Politecnico di Torino

FACOLTÀ DI INGEGNERIA MECCANICA
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica indirizzo Automazione

Tesi di laurea magistrale

Modellazione, realizzazione e controllo mediante PLC di un sistema a pendolo inverso ad attuazione pneumatica

Candidato:
Marco Pontin
Matricola 232407

Relatore:
Prof. Terenziano Raparelli

Correlatori:
Prof. Luigi Mazza

Prof. Federico Colombo

Prof. Andrea Trivella

Anno Accademico 2017–2018

Abstract

Il presente elaborato è dedicato allo studio, la realizzazione ed il controllo mediante PLC di un sistema a pendolo inverso ad azionamento pneumatico. Più in dettaglio lo scopo dell'attività è quello di realizzare un banco di prova che venga impiegato come apparecchiatura didattica durante i corsi di automazione a fluido.

Dopo la rassegna di parte della letteratura scientifica sull'argomento trattato, viene descritta la fase di progettazione e realizzazione del banco di prova, la quale, presentata per prima per motivi di chiarezza esplicativa, è stata nella realtà preceduta dallo studio approfondito del problema, cui è dedicata la terza parte dell'elaborato. L'analisi si compone di due fasi: lo sviluppo in Matlab del modello lineare del sistema e di quello non lineare in LMS ImagineLab Amesim. All'attività di modellazione è seguito lo studio della stabilizzazione, ottenuta mediante due reti compensatrici di tipo PID, una dedicata al controllo della posizione del carrello, l'altra a quello dell'angolo del pendolo.
La programmazione del controllore, un PLC della casa Siemens AG commercializzato con la sigla S7-1200, è presentata nel quarto capitolo. Durante l'attività di tesi si è inoltre sviluppata un'applicazione *Windows Form*, denominata P.I.P. Control, con la quale è possibile comunicare con il PLC e gestire ogni funzionalità del banco.
L'ultima parte dell'elaborato è dedicata all'analisi dei risultati delle prove sperimentali ed al confronto degli stessi con quelli simulati in Matlab ed Amesim sfruttando i modelli precedentemente realizzati.

Indice

Introduzione **1**

1 Rassegna della letteratura scientifica **3**

2 Il banco di prova **4**
2.1 Progettazione dei componenti 4
2.1.1 Progettazione del pendolo 4
2.1.2 Progettazione del gruppo del carrello 6
2.2 Caratteristiche dei componenti 7
2.2.1 Cilindro pneumatico 7
2.2.2 Valvole 7
2.2.3 Trasduttore angolare 8
2.2.4 Trasduttore di posizione LVDT 8
2.2.5 Guida lineare 9
2.2.6 PLC Siemens S7-1200 9
2.3 La struttura del banco di prova 11
2.3.1 Circuito pneumatico 11
2.3.2 Sistema meccanico: carrello e pendolo 12
2.3.3 Circuito elettrico 13
2.4 Costruzione del banco di prova 13
2.4.1 Montaggio della struttura ed operazioni preliminari 13
2.4.2 Assemblaggio del gruppo carrello e pendolo 14
2.4.3 Montaggio del cilindro, del sensore LVDT e dei PLC 15
2.4.4 Realizzazione dell'impianto elettrico 15
2.5 Utilizzo del Banco di prova 18
2.5.1 Funzionamento di base 18
2.5.2 Funzionamento avanzato 19

3 Studio analitico del problema **21**
3.1 Studio del problema linearizzato 21
3.1.1 Analisi del sottosistema meccanico 21
3.1.2 Analisi del sottosistema pneumatico 23
3.1.3 Rappresentazione in spazio degli stati 26
3.1.4 Studio del controllore 30
3.2 Studio del sistema non lineare mediante software Amesim 41
3.2.1 Componenti pneumatici 41
3.2.2 Componenti meccanici 44
3.2.3 Componenti della libreria Segnali 45

3.2.4 Risultati di simulazione 47

4 Programmazione del PLC **52**
4.1 Struttura del programma PLC 52
4.1.1 Blocco OB Main 53
4.1.2 Blocco OB Square Wave Cyclic Interrupt 54
4.1.3 Blocco OB Sine Wave Cyclic Interrupt 55
4.1.4 Blocco OB PID Cyclic Interrupt 55
4.1.5 Blocco FC Aggiornamento PID Theta 57
4.1.6 Blocco FC Aggiornamento PID X 57
4.1.7 Blocco FC Cambiamento Manuale X SET 57
4.1.8 Blocco FC Manual Override 57
4.1.9 Blocco FC Inizializzazione Sistema 58
4.1.10 Blocco FC Reset PID Prima Scansione 58
4.1.11 Blocco FC Stop Sistema 58
4.1.12 Blocco FC Taratura Zero Angolo Theta 58
4.2 Struttura del controllore PID Compact 59

5 Risultati Sperimentali **60**
5.1 Ottimizzazione sperimentale dei controllori PID 60
5.2 Prove Sperimentali 63
5.2.1 Inseguimento di segnale a gradino 63
5.2.2 Inseguimento di segnale ad onda quadra 65
5.2.3 Inseguimento di segnale ad onda sinusoidale 67
5.2.4 Risposta a disturbi esterni impulsivi 69
5.3 Confronto tra le prove sperimentali ed i risultati simulati 73

6 Prospettive di sviluppo **76**

Appendice A **78**
A.1 Funzionamento dei driver delle valvole 78

Appendice B **81**
B.1 Calcolo del coefficiente di attrito viscoso 81
B.2 Calcolo delle funzioni di trasferimento $G_{u\theta}$ e $G_{\theta x}$ e G_{ux} 82

Appendice C **84**
C.1 Codice sorgente del programma per PLC S7-1200 84

Appendice D **102**
D.1 Codice sorgente dell'applicazione P.I.P Control 102

Appendice E **110**
E.1 Listati Matlab 110
E.1.1 Main: 110
E.1.2 Calcolo sfasamento: 112

Appendice F **113**
F.1 Disegni Tecnici 113

Elenco delle figure

1 a) Pendolo inverso lineare. b) Pendolo inverso circolare 1

2.1 Assieme del pendolo 5
2.2 Componenti del gruppo carrello 6
2.3 Collare di ammortizzo in gomma 6
2.4 Valvola "AP-7211-LR2-U7" e relativo simbolo ISO 7
2.5 PLC Siemens S7-1200 9
2.6 Modulo "Analog Output" per S7-1200 10
2.7 Schema sinottico del banco di prova 11
2.8 Schema del cinematismo "carrello e cerniera" 12
2.9 Il banco di prova completo 13
2.10 Struttura del banco di prova 14
2.11 Vista del banco di prova e della disposizione dei componenti 15
2.12 Vista frontale dell'interno del banco di prova 16
2.13 Vista del retro del banco di prova 17
2.14 Pannello di controllo 17
2.15 Dispositivo di controllo manuale del banco 18
2.16 Pagine di interfaccia dell'applicazione P.I.P. Control 20

3.1 Schema del carrello con pendolo invertito 22
3.2 Diagrammi di corpo libero del carrello e del pendolo 22
3.3 Autovalori della matrice di transizione degli stati A 28
3.4 Diagramma di bode della funzione di trasferimento $G_{u\theta}$ 29
3.5 Diagramma di bode della funzione di trasferimento G_{ux} 29
3.6 Diagramma di bode della funzione di trasferimento $G_{\theta x}$ 30
3.7 Sintetico schema a blocchi del sistema 30
3.8 Schema a blocchi del sistema con controllo 31
3.9 Diagramma di Nyquist della funzione $G_{u\theta}$ in anello aperto 32
3.10 Diagramma di Nyquist della funzione $k_p G_{u\theta}$ al variare di k_p 33
3.11 Diagramma di Nyquist con un controllore PD con $k_p = 1.5$, $k_d = 0.8$, $T_f = 0.05$ 34
3.12 Diagramma di Nyquist con un controllore PI con $k_p = 1.0$, $k_i = 6.5$ 34
3.13 Effetto della variazione di k_i sul diagramma di Nyquist di $C_{PI} G_{u\theta}$ 35
3.14 Margini di stabilità con controllore PI, $k_p = 1.0$ $k_i = 6.5$ 36
3.15 Margini di stabilità con controllore PID C_θ 37
3.16 Diagramma di Nyquist in anello aperto della funzione $C_\theta G_{u\theta}$ 37
3.17 Schema a blocchi del sistema con anello interno ridotto 38
3.18 Diagramma di Nyquist in anello aperto della funzione G_{ux} 39
3.19 Diagramma di Nyquist in anello aperto della funzione $C_\theta G_{u\theta}$ 40
3.20 Margini di stabilità con controllore PID C_θ 40

3.21 Modello Amesim del sistema 41
3.22 Componenti della libreria pneumatica 42
3.23 Dimensioni delle connessioni pneumatiche utilizzate 43
3.24 Componenti delle librerie meccaniche 44
3.25 Generatore di impulsi 46
3.26 Modello Amesim del sistema completo 46
3.27 Simulazione Amesim con riferimento costante e forza iniziale $F_0 = 0.1\ N$ . . 47
3.28 Simulazione Amesim con riferimento costante e forza iniziale $F_0 = 5\ N$ . . . 48
3.29 Simulazione Amesim con riferimento costante e forza iniziale $F_0 = 0.1\ N$ . . 48
3.30 Simulazione Amesim con variazione a gradino di 200 mm di x_{SET} 49
3.31 Simulazione Amesim con riferimento sinusoidale $T = 10\ mm$ e $A = 100\ mm$ 50
3.32 Simulazione Amesim con riferimento sinusoidale $T = 2.5\ mm$ e $A = 100\ mm$ 50
3.33 Simulazione Amesim di un disturbo impulsivo di 50 N sul carrello 51
3.34 Simulazione Amesim di un disturbo impulsivo di di 0.5 N al pendolo 51

4.1 Schema sinottico del programma per PLC 53
4.2 Uscite Q nella generazione di un'onda quadra con periodo di 1s 54

5.1 Risultati prova sperimentale con controllori ricavati in Amesim 61
5.2 Risultati prova sperimentale con controllori ricavati in Amesim, ma $k_{i_\theta} = 12.0$ 61
5.3 Prova di risposta ad un gradino di ampiezza pari a 100 mm 62
5.4 Risultati sperimentali con segnale x_{SET} sinusoidale, $A = 100\ mm$ e $T = 10\ s$ 62
5.5 Risposta a gradino, $A = 200\ mm$, $l = 550\ mm$ e $m = 180\ g$ 64
5.6 Risposta a gradino, $A = 200\ mm$, $l = 400\ mm$ e $m = 180\ g$ 64
5.7 Risposta a gradino, $A = 200\ mm$, $l = 550\ mm$ e $m = 1\ kg$ 65
5.8 Inseguimento di onda quadra, $A = 100\ mm$, $T = 10\ s$ 66
5.9 Inseguimento di onda quadra, $A = 100\ mm$, $T = 2.5\ s$ 66
5.10 Inseguimento di onda sinusoidale, $A = 100\ mm$, $T = 10\ s$ 67
5.11 Inseguimento di onda sinusoidale, $A = 100\ mm$, $T = 2.5\ s$ 68
5.12 Inseguimento di onda sinusoidale, $A = 100\ mm$, $T = 10\ s$ 69
5.13 Risposta a disturbi impulsivi sul carrello con $l = 550\ mm$ e $m = 180\ g$ . . . 70
5.14 Risposta a disturbi impulsivi sul pendolo con $l = 550\ mm$ e $m = 180\ g$ . . . 70
5.15 Risposta a disturbi impulsivi sul pendolo con $l = 400\ mm$ e $m = 180\ g$ . . . 71
5.16 Risposta a disturbi impulsivi con $l = 550\ mm$ e $m = 570\ g$ 71
5.17 Risposta a disturbi impulsivi con $l = 550\ mm$, $m = 180\ g$ e $k_{d\theta} = 1.2$ 72
5.18 Modello simulink impiegato per i test in Matlab 73
5.19 Risultati simulati vs sperimentali in prova a gradino 74
5.20 Risultati simulati vs sperimentali con set sinusoidale, $A = 100mm$, $T = 10\ s$ 75
5.21 Risultati simulati vs sperimentali con set sinusoidale, $A = 100mm$, $T = 5\ s$. 75

6.1 Risposta a gradino con valvole digitali comandate in PWM 77

A.1 Andamento di un segnale PWM con $T = 25$ e $dc = 0.5$ 79
A.2 Andamento della corrente in un solenoide alimentato in PWM 79

Elenco delle tabelle

2.1 Caratteristiche del cilindro pneumatico 7
2.2 Caratteristiche delle valvole 8
2.3 Caratteristiche del sensore angolare 8
2.4 Caratteristiche del sensore angolare 9
2.5 Caratteristiche del PLC Siemens S7-1200 10
2.6 Caratteristiche del Modulo "Analog Output" 10
2.7 Codice colori dei cavi dei segnali di input/output del PLC 16

3.1 Valori sperimentali delle variabili del modello 27
3.2 Autovalori della matrice di transizione degli stati A 28
3.3 Caratteristiche dell'aria assunta come gas perfetto 42
3.4 Caratteristiche delle valvole nel modello Amesim 42
3.5 Caratteristiche del cilindro nel modello Amesim 44

B.1 Risultati sperimentali delle prove per il calcolo del coefficiente di attrito b . 81

Introduzione

Il problema del controllo e della stabilizzazione dei sistemi a "pendolo inverso" è uno dei più studiati nell'ambito della teoria dei controlli. Tra gli aspetti che lo hanno reso tale troviamo la sua semplicità, sia in termini di comprensione e formalizzazione matematica, sia in termini di realizzazione. Altra caratteristica rilevante è la possibilità di complicare a piacimento l'analisi, nonché il sistema in sé, passando ad esempio dal pendolo semplice, al doppio pendolo, a meccanismi ancora più complessi, oppure ancora, utilizzando attuatori di diversa natura. Un ultimo aspetto importante è indubbiamente costituito dalle innumerevoli applicazioni pratiche quali la stabilizzazione di razzi vettori in partenza, il mantenimento di robot in posizione eretta, il controllo di mezzi di trasporto quali overboard e sagway.
Da un punto di vista teorico esso rappresenta un perfetto esempio di sistema instabile, sottoattuato, a non minima rotazione di fase.

Nella sua forma più semplice un sistema a pendolo inverso è costituito da tre elementi: un'asta, o pendolo, connessa tramite una cerniera ad una base, a sua volta collegata ad un sistema di attuazione e trasmissione del moto. Le configurazioni più comuni sono due: base assimilabile ad un carrellino che si muove avanti e indietro lungo una guida (Figura 1.a), oppure base che ruota attorno ad un asse centrale (Figura 1.b).

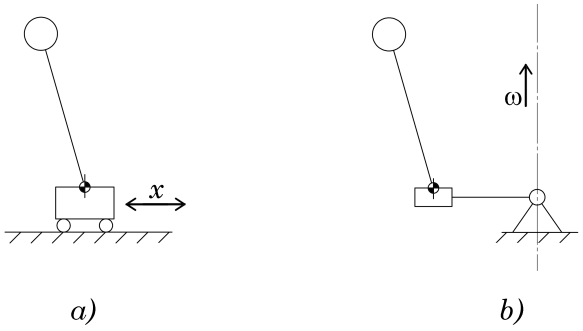


Figura 1: a) Pendolo inverso lineare. b) Pendolo inverso circolare

Configurazioni più complesse prevedono che il pendolo sia connesso alla base tramite una coppia sferica e possa quindi assumere qualunque orientamento nello spazio tridimensionale.

