMs_dx = [0 0.5 1] * timeSim;
% actMs_dx = [1 1.1 1.2] * actM_dx;  % ramp mass if x_ref is constant [kg]---> WEIGHT MODE
actMs_dx = ones(1, length(t_actMs_dx)) * actM_dx;  % constant mass [kg]
actMsMat_dx = [t_actMs_dx(:) actMs_dx(:)];

% Cylinder and tank param.

```

```
cylR = cylR_Param * sqrt(gainTB);  % radius [m]
cylArea = cylR ^ 2 * pi;  % cylinder area [m^2]

tankV = 1e-3;  % [m^3] tank volume = 10 liters
xDamp = 0.08;  % [m] initial stroke only actuator
x_extra = xDamp + tankV / cylArea;  % [m] initial equivalent (+ tank) stroke

% Damping factor for constant value approach

actC = actC_Param * gainTB;  % damping coeff. [N*s/m]

% Damping factor constant for math.model approach

qDamp = 1.25;  % coeff. for empiric. dampFactor [-]

% Lookup table approach for damping factor

pVect = [3e5; 4e5; 5e5; 6e5; 7e5; 8e5];
hVect = [0, 40, 70, 100] / 1e3 + xDamp;
actCmat = [695.7703515  971.5174315 1247.666794 1524.015283 1800.476838 2009.649637;
    580.8618671 811.06852   1041.611017 1272.319754 1503.122885 1677.750191;
    514.8790146 718.9354027 923.2894847 1127.790923 1332.376032 1487.166595;
    508.3075134 711.4988593 854.7999629 1090.533199 1280.086198 1469.651097]';  % damping factor coeff. curve [N*s/m]

p0_sx = pT;  % [Pa]: to have system in pressure ready @ time = 0 s
p0_dx = pT;  % [Pa]: to have system in pressure ready @ time = 0 s

extF = 0 * g0;  % external load [N]: not 0 only for RUNNING MODE
t_extLd = 0 : Tstep : timeSim;
extLd = sin(2 * pi * 1 * t_extLd) * extF;  % load variation @ 1 Hz [N]
extLdMat = [t_extLd(:) extLd(:)];

%% Simulation or code generation
%
```

```
fileNameSim = 'double_LEV_TGV2020_V1';

if flagSim
    open(['',fileNameSim,''])
    sim(['',fileNameSim,''])
else
    timeSim = 'Inf';
    p0_sx = pT;
    p0_dx = pT;
    rtwbuild('double_valve_act_pipe_LEV_TGV2020_V1')
end
```