In tutti i casi lo scopo principale è sempre quello di mantenere il pendolo in verticale, in posizione di equilibrio instabile, con il baricentro al di sopra della cerniera, come mostrato nelle figure precedenti. Tale risultato è ottenuto rilevando la posizione angolare dell'asta

per mezzo di opportuni trasduttori, ed utilizzandola per generare, tramite un'apposita legge di controllo, il segnale di comando da inviare al sistema di attuazione. Un ulteriore obiettivo, strettamente collegato al precedente, è quello di garantire l'insensibilità ai disturbi esterni di varia natura, e nel complesso volti a perturbare la posizione di equilibrio di cui sopra.

Nel caso in esame, il meccanismo è schematizzabile come un cinematismo piano del tutto simile a quello illustrato in Figura 1.a). Il pendolo è composto da un'asta, di peso ed inerzia trascurabili, connessa da un lato ad una massa e dall'altro, tramite una cerniera, alla slitta di una guida lineare a ricircolo di sfere. Il sistema di attuazione è costituito da un cilindro pneumatico a doppio effetto comandato tramite quattro valvole proporzionali 2/2 relativamente economiche.

E' importante evidenziare i particolari che caratterizzano il caso di studio e ne aumentano la complessità rispetto al problema base discusso in precedenza. In primo luogo, la comprimibilità dell'aria comporta che il sistema di attuazione a disposizione abbia una banda passante molto ridotta, se confrontata con altre soluzioni più comuni, quali quella elettrica. Un secondo aspetto rilevante è legato al fatto che la corsa disponibile è limitata e pari a quella del cilindro pneumatico. Questo a sua volta si traduce nella necessità di un duplice controllo: si tratta infatti da un lato di stabilizzare il pendolo, dall'altro di riportare sempre il pistone a metà corsa, così da garantire in ogni momento condizioni di funzionamento ottimali.

L'elaborato è suddiviso nel seguente modo: nel primo capitolo si presenta una breve rassegna di fonti letterarie utilizzate nella fase di studio preliminare, nel secondo si ripercorrono la progettazione e la realizzazione del banco di prova, il terzo è dedicato alla modellazione ed allo studio analitico del problema, nel quarto si analizza la programmazione del PLC impiegato, nel quinto si studiano i risultati sperimentali e se ne esegue il confronto con quelli simulati, nel sesto infine si propongono alcuni spunti per futuri sviluppi relativi alla trattazione analitica, nonché all'implementazione pratica.

Capitolo 1

Rassegna della letteratura scientifica

Il problema del controllo dei sistemi a pendolo inverso è, come accennato, molto studiato in letteratura. Il sistema in esame presenta la peculiarità di utilizzare aria, un fluido ad elevata comprimibilità, nel sistema di attuazione.
Prima di iniziare l'analisi del problema, si è fatto riferimento alla letteratura scientifica disponibile sull'argomento al fine di trarre spunti e documentarsi sullo stato dell'arte e sugli accorgimenti e le scelte fatte in fase di modellazione e realizzazione.
In Zilc et al. [1] il sistema di attuazione è costituito da una valvola proporzionale 3/2 a centri chiusi con una banda passante di 100 Hz e un cilindro pneumatico senza stelo di corsa pari a 0.5 m e 15 mm di alesaggio. Il trasduttore angolare è di tipo potenziometrico rotativo, mentre quello lineare è potenziometrico. Il controllo del sistema è ottenuto da prima con un controllore lineare del tipo *state feedback*, al quale si aggiunge poi un controllore non lineare per compensare gli effetti dell'attrito. In un secondo momento si adottano soluzioni di controllo più complesse basate su procedure di ottimizzazione LQ e LQG.

In [2] si analizza il controllo di un sistema a pendolo inverso ad azionamento pneumatico da un punto di vista teorico. La modellazione avviene supponendo di utilizzare un cilindro senza stelo e una valvola proporzionale 3/2 a centri chiusi. L'architettura di controllo prevede l'impiego di un anello di controllo interno della forza applicata dall'attuatore, nel quale viene sfruttato un compensatore di tipo PI, e di un anello esterno per la stabilizzazione della posizione del carrello e del pendolo, nel quale viene implementato un controllore di tipo *full-state feedback*. A questa si aggiunge uno stimatore dell'attrito per compensare gli effetti variabili e non lineari dello stesso.

In Petric et al. [3] infine si considera un'apparecchiatura sperimentale che consiste di un cilindro privo di stelo, una valvola proporzionale 3/2 ed un pendolo di lunghezza pari a 400 mm. La pressione di alimentazione impiegata è di 6 bar, la massa della slitta alla quale è vincolato il pendolo è pari a 1.5 kg, mentre quest'ultimo ha una massa di 0.06 kg. Il controllo avviene in questo caso utilizzando il metodo LQR.

In tutti e tre i casi si notano delle differenze rispetto al sistema oggetto di studio. Come dettagliato nel seguito, il cilindro utilizzato presenta uno stelo, con conseguente differenza delle superficie di influenza del pistone. Anche la strategia di controllo risulta più semplice. Si è infatti pensato di sfruttare due anelli di controllo, uno esterno (per il controllo della posizione del carrello) ed uno interno (per il controllo dell'inclinazione del pendolo), ciascuno dei quali impiega un compensatore di tipo PID. La struttura PID presenta infatti due importanti vantaggi: è semplice da implementare in un PLC e viene trattata durante i corsi nei quali si pensa di utilizzare il banco di prova a fini didattici.

Capitolo 2

Il banco di prova

La progettazione e la costruzione del banco sono state realizzate in collaborazione con lo studente Marino Alessandro.

In fase di progetto ci si è occupati di definire le caratteristiche del banco nel complesso e dei vari componenti, cercando di privilegiare aspetti quali la semplicità di montaggio e manutenzione, la logica della disposizione dei componenti e la possibilità di intervenire su tutti i parametri di funzionamento, per valutarne gli effetti. Gli ultimi due in particolare risultano importanti nel caso di un'apparecchiatura didattica com'è quella in questione.

Gli elementi essenziali costituenti il banco possono essere suddivisi in base alla tipologia in tre diverse categorie: pneumatici, elettrici e meccanici. Nella prima si trovano l'attuatore pneumatico, le valvole di controllo, i tubi di connessione e la raccorderia. Della seconda fanno invece parte il trasduttore angolare, il trasduttore di posizione, gli alimentatori ed infine il PLC che svolge il compito di controllo del sistema secondo i criteri riportati nell'Introduzione. Il terzo ed ultimo gruppo raccoglie invece la struttura portante, la guida lineare a ricircolo di sfere ed il gruppo carrello/pendolo ad essa vincolato.

In questa sezione vengono brevemente presentate le caratteristiche dei componenti progettati dal candidato, nello specifico il gruppo del pendolo e del carrello (per gli altri si rimanda invece all'elaborato dello studente Marino Alessandro), e quelle dei componenti impiegati. Attenzione particolare viene rivolta all'analisi dello schema del banco e della fase di realizzazione, per concludere con una descrizione delle procedure da seguire durante l'utilizzo.

2.1 Progettazione dei componenti

2.1.1 Progettazione del pendolo

La progettazione del pendolo, mostrato in Figura 2.1, è stata sviluppata secondo alcuni criteri guida quali la necessità di variare la lunghezza dell'asta e il valore della massa concentrata, nonché la possibilità di separare le due dal resto del banco. Il primo requisito è stato rispettato realizzando un'asta telescopica, composta dagli elementi "02" e "05". La lunghezza dell'asta può essere variata, mediante i bulloni "04", da un minimo di 400 mm ad un massimo di 700 mm, in incrementi di 20 mm. Il secondo e il terzo sono soddisfatti mediante le estremità filettate dell'asta interna "05" e del perno "03", a sua volta connesso all'elemento "02" tramite una spina. La figura sottostante mostra infatti come al capo superiore possano essere inseriti e bloccati dischi in acciaio di varia dimensione, mentre dall'altro lato si ha l'accoppiamento con il componente "01", il quale a sua volta viene

serrato all'albero della cerniera solidale al carrello. Tutti i componenti, tranne i dischi, sono stati realizzati in alluminio, per consentire masse ridotte (l'intero gruppo non raggiunge i 200 g), così da garantire l'ipotesi di massa concentrata utilizzata in fase di modellazione del problema.

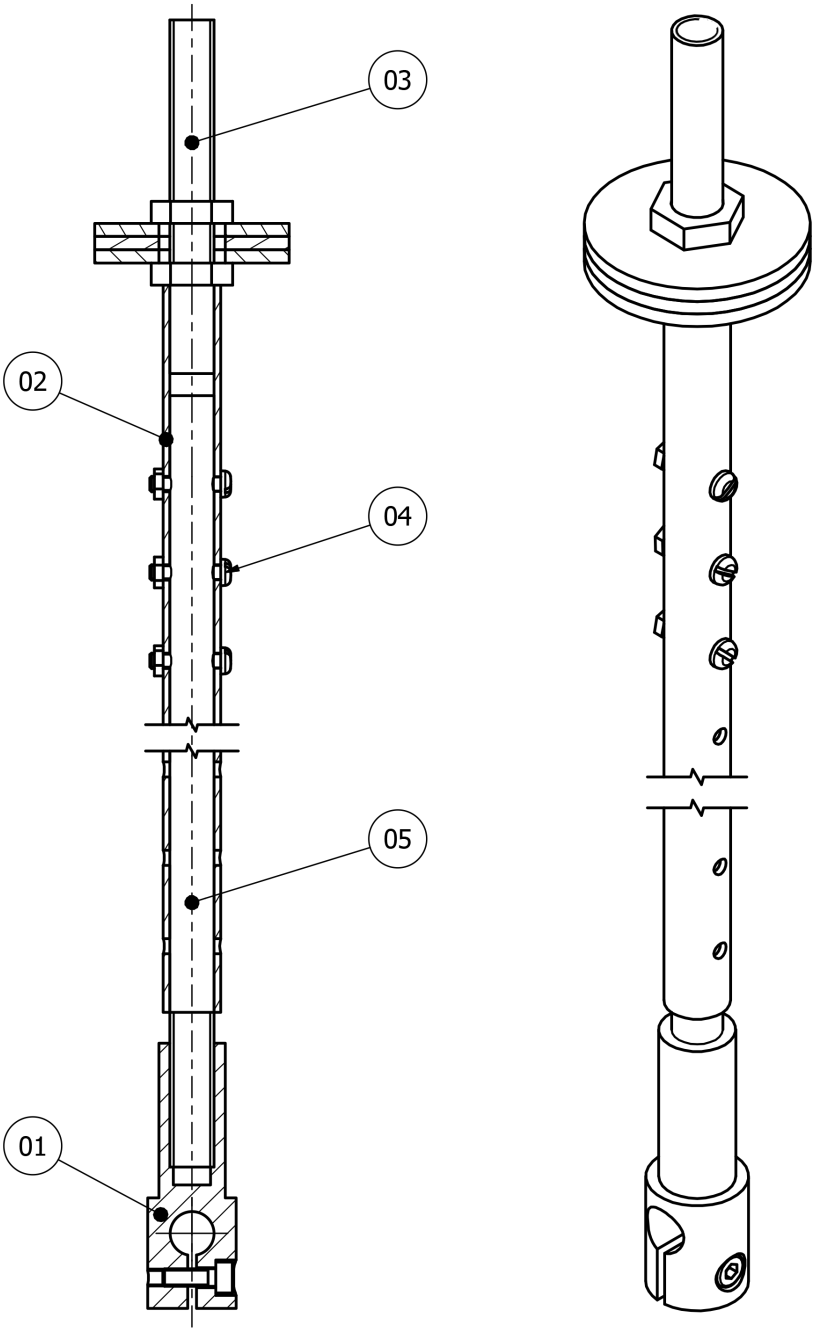


Figura 2.1: Assieme del pendolo

2.1.2 Progettazione del gruppo del carrello

Il gruppo carrello, rappresentato in Figura 2.2, ha lo scopo di collegare il pendolo al resto dei componenti del banco.

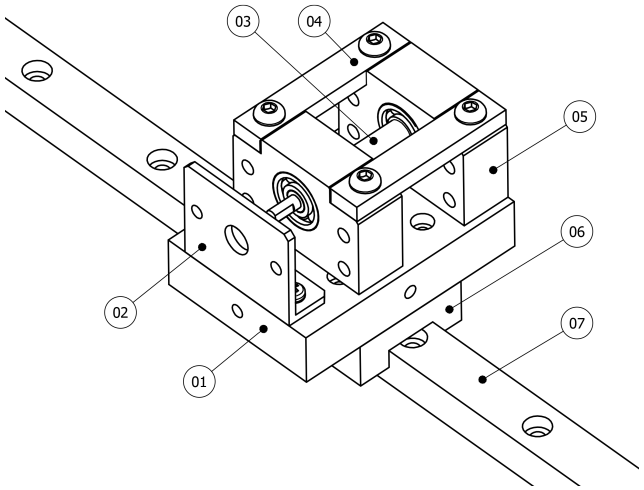


Figura 2.2: Componenti del gruppo carrello

La piastra "01" si accoppia da un lato con la slitta "06" della guida lineare a ricircolo di sfere "07", dall'altro con i sopporti "05" per i cuscinetti e la staffa "02". I fori filettati sulle facce laterali della piastra ne permettono l'accoppiamento con l'attuatore pneumatico, tramite un giunto sferico, e con il nucleo di un trasduttore di posizione del tipo LVDT. I sopporti per cuscinetti, con l'albero "04", costituiscono la cerniera cui si connette il pendolo, come descritto nella sezione precedente. Alla staffa a L si connette invece un trasduttore angolare, a sua volta accoppiato all'albero mediante un giunto elastico in grado di compensare lievi disallineamenti tra i due. A completare il gruppo si trovano i componenti indicati con "03", il cui scopo è quello di limitare la corsa del pendolo ed evitarne la caduta sul banco. Onde evitare urti diretti, si è deciso di aggiungere un collarino in gomma alla base dell'asta come mostrato nella figura seguente.

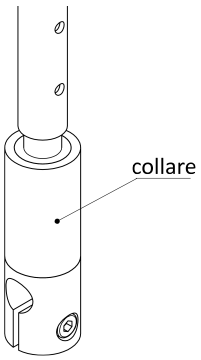


Figura 2.3: Collare di ammortizzo in gomma

2.2 Caratteristiche dei componenti

I componenti impiegati sono di seguito riassunti: cilindro pneumatico e relative valvole di controllo, trasduttore angolare, trasduttore di posizione, guida lineare a ricircolo di sfere, profilati in alluminio, PLC S7-1200, ed infine cuscinetti a sfere con relativi sopporti. Di questi, le valvole, il cilindro ed il controllore non sono stati acquistati per l'applicazione in esame, perché già disponibili in laboratorio.

2.2.1 Cilindro pneumatico

L'attuatore utilizzato è prodotto e distribuito da Camozzi con il codice "24N2A16A500". Si tratta di un cilindro a doppio effetto privo di ammortizzi con una corsa di 500 mm e un alesaggio di 16 mm, mentre lo stelo ha un diametro di 6 mm. Il cilindro è connesso al banco tramite una cerniera, e al carrello mediante un giunto sferico: lo scopo è quello di far lavorare il cilindro come un'asta così da garantire che la trasmissione delle forze avvenga lungo l'asse dello stesso. La tabella seguente riassume le caratteristiche esposte.

Dati Cilindro	
Alesaggio	16 mm
Corsa	500 mm
$\oslash$ Stelo	6 mm
T di esercizio	$20 \div 80\ °C$

Tabella 2.1: Caratteristiche del cilindro pneumatico

2.2.2 Valvole

Le valvole di controllo del cilindro sono anch'esse prodotte da Camozzi e commercializzate con il codice "AP-7211-LR2-U7". Si tratta di elettrovalvole $2/2$ normalmente chiuse, taglia 22 mm, controllabili mediante apposito driver in grado di garantire un comportamento proporzionale. La pressione massima di alimentazione è pari a 6 bar, il diametro nominale di passaggio è di 1.6 mm ed infine il coefficiente di portata idraulico k_v dichiarato è $1.0\ \frac{dm^3}{min}\left(\frac{kg}{dm^3 bar}\right)^{\frac{1}{2}}$.
Le valvole sono vendute con gli appositi driver controllabili sia in tensione, tramite il segnale standard $0 \div 10\ Vcc$, sia in corrente, $0 \div 20\ mA$, mentre la tensione di alimentazione è di 24 Vcc. Il particolare driver utilizzato ha codice "130-222", lavora ad una frequenza di 500 Hz, dato confermato anche mediante oscilloscopio, e ha un'uscita massima pari a 24 Vcc, compatibile con l'ingresso delle valvole utilizzate.

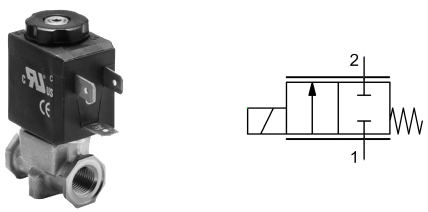


Figura 2.4: Valvola "AP-7211-LR2-U7" e relativo simbolo ISO

Dati Valvole	
Taglia	22 mm
d_n	1.6 mm
p_{max}	6 bar
k_v	1.0 $\frac{dm^3}{min}\left(\frac{kg}{dm^3 bar}\right)^{\frac{1}{2}}$
Connessioni	$G1/8$
Alimentazione	24 Vcc

Tabella 2.2: Caratteristiche delle valvole

2.2.3 Trasduttore angolare

Il trasduttore assolve il compito di rilevare la posizione angolare dell'asta del pendolo e riportarla al controllore. Il modello in questione è distribuito da Penny Giles con il codice "SRH280-DP/090/180/A1/3/D/68/P5". Si tratta di un sensore ad effetto Hall con le seguenti caratteristiche: tensione di alimentazione pari a 5 Vcc regolati, risoluzione e non linearità rispettivamente pari a 0.025% FS (12bit) e $\pm$0.4% FS, uscita in tensione $0.5 \div 4.5$ Vcc e campo di misurazione selezionabile tra $0° \div 90°$ (primo canale "CH1") e $0° \div 180°$ (secondo canale "CH2").

Dati Sensore Angolare	
Alimentazione regolata	5 Vcc
Uscita	$0.5 \div 4.5$ Vcc
Risoluzione	0.025% FS (12bit)
Non linearità	$< 0.4\%$ FS
Campo di misura CH1	$0° \div 90°$
Campo di misura CH2	$0° \div 180°$

Tabella 2.3: Caratteristiche del sensore angolare

2.2.4 Trasduttore di posizione LVDT

Il trasduttore utilizzato per rilevare la posizione del carrello, e quindi dello stantuffo all'interno del cilindro, è del tipo LVDT. Il sensore è collegato al banco tramite una cerniera e un giunto sferico, e al carrello tramite un giunto dello stesso tipo.
La corsa è di 500 mm, pari a quella dell'attuatore. L'alimentazione richiesta è 24 Vcc e l'uscita in tensione varia nel campo $0 \div 10$ Vcc. La non linearità del sensore è minore di 0.5% FS e ha una banda passante di 200 Hz.

Dati Sensore LVDT	
Alimentazione	$24\ Vcc$
Uscita	$0 \div 10\ Vcc$
Non linearità	$< 0.5\%\ FS$
Campo di misura	$0 \div 500\ mm$
T di funzionamento	$0 \div 70\ °C$
Banda passante	$200\ Hz$

Tabella 2.4: Caratteristiche del sensore angolare

2.2.5 Guida lineare

Si tratta di una guida lineare a ricircolo di sfere, con relativa slitta, prodotta dalla casa Bosch-Rexroth AG. I codici dei componenti selezionati sono rispettivamente "R044500431.620" e "R044209401" della famiglia delle "Miniguide a sfere". I fori lamati sulla rotaia permettono il fissarla al banco mediante collegamento bullonato o a vite mordente, mentre il resto del gruppo carrello si collega alla slitta tramite quattro fori filettati presenti sulla stessa.

2.2.6 PLC Siemens S7-1200

Il PLC a disposizione del candidato, prodotto e venduto dalla Siemens AG, fa parte della famiglia "S7-1200" e monta la CPU "$CPU1214CDC/DC/DC$".
Le caratteristiche principali del controllore sono riportate nella tabella seguente.

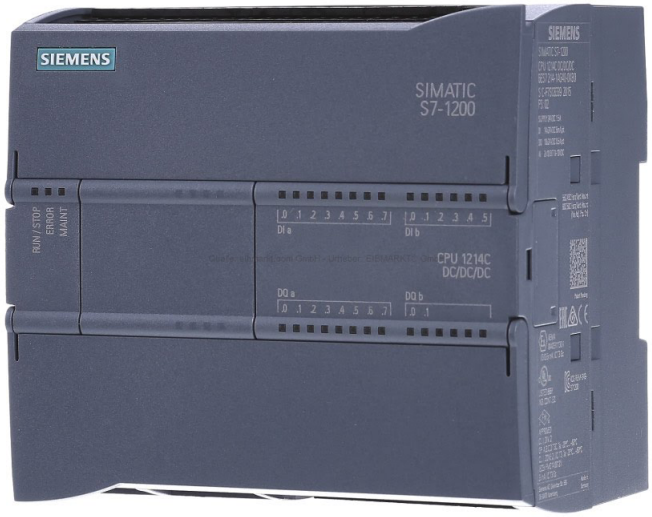


Figura 2.5: PLC Siemens S7-1200

Dati PLC S7-1200	
Codice CPU	CPU 1214C DC/DC/DC
Ingressi digitali	14
Ingressi digitali veloci	6 (dei 14 ingressi digitali)
Uscite digitali	10
Uscite PWM	4 (delle 10 uscite digitali)
Ingressi analogici	2 $(0 \div 10\,Vcc)$
Alimentazione	24 Vcc

Tabella 2.5: Caratteristiche del PLC Siemens S7-1200

Oltre alla CPU descritta, con i suoi input e output, è stato aggiunto un modulo "Analog Output", per ottenere le uscite analogiche, altrimenti assenti, necessarie al controllo dei driver PWM.

Figura 2.6: Modulo "Analog Output" per S7-1200

Il modulo in questione, visibile in Figura 2.6, ha il codice "$6ES7232-4HB32-0XB0$" e le caratteristiche riportate di seguito.

Dati Modulo		
Codice	6ES7232-4HB32-0XB0	
Uscite Analogiche	2	
Tipo di uscita selezionabile	Tensione:	$0 \div 10\,Vcc$, $\pm 10\,Vcc$
	Corrente:	$0 \div 20\,mA$, $4 \div 20\,mA$

Tabella 2.6: Caratteristiche del Modulo "Analog Output"

2.3 La struttura del banco di prova

Lo schema sinottico del banco di prova, utilizzato come guida durante la realizzazione, è riportato nella seguente figura.

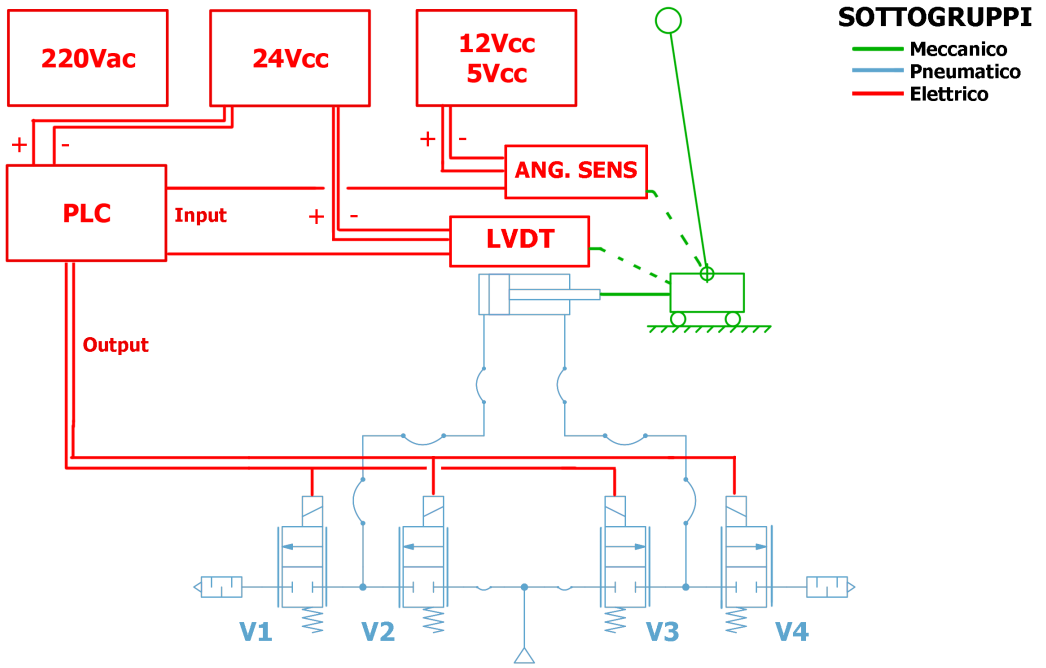


Figura 2.7: Schema sinottico del banco di prova

In esso è possibile ritrovare tutti i componenti già presentati, più alcuni altri quali l'alimentazione elettrica su cui non ci si è ancora soffermati. Come evidenziato dai diversi colori utilizzati in figura, e come già accennato, lo schema può essere suddiviso in gruppi di componenti in base alla funzione svolta dagli stessi. In questo senso si possono distinguere gli elementi che definiscono il circuito pneumatico, quelli del circuito elettrico ed infine tutti i componenti meccanici che permettono di definire il cinematismo del pendolo inverso.
Ciascuno di questi tre gruppi è di seguito analizzato il dettaglio.

2.3.1 Circuito pneumatico

Il circuito pneumatico principale è costituito dalle quattro valvole 2/2 NC e dal cilindro pneumatico.
Per far fuoriuscire il cilindro è necessario inviare un comando alle valvole $V2$ e $V4$, in modo da collegare la camera posteriore con l'alimentazione e la camera anteriore con lo scarico. Il processo si può invertire azionando $V1$ e $V3$.
Come spiegato, il driver associato alle valvole ha lo scopo di far lavorare le stesse come dispositivi proporzionali in flusso. Il segnale di comando proveniente dal PLC viene utilizzato per calcolare il valore di riferimento della corrente da inviare all'elettrovalvola, all'interno della quale è presente un semplice attuatore lineare che muove un otturatore. Siccome la forza di trazione esercitata è proporzionale alla corrente che attraversa le spire del solenoide dell'attuatore, anche lo spostamento dell'otturatore, e in definitiva l'area di passaggio interna alla valvola, lo saranno. Analizzando la situazione in modo più approfon-

dito, il driver lavora in realtà mediante la tecnica PWM e, a fronte del segnale di comando e del feedback dalla valvola, impone il duty-cycle sui morsetti d'uscita. Una spiegazione completa sul funzionamento del sistema è fornita nell'Appendice A.

Il cilindro pneumatico è un attuatore lineare in grado di convertire la differenza di pressione nelle proprie camere in forza netta applicata al carrello e rappresenta quindi l'elemento di congiunzione tra la pneumatica e il sistema meccanico.

2.3.2 Sistema meccanico: carrello e pendolo

Il sistema meccanico è costituito da tutti i componenti necessari a realizzare il pendolo inverso e il carrello cui esso è connesso. Quest'ultimo è in realtà costituito da una guida a ricircolo di sfere con relativa slitta, che insieme realizzano un accoppiamento prismatico, e da una cerniera, alla quale si connette la base del pendolo. Il meccanismo, come già evidenziato, è nel complesso piano. La guida permette la traslazione lungo un asse coincidente con quello dell'attuatore pneumatico, mentre la rotazione, garantita dalla cerniera, avviene nel piano descritto dal suddetto asse e da quello del pendolo.

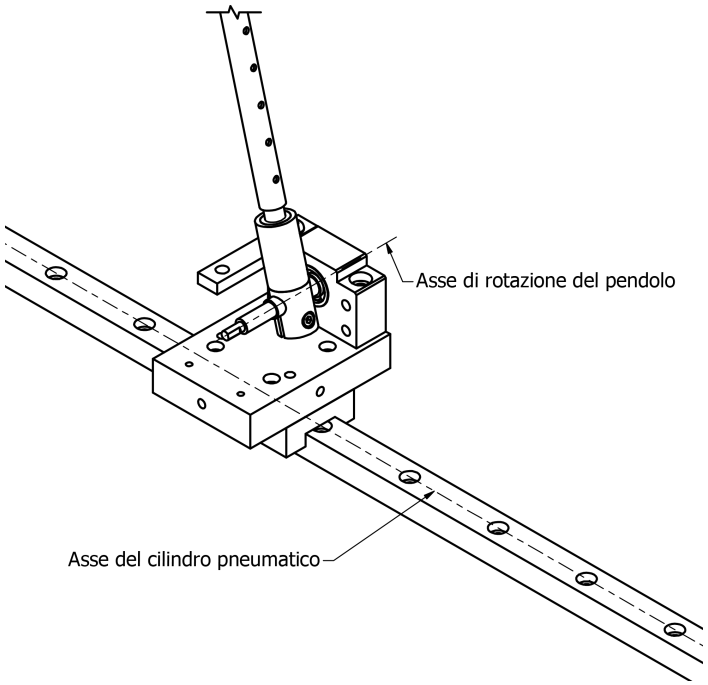


Figura 2.8: Schema del cinematismo "carrello e cerniera"

In totale il sistema presenta quindi due gradi di libertà, come confermato da un'analisi più rigorosa, effettuata mediante la formula di Grubler:

$$dof = 3\,(m-1) - \sum_{i=1}^{m} l_i = 6 - 2 - 2 = 2$$

Dove: m rappresenta il numero di corpi che compongono il cinematismo, compreso il telaio, e l_i il numero di gradi di libertà sottratti dalla $i-esima$ coppia cinematica.
Come dettagliato nel seguito la forza applicata dallo stelo del cilindro sul carrello comporta la nascita di un sistema di reazioni di inerzia che la collega alla dinamica di movimento del

pendolo. Proprio sfruttando il legame appena descritto è possibile garantire la permanenza del pendolo in posizione verticale.

2.3.3 Circuito elettrico

Nel circuito elettrico rientrano diversi componenti: gli alimentatori, il sensore angolare e quello di posizione, i driver delle valvole ed infine il controllore programmabile. A complicare lo schema subentra il requisito di poter controllare il banco con due PLC diversi, e quindi la necessità di reindirizzare input e output, senza bisogno di intervenire ogni volta sulle connessioni. La soluzione adottata per risolvere tale problema sfrutta dei relè multicontatto e viene dettagliata nella Sezione 2.4.4.
Gli alimentatori, due in totale, forniscono i 24 Vcc necessari ad alimentare il PLC Siemens, i driver delle valvole e il trasduttore LVDT, i 5 Vcc richiesti dal trasduttore angolare ed infine i 220 Vac per l'alimentazione del secondo PLC. I collegamenti con i controllori sono piuttosto semplici: i due trasduttori e i driver delle valvole utilizzano infatti una connessione a tre fili, due per l'alimentazione e uno per il segnale.

2.4 Costruzione del banco di prova

In questa sezione si analizzano le fasi che hanno portato alla realizzazione del banco di prova visibile nella figura sottostante.

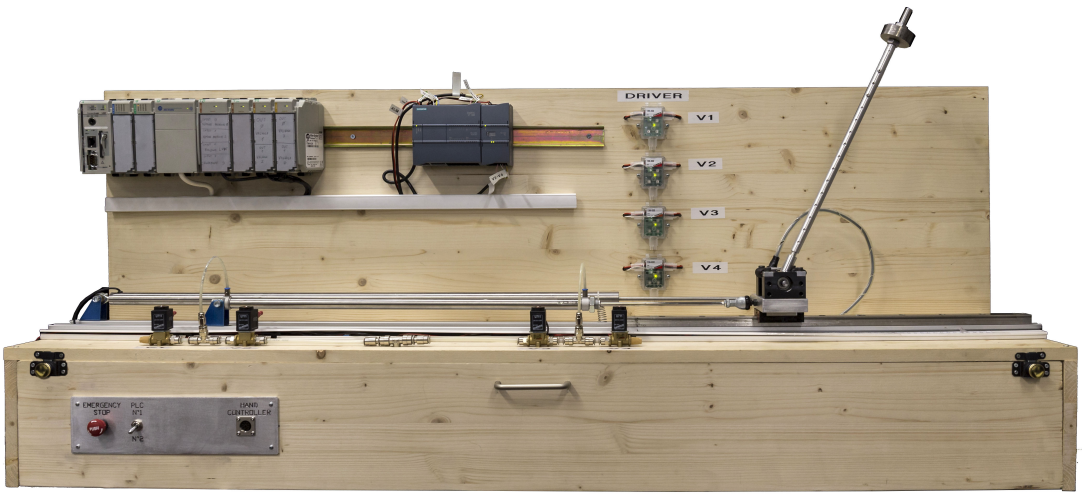


Figura 2.9: Il banco di prova completo

2.4.1 Montaggio della struttura ed operazioni preliminari

La costruzione è cominciata con l'assemblaggio della struttura di supporto del banco. Tale struttura, rappresentata in Figura 2.10, è realizzata in legno d'abete ed è costituita da quattro tavole dello spessore di 20 mm connesse mediante viti mordenti.

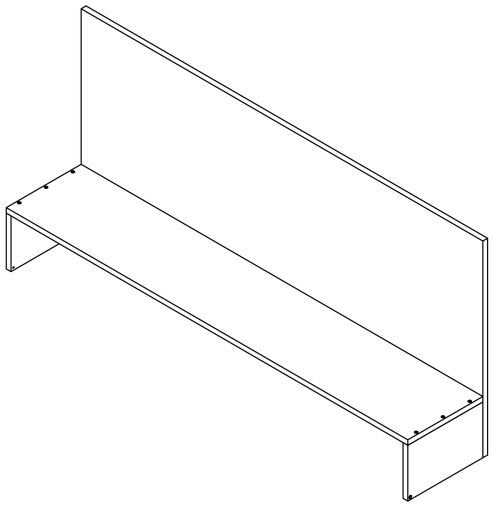


Figura 2.10: Struttura del banco di prova

La chiusura frontale, assente per permettere un accesso più comodo ai componenti posti sotto il banco, verrà aggiunta, con il pannello di controllo, solo alla fine.
Il passo successivo è stato realizzare i fori per il fissaggio dei componenti. A tal proposito, si è deciso di non collegare direttamente al banco il cilindro pneumatico, il trasduttore LVDT e la guida lineare, bensì di utilizzare come interfaccia due profilati in allumino, in modo da garantire il massimo della flessibilità nel posizionamento di tali componenti. Non solo, non collegando direttamente gli elementi al banco è possibile, se necessario, sostituirli senza operare ulteriori modifiche alla struttura. Si sono poi fissate le canaline ed eseguiti i fori per il passaggio dei cavi di alimentazione e di trasmissione dei segnali.

2.4.2 Assemblaggio del gruppo carrello e pendolo

L'assemblaggio del gruppo carrello e pendolo è cominciato da quest'ultimo. Il perno filettato è stato collegato, mediante una spina, all'asta esterna del pendolo. Nella seconda è poi stata inserita l'asta interna e le si è vincolate mediante tre viti $M3$ con rispettivi dadi.
Il carrello è composto dalla base e dalla cerniera. L'assemblaggio è iniziato con l'accoppiamento dell'albero ai sopporti per cuscinetti, previa inserzione dello stesso nel montante, il quale è stato bloccato in posizione tramite l'apposita vite di serraggio. La piastra che funge da base è stata vincolata alla slitta della guida lineare mediante quattro viti $M4$ $ISO4762$. Sono poi stati fissati la staffa ad L e la cerniera montata in precedenza, con l'aggiunta dei due componenti volti a limitare la corsa angolare del pendolo il cui corpo è stato connesso al montante mediante l'estremità filettata inferiore.
Il trasduttore angolare, dopo essere stato fissato alla staffa, è stato collegato all'albero mediante un giunto elastico in grado di compensare leggeri disallineamenti eventualmente presenti.
L'intero gruppo così costituito è stato poi accoppiato alla guida lineare, a sua volta vincolata al banco come descritto in precedenza.

2.4.3 Montaggio del cilindro, del sensore LVDT e dei PLC

Il montaggio è proseguito con il posizionamento del cilindro pneumatico e del trasduttore LVDT, collegati ai profilati mediante cerniere e al carrello tramite giunti sferici. Come visibile in Figura 2.11, l'attuatore pneumatico e la guida lineare risultano allineati sullo stesso profilato, mentre il trasduttore di posizione si trova da solo sull'altro. I due controllori programmabili sono stati montati su un'apposita guida DIN, a sua volta fissata alla parete posteriore del banco. La posizione scelta consente un facile accesso ai PLC durante la realizzazione delle connessioni o in caso di manutenzione, e permette di visualizzare facilmente gli ingressi e le uscite attivi durante il funzionamento.

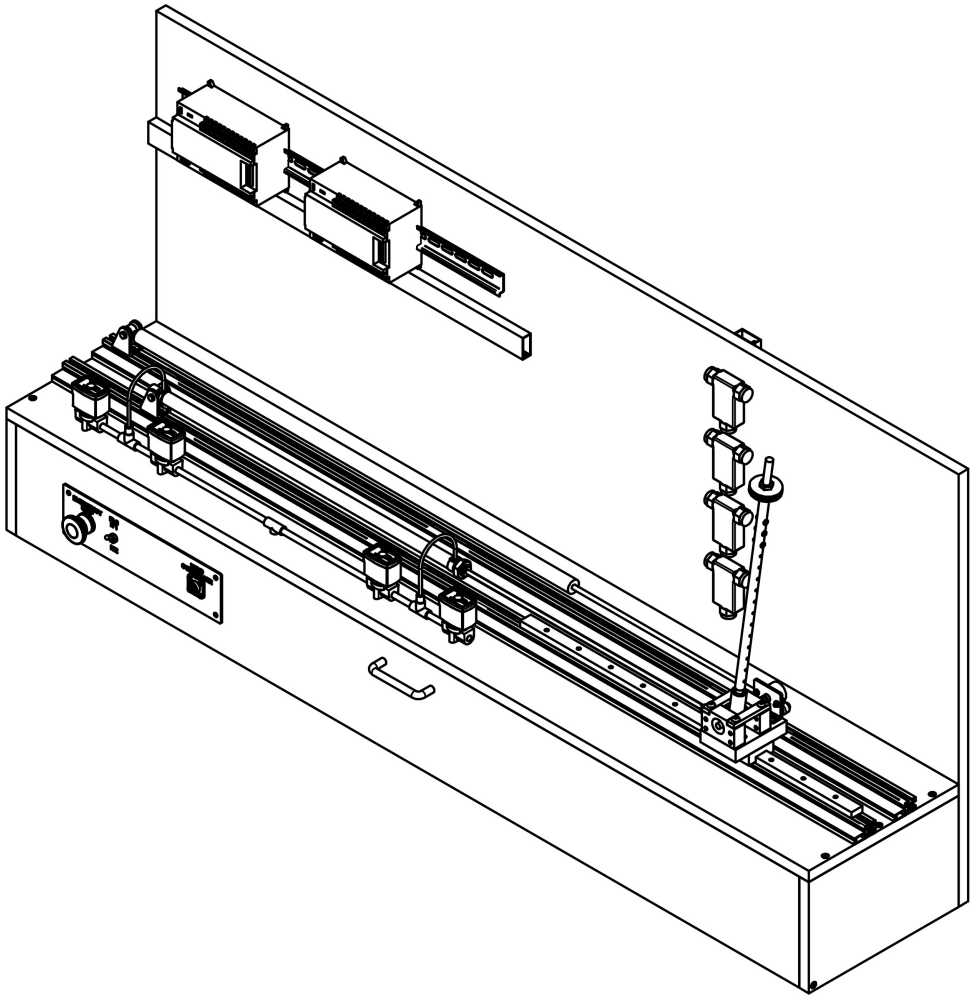


Figura 2.11: Vista del banco di prova e della disposizione dei componenti

2.4.4 Realizzazione dell'impianto elettrico

La fase finale ha previsto la realizzazione dell'impianto elettrico, accomodato per la maggior parte all'interno della struttura del banco. Come visibile in Figura 2.12, a sinistra, sorretti da staffe a "L", si trovano i due alimentatori che forniscono, in ordine, 12 Vcc/5 Vcc e 24 Vcc. I 220 Vac necessari per il funzionamento degli alimentatori sono ricavati da un connettore posto sul retro del banco. A destra degli alimentatori è posizionata una scatola

di derivazione contenente il sistema di scambio dei contatti tra i due PLC. Sul pannello frontale del contenitore si è realizzata una fessura attraverso la quale passano sia i cavi provenienti dai sensori, sia quelli in arrivo da e verso i controllori. All'interno quattro relè multi-contatto consentono di deviare, quando alimentati, tutti i segnali in modo opportuno: i trasduttori vengono collegati con gli ingressi del PLC selezionato, mentre le uscite di quest'ultimo vengono connesse ai driver di comando delle valvole.

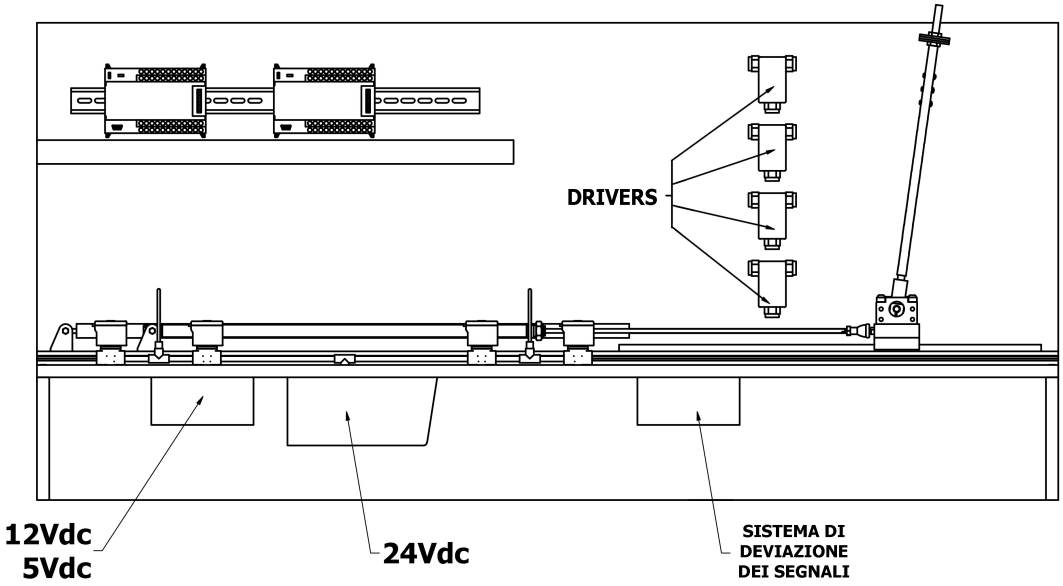


Figura 2.12: Vista frontale dell'interno del banco di prova

La scelta del PLC da utilizzare avviene agendo su di un deviatore a due posizioni posto sul pannello di controllo del banco: se il contatto interno al deviatore viene chiuso, i relè vengono alimentati e i contatti vengono di conseguenza deviati da un controllore all'altro. Di seguito si riportano due tabelle con il codice colori utilizzato per gli input e gli output di entrambi i PLC.

Cavo Segnali Input	
Giallo	Sensore Angolare
Verde	Sensore LVDT
Grigio	Sensore di pressione $N°1$
Marrone	Sensore di pressione $N°2$
Rosa	Comune

Cavo Segnali Output	
Giallo	Comando valvola $N°1$
Verde	Comando valvola $N°2$
Grigio	Comando valvola $N°3$
Marrone	Comando valvola $N°4$
Rosa	Comune

Tabella 2.7: Codice colori dei cavi dei segnali di input/output del PLC

Come è possibile osservare è già stato predisposto il cablaggio per il possibile inserimento di trasduttori di pressione sulle bocche del cilindro pneumatico.
Guardando il retro del banco, visibile in Figura 2.13, nella canalina di destra passano i

cavi di alimentazione dei controllori, mentre le altre due contengono quelli dei segnali da e verso quest'ultimi e verso i driver delle valvole.

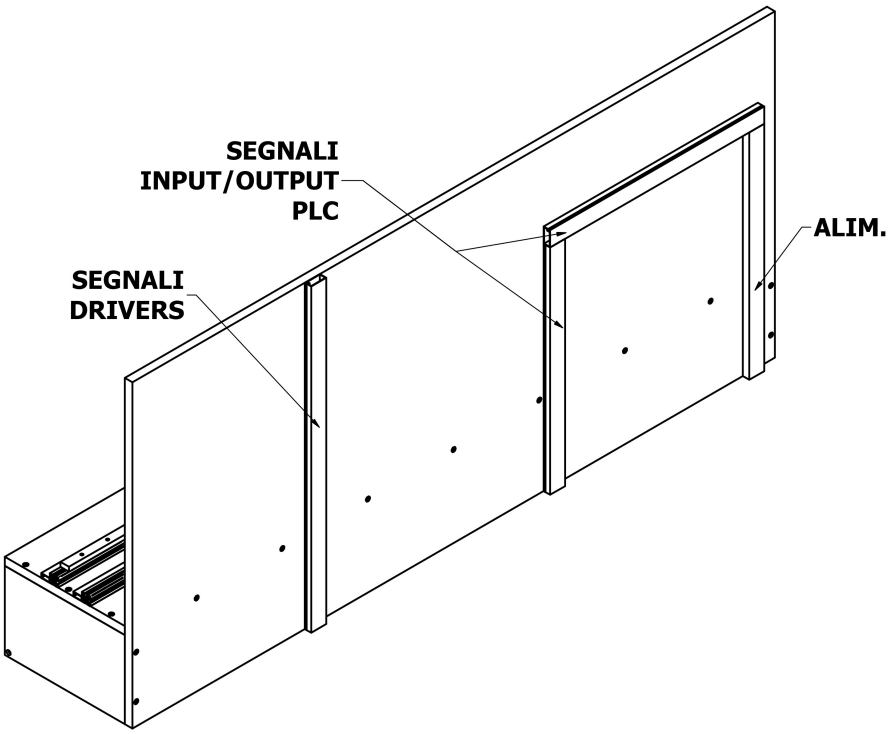


Figura 2.13: Vista del retro del banco di prova

Il montaggio si è concluso con il posizionamento del pannello frontale, apribile verso il basso agendo sugli appositi chiavistelli, visibili in Figura 2.9, sul quale è stato fissato un piccolo quadro di comando in allumino, Figura 2.14, recante il selettore bistabile per la scelta del PLC, un pulsante per il blocco di emergenza ed un connettore per l'utilizzo di un dispositivo di controllo realizzato dal candidato e presentato in dettaglio nella Sezione 2.5.

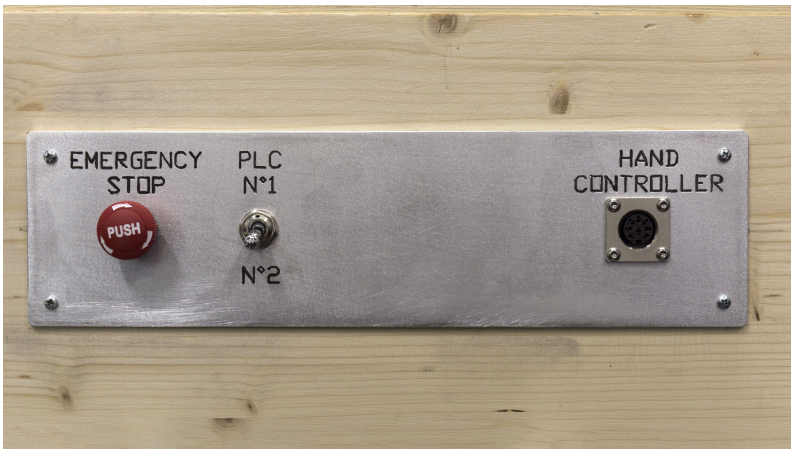


Figura 2.14: Pannello di controllo

2.5 Utilizzo del Banco di prova

La presente sezione dell'elaborato è dedicata alla descrizione delle procedure da seguire durante l'utilizzo del banco di prova. Prima dell'utilizzo e affinché esso avvenga in condizioni di sicurezza è necessario verificare che il banco sia connesso ad una fonte di alimentazione 220 Vac 50 Hz, che la pressione di alimentazione delle valvole non superi i 6.5 bar e che tutte le connessioni pneumatiche siano saldamente in posizione.
Una volta connesse l'alimentazione pneumatica e quella elettrica, i PLC si attivano posizionandosi nello stato *RUN*. E' quindi possibile scegliere quale dei due utilizzare mediante il selettore posto sul pannello frontale del banco di prova. Nel seguito si fa riferimento al funzionamento nel caso in cui venga scelto il PLC Siemens, quello programmato dal candidato. Le modalità di funzionamento sono in questo caso due: la prima e più semplice consente l'avvio del banco e alcune semplici operazioni mediante un apposito dispositivo di comando sviluppato dal candidato, la seconda permette invece il controllo di tutte le funzionalità del banco ad avviene mediante PC.

2.5.1 Funzionamento di base

Il dispositivo in Figura 2.15 può essere connesso al PLC Siemens mediante l'apposito connettore posto sul pannello di controllo frontale del banco.

Figura 2.15: Dispositivo di controllo manuale del banco

La leva centrale consente l'avvio dell'algoritmo di controllo interno al PLC, altrimenti escluso.
Il controllo è attivo con la leva verso l'alto, configurazione alla quale corrisponde l'accensione del led posto sopra la stessa. Si verifichi che il pendolo sia in posizione verticale, o opportunamente inclinato con la slitta a fine corsa prima di procedere con l'attivazione.
I pulsanti laterali permettono di cambiare la posizione di riferimento del carrello: ad ogni secondo di pressione corrisponde un incremento/decremento del set di 20 mm.
Tutte le funzionalità sono invece escluse nel caso in cui ci si connetta mediante PC.

2.5.2 Funzionamento avanzato

Per poter controllare tutte le funzionalità del banco di prova è necessario connettersi al PLC con un PC, mediante cavo ethernet non incrociato. Si può quindi accedere ai parametri del controllore Siemens mediante software TIA Portal fornito dalla casa produttrice, o attraverso P.I.P. Control (*Pneumatic Inverted Pendulum Control*), l'apposita applicazione Windows Form sviluppata dal candidato in linguaggio Visual Basic.
Nel primo caso si ha la possibilità di accedere al programma del controllore ed eseguirne la riprogrammazione, cambiare i parametri di funzionamento, nonché eseguire la raccolta di dati sperimentali mediante il salvataggio in memoria ed il successivo download dei valori degli ingressi e delle uscite.
Il software sviluppato dal candidato garantisce un'interfaccia più snella, l'accesso alle sole variabili di rilievo, limitando così la possibilità di modifiche indesiderate e, soprattutto, la possibilità di controllare il banco mediante PC privi di TIA Portal perché non installato, o perché privi dei requisiti hardware necessari. Bisogna notare infine che l'utilizzo di un software non esclude quello dell'altro. Essendo la comunicazione basata su protocollo TCP/IP il PLC può essere controllato contemporaneamente dalla due applicazioni sfruttando le possibilità messe a disposizione da ciascuna. Questa tecnica è per esempio stata impiegata per la raccolta dei dati sperimentali presentati nel Capitolo 5.

Per la descrizione del funzionamento del TIA Portal si rimanda ai manuali ed alle guide apposite, nel seguito viene invece descritto in dettaglio il funzionamento dell'applicazione P.I.P. Control.

All'apertura del programma viene presentata la schermata di connessione al PLC (Figura 2.16 a). Per prima cosa si deve inserire l'indirizzo IP assegnato al controllore; quello di default è già visualizzato nell'apposito campo. Una volta premuto il pulsate "CONNETTI", diventano disponibili le altre funzionalità. Prima di procedere si consiglia di cliccare il bottone "REINIZIALIZZA", che porta il carrello a fine corsa ed attiva l'anello di controllo interno al PLC. Nella pagina "PID" (Figura 2.16 b) è possibile modificare i coefficienti dei due anelli di controllo, in modo da valutarne gli effetti, nonché ripristinare quelli iniziali premendo "RESET". Selezionando dal menu a tendina l'apposita voce, i parametri possono essere visualizzati nella forma standard, o nella forma a costanti di tempo di seguito riportate.

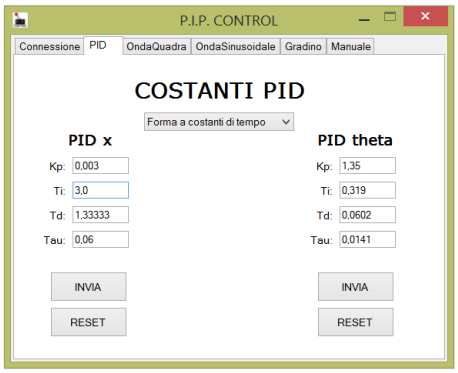
$$Forma\ standard: \ C(s) = k_p s + \frac{k_i}{s} + \frac{k_d s}{T_f s + 1}$$

$$Forma\ a\ costanti\ di\ tempo: \ C(s) = k_p \left(s + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{\tau T_d s + 1} \right)$$

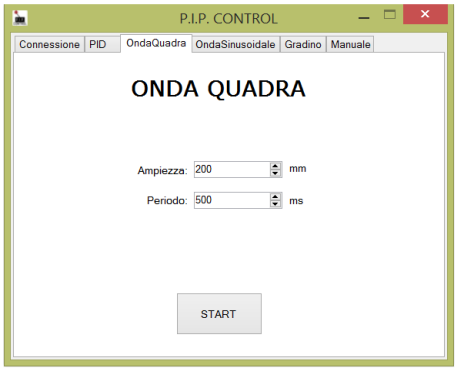
Le pagine successive "Onda Quadra" e "Onda Sinusoidale" (Figura 2.16 c e d) permettono, dopo aver selezionato ampiezza e periodo desiderati, di attivare appositi blocchi di programmazione interni al PLC dedicati alla generazione di un segnale di riferimento per la posizione del carrello rispettivamente ad onda quadra e ad onda sinusoidale. Queste pagine, connesse alla possibilità di raccolta dei dati sperimentali fornita dal TIA Portal, permette di valutare le prestazioni del sistema in termini di inseguimento del segnale di riferimento, e di effettuare il confronto tra il comportamento reale ed i risultati simulati. La pagina "Gradino" (Figura 2.16 e) consente di far variare il *set* di posizione della slitta in modo istantaneo. L'ultima pagina permette di controllare manualmente il sistema (Figura 2.16 f): l'anello di controllo viene escluso ed è possibile muovere il carrello avanti e indietro, nonché effettuare la taratura dello zero del trasduttore angolare. I due *slider* a destra e sinistra permettono di aumentare o diminuire la velocità di fuoriuscita e rientro

dello stelo, mentre, attivando la spunta accanto ad "Avvia PID allo STOP" , è possibile riattivare immediatamente l'anello di controllo una volta premuto nuovamente il pulsante "START, che reca ora la scritta "STOP".
Alla disconnessione il programma disattiva l'anello di controllo, i generatori di onde e ripristina i parametri dei compensatori PID ai valori di default.

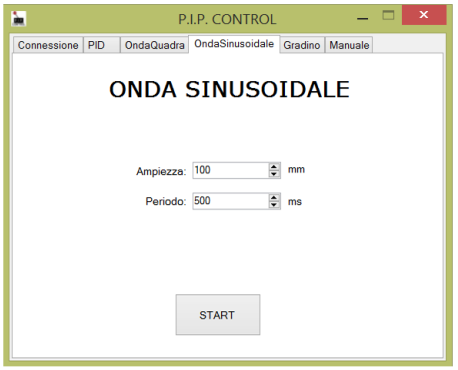
a) Pagina Connessione



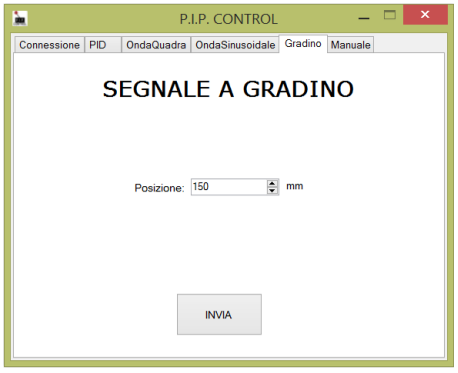
b) Pagina PID



c) Pagina Onda Quadra



d) Pagina Onda Sinusoidale



e) Pagina Gradino

f) Pagina Controllo Manuale

Figura 2.16: Pagine di interfaccia dell'applicazione P.I.P. Control

Capitolo 3

Studio analitico del problema

In vista della programmazione del PLC, si è deciso di sviluppare uno studio analitico del problema al duplice scopo di rendere agevole la selezione del controllore più adeguato e di valutare in prima approssimazione le prestazioni del sistema.

Il procedimento è stato suddiviso in due passi ai quali corrispondono livelli di semplificazione decrescenti.
Nella prima fase di modellazione, avvenuta mediante il software Matlab, si sono scritte le equazioni differenziali dei singoli componenti, effettuando le dovute ipotesi semplificative, e le si è linearizzate al fine di ottenere le necessarie funzioni di trasferimento. A questo livello dello studio la finalità è quella di inquadrare il problema in termini di dinamica e dimensioni caratteristiche. Il modello lineare semplificato consente di evidenziare gli aspetti salienti del funzionamento e di avere quindi buona comprensione dello stesso.
Tramite strumenti quali diagrammi di Bode e Nyqusit si è infine eseguito lo studio del controllore più idoneo alla soluzione del problema della stabilizzazione.

In una seconda fase si è poi ricreato il sistema in LMS ImagineLab Amaesim, software di simulazione multidominio, e si è eseguito lo studio non lineare, tenendo conto di aspetti precedentemente trascurati quali il comportamento dinamico delle valvole in apertura e chiusura, l'effetto dei tubi e dei raccordi pneumatici.
Nel successivo Capitolo 5 è possibile osservare un confronto diretto tra i risultati ottenuti sperimentalmente e quelli predetti dai due modelli, e valutare di conseguenza gli effetti delle ipotesi semplificative adottate in ciascuno di essi.

3.1 Studio del problema linearizzato

Per effettuare lo studio analitico semplificato, il sistema viene suddiviso in un sottosistema meccanico e uno pneumatico. Il primo comprende la slitta connessa al cilindro pneumatico e il pendolo, nel secondo troviamo invece le valvole e l'attuatore.

3.1.1 Analisi del sottosistema meccanico

Il sottosistema, come detto in precedenza, è assimilabile ad un meccanismo planare. I componenti essenziali sono riportati in Figura 3.1.

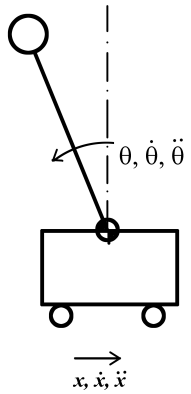


Figura 3.1: Schema del carrello con pendolo invertito

Il carrellino è vincolato a muoversi avanti e indietro lungo una retta, e su di esso si trova incernierata un'asta di lunghezza l, collegata ad una massa m. Dallo schema presentato risulta chiaro che il sistema ha due gradi di libertà, lo spostamento lungo x e la rotazione θ dell'asta attorno alla cerniera, variabili che sono state scelte come coordinate generalizzate per lo studio. I versi assunti come positivi sono quelli raffigurati, mentre la condizione $\theta = 0$, $x = 0$ è rappresentata dal pendolo in posizione verticale, e il pistone a metà corsa. L'obiettivo è ora quello di esprimere tali coordinate in funzione della forza F, che l'asta del cilindro pneumatico esercita sul carrello, e per farlo si è deciso di ricorrere allo studio delle equazioni di equilibrio dei vari elementi.

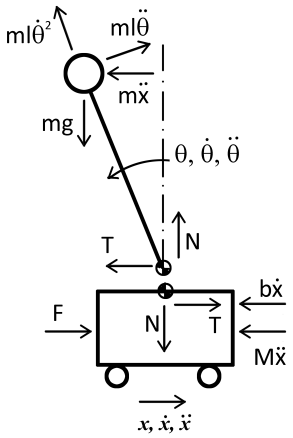


Figura 3.2: Diagrammi di corpo libero del carrello e del pendolo

In Figura 3.2 sono stati rappresentati i diagrammi di corpo libero del pendolo e del carrello. In quest'ultimo caso le reazioni vincolari sulle ruote, e la forza peso sono state omesse in quanto non compaiono nelle equazioni di interesse, di seguito riportate:

$$M_c\ddot{x} + b_c\dot{x} - F = T \quad (1)$$

$$m\ddot{x} + T + ml\dot{\theta}^2 \sin(\theta) - ml\ddot{\theta}\cos(\theta) = 0 \quad (2)$$

$$mgl\sin(\theta) + ml\ddot{x}\cos(\theta) - ml^2\ddot{\theta} = 0 \quad (3)$$

La (1) rappresenta l'equilibrio alla traslazione orizzontale del carrellino in presenza di una forza di attrito viscoso di coefficiente b_c tra lo stesso ed il piano d'appoggio, (2) e (3) si ottengono rispettivamente imponendo l'equilibrio alla traslazione verticale e alla rotazione attorno alla cerniera del corpo del pendolo. Come si evince poi dalle espressioni, l'inerzia e la massa propria dell'asta sono state considerate trascurabili.
Sostituendo (1) in (2) e riscrivendo (3) otteniamo:

$$m\ddot{x} + M_c\ddot{x} + b_c\dot{x} - F + ml\dot{\theta}^2 \sin(\theta) - ml\ddot{\theta}\cos(\theta) = 0 \quad (4)$$

$$\ddot{x} = \frac{1}{\cos(\theta)}\left[l\ddot{\theta} - g\sin(\theta)\right] \quad (3')$$

Prima di proseguire con le sostituzioni si effettua la linearizzazione secondo le seguenti ipotesi:

$$\theta \approx 0$$

$$\dot{\theta}^2 \approx 0$$

$$\sin(\theta) \approx \theta$$

$$\cos(\theta) \approx 1$$

Ne deriva:

$$(m + M_c)\ddot{x} + b_c\dot{x} - F - ml\ddot{\theta} = 0 \quad (4')$$

$$\ddot{x} = l\ddot{\theta} - g\theta \quad (3'')$$

Sostituendo ora $(3'')$ in $(4')$ si ottengono le seguenti espressioni:

$$M_c l\ddot{\theta} + b_c\dot{x} - (m + M_c)g\theta = F \quad (5')$$

$$M_c\ddot{x} + b_c\dot{x} - mg\theta = F \quad (5'')$$

3.1.2 Analisi del sottosistema pneumatico

Nella modellazione dei componenti pneumatici si è tenuto conto delle seguenti semplificazioni: aria considerata come gas ideale ($R = 287\frac{J}{kgK}$, $k = 1.4$) e trasformazioni isoterme. Entrambe le assunzioni non costituiscono approssimazioni eccessive, e sono adatte ad un ampio range di condizioni di funzionamento [4].
Le valvole utilizzate, proporzionali $2/2$ normalmente chiuse, hanno una frequenza propria molto alta rispetto ai fenomeni di accumulo nelle camere dell'attuatore pneumatico. In prima approssimazione si è quindi deciso di trascurare qualunque loro dinamica, e di modellarle come un componente di ordine zero. Per lo stesso motivo, si è deciso di tracciare una similitudine tra una coppia di valvole $2/2$ e una valvola proporzionale $3/2$, anche a seguito della scelta di comandare le valvole a coppie, come verrà dettagliato nel seguito.
Si riportano ora i passaggi salienti dello studio, condotto come suggerito in [4] e [5].
La norma ISO6358 prevede l'utilizzo delle seguenti espressioni per il calcolo della portata attraverso una valvola:

$$Q_N = Cp_1K_T\sqrt{1 - \frac{(r-b)^2}{(1-b)^2}} \quad (6)$$

$$K_T = \sqrt{\frac{293}{T_1}}$$

Dove C prende il nome di conduttanza, numericamente pari alla portata che attraversa la valvola in regime sonico, $r = \frac{p_2}{p_1}$ è il rapporto tra la pressione di valle e la pressione di monte, ed infine b è il rapporto critico, $\left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{CR}$, al di sotto del quale il flusso diventa sonico.
Per maggiori informazioni sul calcolo e l'interpretazione dei vari termini si rimanda alla norma di riferimento e ai testi specialistici. Il produttore delle valvole utilizzate fornisce per le stesse il coefficiente idraulico k_v in $\frac{dm^3}{min}\left(\frac{kg}{dm^3 bar}\right)^{\frac{1}{2}}$. Per passare da questo alla conduttanza si sono quindi sfruttate l'equazione (6) e la seguente (7):

$$Q_N = 28.6 K_T k_v \sqrt{p_2 \Delta p} \quad (7)$$

Nella quale K_T assume il significato già presentato. Imponendo l'equivalenza della portata predetta dalle due equazioni in condizioni di regime sonico si ottiene la seguente espressione per la conduttanza C:

$$C = 14.3 k_v \quad (8)$$

Il passo successivo consiste nella linearizzazione dell'espressione (6). Per farlo si assume che la pressione nelle camere del cilindro sia circa pari alla metà della pressione di alimentazione, e non si discosti mai troppo. Ciò comporta, ipotizzando che le linee di collegamento non abbiano alcuna influenza, $r = \frac{p_2}{p_1} = 0.5$ e quindi flusso subsonico nel caso della maggior parte delle valvole pneumatiche. Per quanto riguarda le simulazioni delle valvole in esame, il rapporto critico b è stato assunto pari a 0.3 non avendo dati a disposizione. Si può quindi utilizzare per la stima della portata il metodo della secante, che prevede di assimilare il tratto subsonico della curva di portata ad una retta passante per i punti $r = 1$ $Q_N = 0$ e $r = b$ $Q_N = Q_{MAX} = C$. Si ottiene così la seguente relazione:

$$\dot{m} = \frac{C\rho_0}{1-b}(p_{supply} - p_2)$$

Dove si è passati dalla portata volumetrica alla portata in massa, e la pressione p_1 è stata posta pari alla pressione di alimentazione p_{supply}. La conduttanza C dipende ovviamente dall'area di passaggio interna, e quindi dallo spostamento dell'otturatore. Assumendo, come detto, che le valvole abbiano una dinamica sufficientemente elevata rispetto alla banda passante del cilindro, si può operare un'ulteriore semplificazione. Considerando infatti una conduttanza equivalente C_{eq} direttamente proporzionale al segnale di comando, u, inviato al driver, e quindi trascurando qualunque transitorio tra il segnale e lo spostamento del cassetto, si ottiene:

$$\dot{m} = K^\star (p_{supply} - p_2)\, u$$

Ed infine, ricordando l'assunzione fatta per le pressioni nelle camere dell'attuatore, l'espressione assume la forma:

$$\dot{m}_i = K p_i u = K \frac{p_{supply}}{2} u \quad (9)$$

Dove con il pedice i si è indicata la camera a cui la valvola in azione è connessa. Si noti in questa sede che il comando u è normalizzato: la massima apertura si ottiene con un valore $u = 1$.

Si può ora passare alla modellazione del cilindro, per il quale verranno fatte le seguenti semplificazioni: trasformazioni isoterme, assenza di trafilamenti e attrito puramente di tipo viscoso. La massa d'aria contenuta in ciascuna camera è data da:

$$m = \rho V$$

Derivando tale relazione rispetto al tempo, si ottiene:

$$\dot{m} = \dot{\rho}V + \rho\dot{V}$$

Che in ogni istante esprime la portata entrante o uscente. L'espressione può essere sviluppata ricordando che per una trasformazione isoterma:

$$\frac{p}{\rho} = cost$$

E per il volume V vale la relazione:

$$\dot{V} = \frac{d}{dt}(Ax) = A\dot{x}$$

Indicando ora con 'A' la camera posteriore, e con 'B' quella anteriore e utilizzando le tre relazioni di cui sopra si ricava:

$$\dot{m}_A = \dot{p}_A \frac{\rho_0}{p_0}(V_{A0} + A_A x) + p_A \frac{\rho_0}{p_0} A_A \dot{x} \quad (10')$$

$$\dot{m}_B = \dot{p}_B \frac{\rho_0}{p_0}(V_{B0} - A_B x) - p_B \frac{\rho_0}{p_0} A_B \dot{x} \quad (10'')$$

V_{A0} e V_{B0} rappresentano rispettivamente il volume della camera posteriore e della camera anteriore nelle condizioni di riferimento (pistone a metà corsa), mentre p_0 e ρ_0 sono nell'ordine pressione e densità dell'aria in condizioni ambiente. La $(10')$ e la $(10'')$ sono di seguito riscritte per ottenere le leggi che descrivono il transitorio di crescita della pressione.

$$\dot{p_A} = \frac{p_0}{\rho_0} \frac{\dot{m}_A}{V_{A0} + A_A x} - \frac{p_A A_A \dot{x}}{V_{A0} + A_A x}$$

$$\dot{p_B} = \frac{p_0}{\rho_0} \frac{\dot{m}_B}{V_{B0} - A_B x} + \frac{p_B A_B \dot{x}}{V_{B0} - A_B x}$$

L'ultimo passo consiste nel linearizzarle nell'intorno del punto di funzionamento definito da $p_A = p_B = \frac{p_S}{2}$, $x = 0$ con pistone a metà corsa, e sostituire a $\dot{m}_A$ e $\dot{m}_B$ l'espressione (7) trovata per le valvole. Il risultato è il seguente:

$$\dot{p}_A = \frac{p_0}{2\rho_0} \frac{K p_{supply} u_A}{V_{A0} + A_A x} - \frac{A_A \dot{x} \frac{p_{supply}}{2}}{V_{A0} + A_A x} = \frac{p_0}{2\rho_0} \frac{K p_{supply} u_A}{V_{A0}} - \frac{A_A \dot{x} p_{supply}}{2V_{A0}}$$

$$\dot{p}_B = -\frac{p_0}{2\rho_0} \frac{K p_{supply} u_B}{V_{B0} - A_B x} + \frac{A_B \dot{x} \frac{p_{supply}}{2}}{V_{B0} - A_B x} = -\frac{p_0}{2\rho_0} \frac{K p_{supply} u_B}{V_{B0}} + \frac{A_B \dot{x} p_{supply}}{2V_{B0}}$$

I termini costanti possono essere raccolti per ottenere le espressioni semplificate:

$$\dot{p}_A = -C_A \dot{x} + K_A u_A \quad (11')$$

$$\dot{p}_B = C_B \dot{x} - K_B u_B \quad (11'')$$

Per concludere non resta che scrivere l'equilibrio alla traslazione orizzontale del pistone:

$$F = p_A A_A - p_B A_B - b_p \dot{x} - M_p \ddot{x} \quad (12)$$

La (12) diventa così l'anello di collegamento tra il sottosistema meccanico e quello pneumatico, F indica infatti la forza che il carrello esercita sull'asta del cilindro, e che si trova,

a ruoli invertiti, in $(5')$ e $(5'')$.
Analizzando la $(11')$ e la $(11'')$ risulta evidente quanto detto in precedenza sull'utilizzo delle valvole a coppie. A fronte di quattro di queste disponibili, i segnali di comando sono solo due: $K_A u$ e $K_B u$. Il primo viene inviato alla coppia che permette la fuoriuscita dello stelo, il secondo all'altra. Tale scelta è stata operata in primo luogo per rendere verosimile il parallelismo tracciato tra due valvole 2/2 e una 3/2, ma anche per semplificare la legge di controllo: in ogni istante infatti è necessario determinare semplicemente la direzione in cui si deve muovere il carrello ed agire di conseguenza. Un'alternativa valida potrebbe essere quella di aprire completamente il passaggio verso lo scarico e modulare solo dal lato dell'alimentazione, si è però pensato che la contropressione nella camera a scarico, generata dalla incompleta apertura dell'otturatore, avrebbe favorito una maggior precisione nei movimenti, e quindi un sistema meno instabile. Da ultimo la scelta è risultata molto vantaggiosa in fase di programmazione del PLC in quanto il modello utilizzato possiede solo due uscite analogiche.

3.1.3 Rappresentazione in spazio degli stati

Con le equazioni ricavate fino a questo punto, il problema può essere ricondotto, utilizzando la tecnica dello spazio degli stati, alla soluzione della seguente coppia di sistemi lineari di equazioni differenziali:

$$\dot{\vec{X}} = A\vec{X} + Bu$$

$$\vec{Y} = C\vec{X} + Du$$

Il primo passo consiste nel riscrivere $(5')$ e $(5'')$ sostituendo ad F l'espressione trovata in (12).

$$(M_c + M_p)\, l\ddot{\theta} + (b_c + b_p)\, \dot{x} - (m + M_c + M_p)\, g\theta - p_A A_A + p_B A_B = 0 \quad (5^\star)$$

$$(M_c + M_p)\, \ddot{x} + (b_c + b_p)\, \dot{x} - mg\theta - p_A A_A + p_B A_B = 0 \quad (5^{\star\star})$$

In $(5^\star)$ si è inoltre sfruttata l'equazione $(3'')$ che lega la $\ddot{x}$ a $\ddot{\theta}$ e θ.

Date tutte le considerazioni delle precedenti sezioni, e la forma delle equazioni ottenute, si definisce il seguente vettore di variabili di stato:

$$\vec{X} = \{x,\ \dot{x},\ \theta,\ \dot{\theta},\ p_A,\ p_B\}^T$$

Nel caso in esame si può subito notare che la matrice D, detta di *feedthrough*, sarà nulla in quanto il comando u in uscita dal controllore non ha effetto diretto sull'angolo del pendolo o sulla posizione del carrello.
Trascrivendo quindi $(5^\star)$, $(5^{\star\star})$, $(11')$ e $(11'')$ in forma matriciale si ottiene:

$$\begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \\ \dot{p}_A \\ \dot{p}_B \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{b_p+b_c}{M_c+M_p} & \frac{mg}{M_c+M_p} & 0 & \frac{A_A}{M_c+M_p} & -\frac{A_B}{M_c+M_p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{b_p+b_c}{l(M_c+M_p)} & \frac{g(m+M_c+M_p)}{l(M_c+M_p)} & 0 & \frac{A_A}{l(M_c+M_p)} & -\frac{A_B}{l(M_c+M_p)} \\ 0 & -C_A & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_B & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta \\ \dot{\theta} \\ p_A \\ p_B \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ K_A \\ -K_B \end{Bmatrix} u$$

$$\begin{Bmatrix} x \\ \theta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta \\ \dot{\theta} \\ p_A \\ p_B \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} u$$

Il valore del coefficiente di attrito viscoso è stato ricavato per l'intero gruppo carrello-cilindro come media di dieci diverse misurazioni (Per maggiori dettagli si consulti l'Appendice B). Posto quindi $b = b_p + b_c$ si riassumono di seguito i valori delle singole variabili:

Dati		
l	Lunghezza dell'asta	$0.5\ m$
m	Massa concentrata dell'asta	$0.2\ Kg$
M_c	Massa del carrello	$1.8\ Kg$
M_p	Massa del pistone	$0.4\ Kg$
b	Coefficiente di attrito viscoso	$20.83\ N\frac{s}{m}$
A_A	Area di influenza della camera posteriore	$2.01 * 10^{-4}\ m^2$
A_B	Area di influenza della camera anteriore	$1.73 * 10^{-4}\ m^2$
C_A	$\frac{A_A p_{supply}}{2V_{A0}}$	1200000
C_B	$\frac{A_B p_{supply}}{2V_{B0}}$	1200000
K_A	$\frac{p_0}{2\rho_0}\frac{K p_{supply}}{V_{A0}}$	2177000
K_B	$\frac{p_0}{2\rho_0}\frac{K p_{supply}}{V_{B0}}$	2534000

Tabella 3.1: Valori sperimentali delle variabili del modello

Gli autovalori λ_i della matrice di transizione A coincidono con i poli del sistema. Il loro calcolo permette di stabilire da subito se il sistema sia BIBO (Bounded Input Bounded Output) stabile o meno. La BIBO stabilità implica che a fronte di un ingresso di modulo limitato, l'uscita del sistema è anch'essa limitata e si dimostra che tale proprietà è valida solo se il sistema non possiede poli, ovvero autovalori, con parte reale positiva. Nel caso del pendolo inverso il buonsenso suggerisce che questa proprietà non sussista. In effetti, immaginando di analizzare un caso molto semplice, in cui l'ingresso sia direttamente costituito dalla forza applicata al carrello, la funzione di trasferimento che lega l'angolo θ dell'asta alla forza F assume la seguente forma:

$$G_{F\theta} = \frac{1}{M_c l s^2 - (m + M_c)\, g} \quad (13)$$

I cui poli sono:

$$p_{1,2} = \pm\sqrt{\frac{g\,(m + M_c)}{l M_c}} \quad (14)$$

I poli sono dunque puramente reali e simmetrici rispetto all'origine. E' inoltre interessante notare come la lunghezza dell'asta, a denominatore in (14), giochi un ruolo importante nella determinazione della risposta del sistema: al crescere di l infatti il polo positivo si avvicina all'origine, così che la legge di crescita esponenziale derivante da (13) risulta più

lenta. Con leggero abuso di terminologia poteremmo quindi dire che il sistema diventa più facile da controllare.

Il calcolo degli autovalori nel caso in esame porta ai seguenti risultati:

Autovalori della matrice A	
λ_1	$4.4592 + i0.0$
λ_2	$-4.4742 + i0.0$
λ_3	$-4.9925 + i13.2517$
λ_4	$-4.9925 - i13.2517$
λ_5	$0.0 + i0.0$
λ_6	$0.0 + i0.0$

Tabella 3.2: Autovalori della matrice di transizione degli stati A

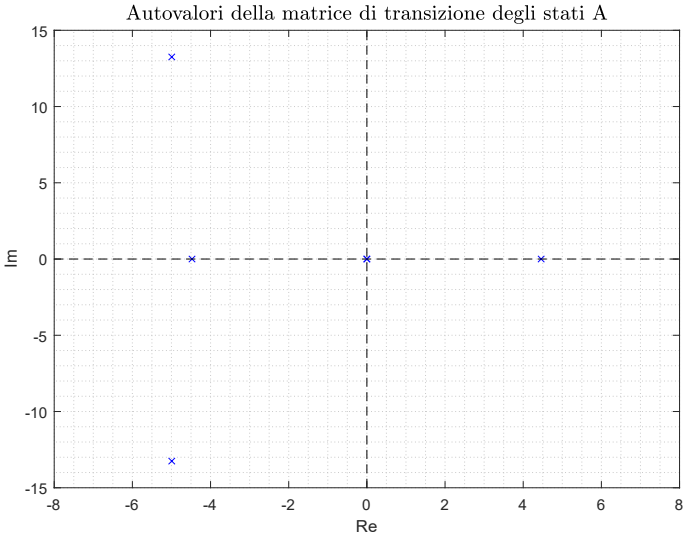


Figura 3.3: Autovalori della matrice di transizione degli stati A

Come si può osservare, l'autovalore λ_1 possiede parte reale positiva e risulta quindi instabile.

Pur essendo questi autovalori ricavati a partire dai dati in Tabella 3.1, un'attenta analisi permette di stabilire che una semplice variazione dei dati non porta ad un sistema stabile. Osservando gli autovalori λ_1 e λ_2, quasi simmetrici rispetto all'origine (la perfetta simmetria si perde con l'introduzione dell'attrito viscoso tra carrello e guida), è evidente il parallelismo con il sistema semplificato presentato in precedenza. La caratteristica evidenziata è tipica di tutti i sistemi a pendolo inverso e ad essi intrinseca. In termini formali, il comportamento dinamico di un sistema deriva dalla moltiplicazione delle funzioni di trasferimento dei singoli elementi che lo compongono, e ne possiede quindi tutti i poli. Lo stesso vale per il sistema oggetto di studio, il quale contenendo un pendolo inverso, ne dovrà possedere i poli.

Mediante la relazione $H(s) = C\left(sI - A\right)^{-1} B + D$ si possono ricostruire le funzioni di trasferimento tra l'ingresso u e una qualunque delle variabili di stato. Sono di particolare interesse $G_{u\theta}$, che lega il segnale di comando e l'angolo θ dell'asta, G_{ux} che lega lo stesso

segnale e la posizione x del pistone, nonché il rapporto tra la seconda e la prima, corrispondente alla funzione di trasferimento $G_{\theta x}$ tra le variabili θ e x. Per il calcolo analitico delle funzioni di trasferimento a partire dalle equazioni differenziali presentate nella sezione precedente, si veda l'Appendice B.

$$G_{u\theta} = \frac{(K_A A_A + K_B A_B)\, s}{(M_c + M_p)\, l s^4 + (b_c + b_p)\, l s^3 - (m + M_c + M_p)\, g s^2 + (A_A C_A + A_B C_B)\, l s^2 - (b_c + b_p)\, g s - (A_A C_A + A_B C_B)\, g} \tag{15}$$

$$G_{ux} = \frac{(K_A A_A + K_B A_B)\, s}{(M_c + M_p)\, l s^4 + (b_c + b_p)\, l s^3 - (m + M_c + M_p)\, g s^2 + (A_A C_A + A_B C_B)\, l s^2 - (b_c + b_p)\, g s - (A_A C_A + A_B C_B)\, g} \frac{l s^2 - g}{s^2} \tag{16}$$

$$G_{\theta x} = \frac{G_{ux}}{G_{u\theta}} = \frac{l s^2 - g}{s^2} \tag{17}$$

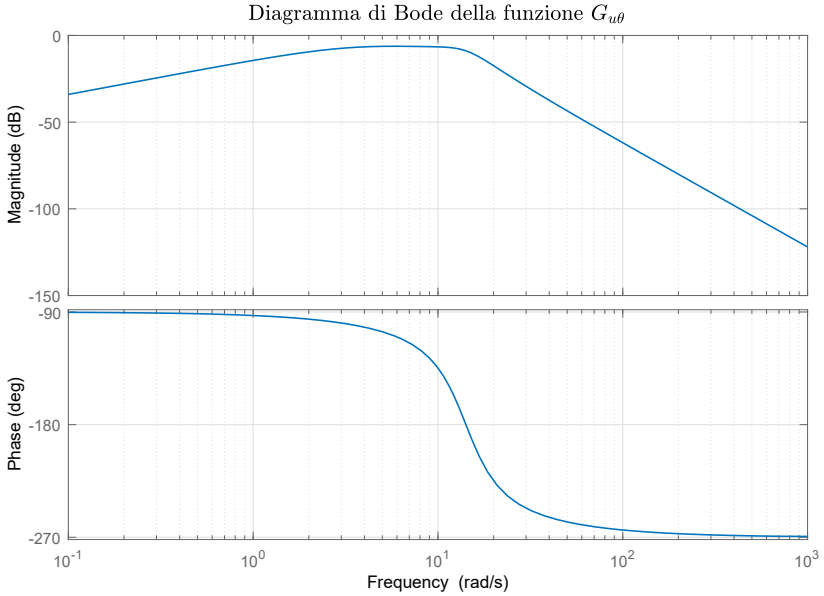


Figura 3.4: Diagramma di bode della funzione di trasferimento $G_{u\theta}$

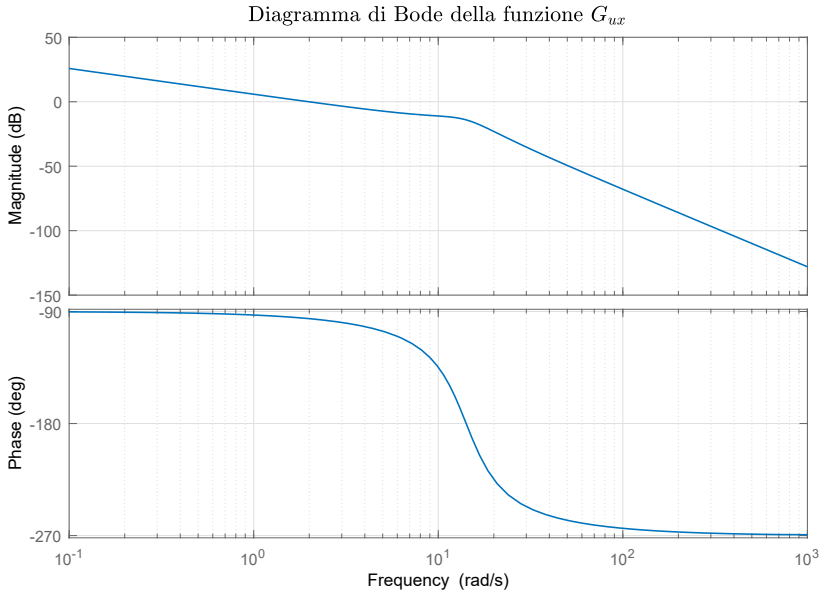


Figura 3.5: Diagramma di bode della funzione di trasferimento G_{ux}

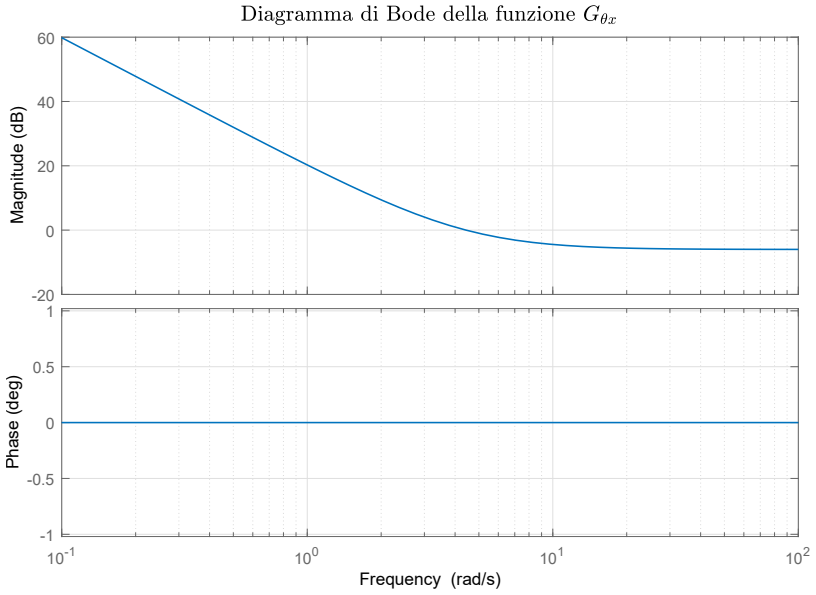


Figura 3.6: Diagramma di bode della funzione di trasferimento $G_{\theta x}$

Si riporta di seguito una rappresentazione semplificata dello schema a blocchi del sistema, volta a chiarire quanto fatto finora, che funge da anello di congiunzione con la sezione successiva dedicata allo studio del controllore utilizzato per stabilizzare il sistema.

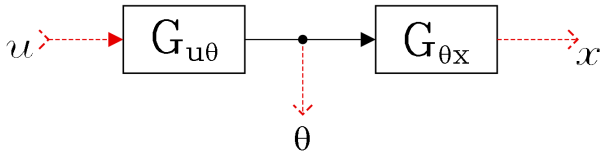


Figura 3.7: Sintetico schema a blocchi del sistema

3.1.4 Studio del controllore

Il sistema che si intende realizzare necessita di un doppio controllo. Non basta infatti stabilizzare l'angolo dell'asta, è necessario anche tenere conto della posizione del carrello. Il modo migliore per risolvere il primo problema consiste infatti nell'imprimere alla base del pendolo un'accelerazione costante, in grado di bilanciare per reazione d'inerzia lo squilibrio dell'asta. Questo principio, brillantemente sfruttato nel caso dei Sagway, richiede per costituzione una corsa infinita, ma nel caso in esame si hanno in media 250 mm a disposizione prima che lo stantuffo urti contro una delle testate. Da qui la necessità di operare il controllo sulla posizione del carrello al fine di riportarlo sempre a metà corsa e garantire così un funzionamento ottimale.
La struttura del controllo che si intende realizzare è del tipo a doppio anello chiuso, con anello interno volto alla stabilizzazione dell'angolo θ, ed anello esterno dedicato al controllo della posizione x, come mostrato nella figura sottostante. L'architettura selezionata per ciascun controllore è del tipo PID: essa, oltre ad essere diffusa e versatile, è anche semplice da implementare in dispositivi quali i PLC e rappresenta un'ottima scelta nel caso di un banco di prova realizzato per scopi didattici.

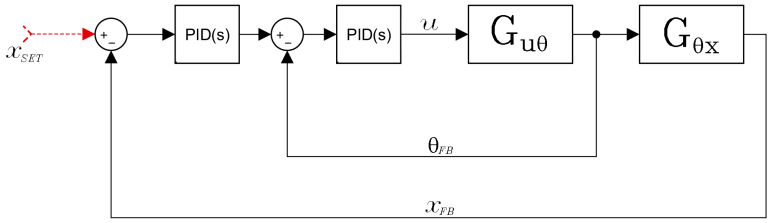


Figura 3.8: Schema a blocchi del sistema con controllo

Prima di cominciare con lo studio formale del problema della stabilizzazione, si presenta di seguito, a livello intuitivo, il principio che si intende sfruttare per risolverlo.
Si supponga che il carrello si trovi in posizione centrale, con il pendolo perfettamente verticale, e che questa sia la configurazione obiettivo del controllo. In questa condizione l'errore in ingresso al primo compensatore è nullo, e tale sarà anche l'uscita dallo stesso. Quest'ultima, che chiameremo θ_{SET} funge da riferimento per il secondo anello di controllo, quello più interno, come visibile in Figura 3.8. Il segnale θ_{SET} viene poi confrontato con quello proveniente dal trasduttore angolare e l'errore derivante, una volta compensato, costituisce il comando per le valvole. Nell'esempio in esame tutti questi segnali sono dunque nulli. Il principio che si intende sfruttare è proprio il fatto che l'uscita del primo controllore fornisce il θ_{SET} all'anello interno. Ogni volta che vi sia un errore nel posizionamento del carrello, si ha $x_{SET} - X_{FB} \neq 0$, e ciò a sua volta comporta $\theta_{SET} \neq 0$. In particolare quest'ultimo sarà tale che l'asta risulti sbilanciata verso la posizione di *set*: il carrello si muoverà di conseguenza per recuperare tale sbilanciamento, riportando così l'errore $x_{SET} - x_{FB}$,e quindi θ_{SET}, a zero.

Criterio di stabilità di Nyquist

Per lo studio dei controllori si è utilizzato il criterio di stabilità di Nyquist, unitamente all'analisi dei diagrammi di Bode. Nel seguito viene quindi brevemente riassunto quanto è necessario sapere su tale criterio. Per una trattazione più approfondita si rimanda a testi dedicati.

Il criterio di Nyquist deriva dall'applicazione del principio dell'argomento, anche noto come principio dell'indice logaritmico, ad una particolare funzione di trasferimento:

$$F(s) = 1 + G(s)$$

Dove $G(s)$ rappresenta la funzione di trasferimento di un generico sistema.
Gli zeri di $F(s)$ coincidono con i poli del sistema in catena chiusa, mentre i poli di $F(s)$ coincidono con i poli del sistema in catena aperta, quindi con i poli di $G(s)$. Applicando ora il principio dell'argomento e notando che il percorso di Nyquist della $F(s)$ non è altro che quello della $G(s)$ traslato del vettore $\overrightarrow{v} = [1, i0]$, si ottiene la relazione:

$$\overset{\frown}{N}_{-1} = Z_p - P_p \quad (18)$$

Nella quale $\overset{\frown}{N}_{-1}$ indica il numero di incircolamenti in senso orario del punto critico $-1+i0$ da parte del percorso orientato di Nyquist della funzione di trasferimento $G(s)$,mentre Z_p e P_p rappresentano, per quanto detto, rispettivamente il numero di poli in catena chiusa ed il numero di poli in catena aperta con parte reale positiva del sistema. Un numero

di incircolamenti negativo va interpretato come un pari numero di incircolamenti in verso antiorario.
Il criterio di stabilità di Nyquist afferma che data una funzione di trasferimento $G(s)$, se il suo percorso di Nyquist passa per il punto critico $-1+i0$ essa è instabile, se ciò non accade allora il sistema in catena chiusa è stabile se e solo se sussiste la seguente relazione:

$$\overset{\curvearrowright}{N}_{-1} = -P_p \quad (19')$$

O alternativamente:

$$\overset{\curvearrowleft}{N}_{-1} = P_p \quad (19'')$$

Che si ottengono da (18) imponendo che il sistema in catena chiusa non presenti poli a parte reale positiva.
Il che equivale a dire che un sistema è stabile in catena chiusa se il diagramma di Nyquist in catena aperta del sistema controllato presenta un numero di incircolamenti antiorari del punto critico $-1+i0$ pari al numero di poli a parte reale positiva della funzione di trasferimento del sistema non controllato.

Progettazione dell'anello di controllo interno

Applichiamo quanto appena detto all'anello di controllo più interno, ovvero alla funzione di trasferimento $G_{u\theta}$. I poli della funzione sono:

$$\begin{aligned} p_1 &= 4.4592 + i0.0 \\ p_2 &= -4.4742 + i0.0 \\ p_3 &= -4.9925 + i13.2517 \\ p_4 &= -4.9925 - i13.2517 \end{aligned}$$

Ovvero il primo, secondo, terzo e quarto autovalore della matrice di transizione degli stati A. Essa presenta quindi un polo a parte reale positiva. Dalla figura sottostante si può vedere come il percorso di Nyquist della stessa non incircoli il punto critico $-1+i0$, e quindi non soddisfi la condizione di stabilità in catena chiusa.

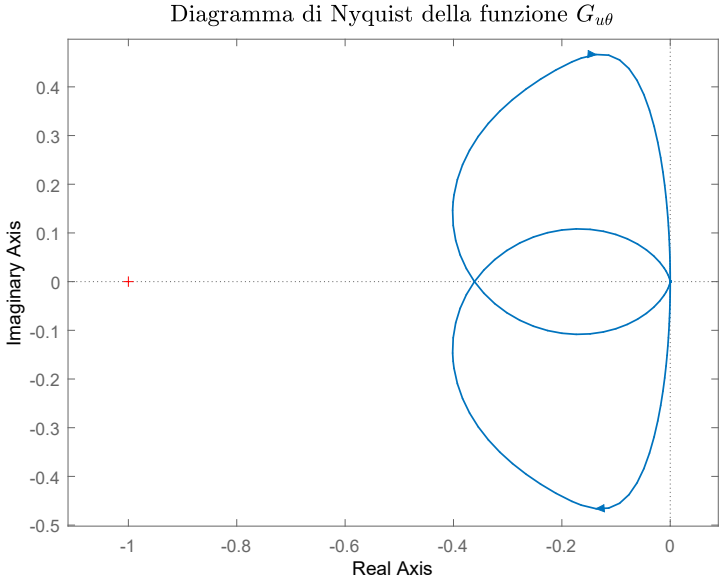


Figura 3.9: Diagramma di Nyquist della funzione $G_{u\theta}$ in anello aperto

Affinché il sistema retroazionato sia stabile deve valere la relazione $\overset{\curvearrowright}{N}_{-1} = -1$, ovvero che, dato un controllore rappresentato dalla funzione di trasferimento C_θ, il diagramma di Nyquist di $C_\theta G_{ut}$ in catena aperta compia un incircolamento antiorario attorno al punto critico. Osservando la Figura 3.9 si può subito escludere l'utilizzo di un controllore di tipo proporzionale puro: moltiplicare una funzione di trasferimento per un coefficiente reale significa infatti semplicemente scalare il diagramma di Nyquist della stessa. Nel caso in esame ci si accorge che, scalando $G_{u\theta}$ in modo che il suo percorso di Nyquist incircoli il punto $-1 + i0$, si ottiene un doppio incircolamento orario e non si assolve quindi la condizione di stabilità.

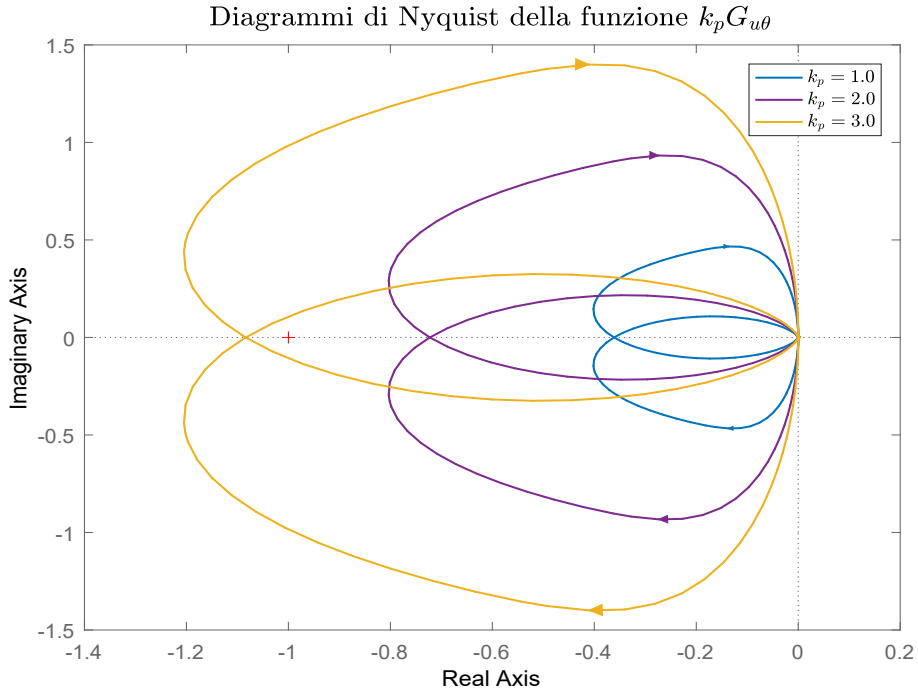


Figura 3.10: Diagramma di Nyquist della funzione $k_pG_{u\theta}$ al variare di k_p

Anche utilizzando un controllore di tipo PD nella forma:

$$C_{PD} = k_p + \frac{k_d s}{T_f s + 1}$$

non si riesce a stabilizzare il sistema. La componente derivativa permette di deformare il diagramma, la cui struttura di base resta però sempre la stessa. Anche in questo caso al variare dei parametri del controllore si possono avere due casi possibili: nessun incircolamento o un doppio incircolamento orario.

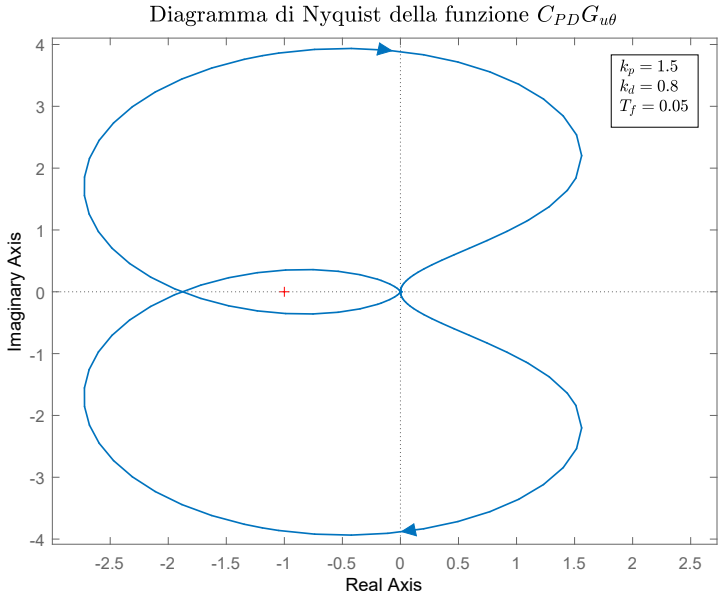


Figura 3.11: Diagramma di Nyquist con un controllore PD con $k_p = 1.5$, $k_d = 0.8$, $T_f = 0.05$

Il problema si riesce invece a risolvere con un controllore del tipo PI, scegliendo un coefficiente k_i più grande di k_p e sufficientemente grande da ottenere l'incircolamento del punto $-1 + i0$ come mostrato in Figura 3.12.

$$C_{PI} = k_p + \frac{k_i}{s}$$

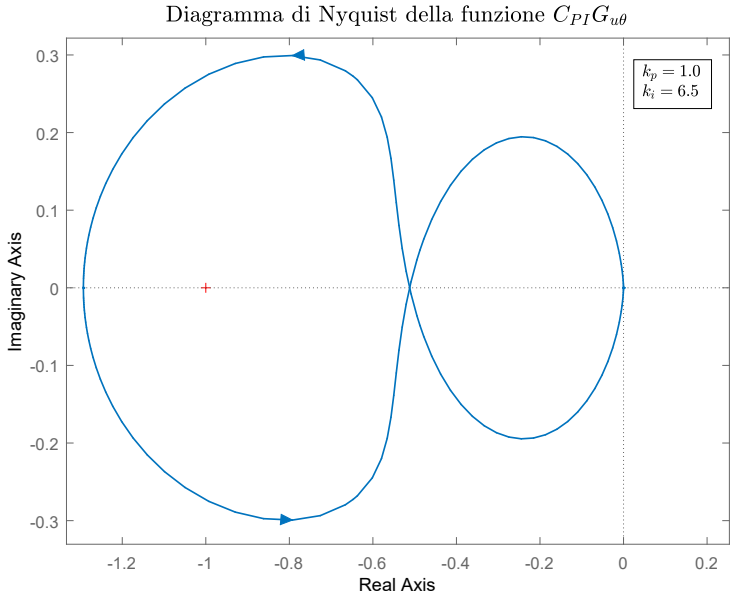


Figura 3.12: Diagramma di Nyquist con un controllore PI con $k_p = 1.0$, $k_i = 6.5$

Una considerazione di rilievo riguarda l'andamento del percorso di Nyquist delle funzioni $C_{PI}G_{u\theta}$ al variare dei parametri del controllore. Come mostrato nella figura sottostante,

esiste un valore di k_i discriminante al di sotto del quale il diagramma di Nyquist da prima interseca il punto critico e poi non effettua più incircolamenti, entrambi aspetti che precludono la stabilità. La figura riporta anche un esempio di cosa accadrebbe scegliendo un controllore in cui il contributo integrativo sia inferiore a quello proporzionale.

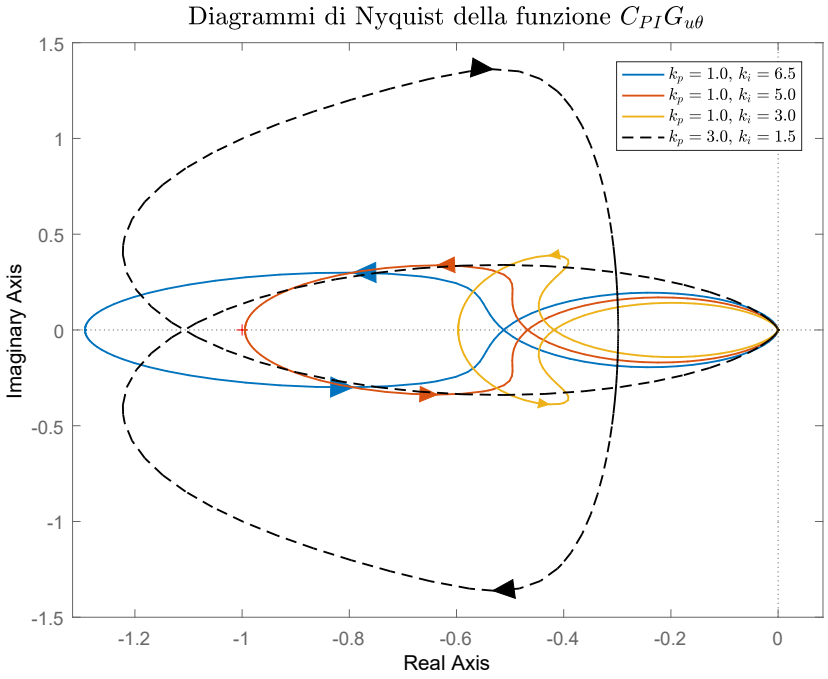


Figura 3.13: Effetto della variazione di k_i sul diagramma di Nyquist di $C_{PI}G_{u\theta}$

L'utilizzo di un controllore con un polo nell'origine comporta però una complicazione, ovvero una semplificazione tra tale polo e lo zero a numeratore della $G_{u\theta}$. Una tale semplificazione comporta che non sia sufficiente guardare al diagramma di Nyquist per aver conferma dell'avvenuta stabilizzazione. E' quindi necessario calcolare esplicitamente i poli della funzione di trasferimento in anello chiuso ed accertarsi che nessuno di essi abbia parte reale positiva. L'operazione può essere condotta agevolmente in Matalb tramite il comando *feedback*. Applicando tale comando alla funzione $C_{PI}G_{u\theta}$ come presentata in Figura 3.12 si ottiene il seguente risultato:

$$
\begin{aligned}
p_1 &= -3.1618 + i11.8174 \\
p_2 &= -3.1618 - i11.8174 \\
p_3 &= -1.8382 + i2.1111 \\
p_4 &= -1.8382 - i2.1111
\end{aligned}
$$

Tutti i poli hanno parte reale negativa e questo conferma che il sistema retroazionato è in effetti stabile.

Il passo successivo consiste nell'ottimizzazione delle prestazioni ottenibili. Non essendo stati imposti specifici requisiti sulle prestazioni da garantire, si è cominciato con il cercare di ottenere una banda passante di almeno 10 $\frac{rad}{s}$, ed un margine di fase di circa 60°.
Come punto di partenza si è deciso di utilizzare il controllore PI presentato poco sopra in

Figura 3.12 e di seguito riportato:

$$C_{PI} = k_p + \frac{k_i}{s} = 1.0 + \frac{6.5}{s}$$

L'immagine seguente raffigura il diagramma di Bode in anello aperto della funzione $C_{PI}G_{u\theta}$ sul quale sono stati indicati il margine di fase e di guadagno della stessa.

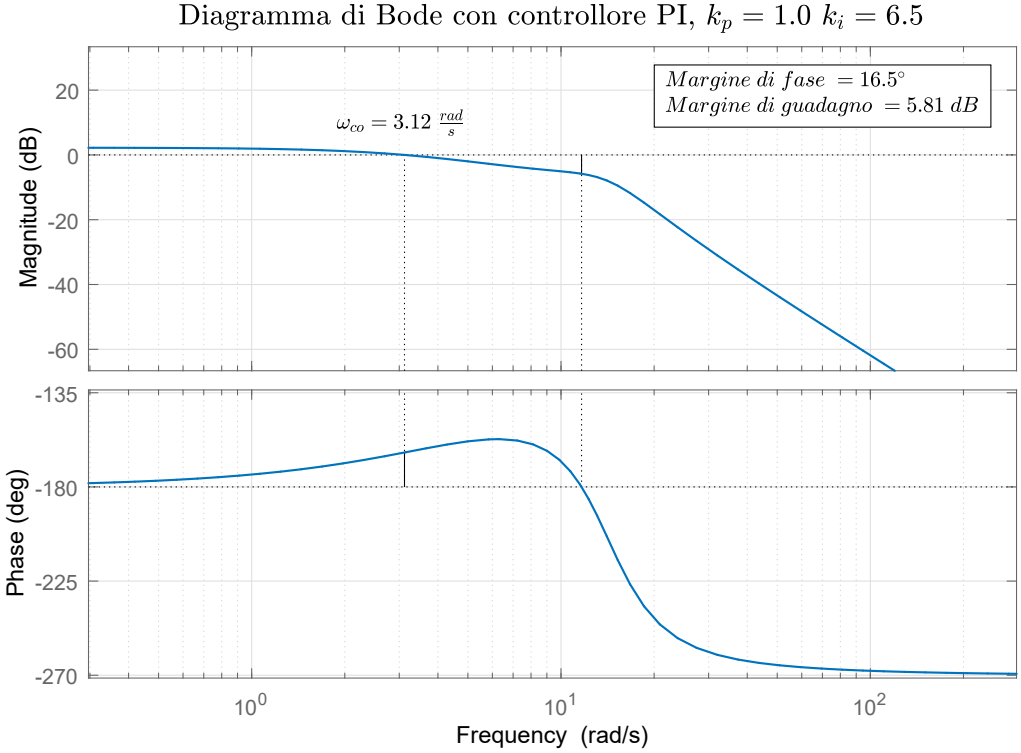


Figura 3.14: Margini di stabilità con controllore PI, $k_p = 1.0$ $k_i = 6.5$

Il controllore non permette di rispettare le specifiche desiderate sia in termini di banda passante, sia in termini di margine di fase. Un semplice aumento del contributo proporzionale permette di aumentare la pulsazione di *cross over*, ma inevitabilmente comporta una ulteriore riduzione del margine di fase già troppo piccolo. E' quindi necessario introdurre anche il termine derivativo del controllore, che ha proprio la caratteristica di garantire un *recupero* di fase nell'intorno della pulsazione desiderata. Con l'ausilio del *sisotool* di Matlab, dopo alcune prove, è stato possibile sintetizzare il seguente controllore PID:

$$C_\theta = k_p + \frac{k_i}{s} + \frac{k_d s}{T_f s + 1} = 2.09 + \frac{6.31}{s} + \frac{0.103s}{0.000875s + 1}$$

Anche in questo caso si è verificato che i poli della funzione di trasferimento $C_\theta G_{u\theta}$ in catena chiusa, di seguito riportati, non abbiano parte reale positiva.

$$\begin{aligned} p_1 &= -0.8 - i0.0 \\ p_2 &= -1.9 + i15.2 \\ p_3 &= -1.9 - i15.2 \\ p_4 &= -5.4 + i0.0 \\ p_5 &= -1142.9 + i0.0 \end{aligned}$$

Nelle due figure seguenti è possibile vedere il diagramma di Bode dell'anello interno di controllo in *open loop* e il diagramma di Nyquist dello stesso.

Diagramma di Bode della funzione $C_\theta G_{u\theta}$

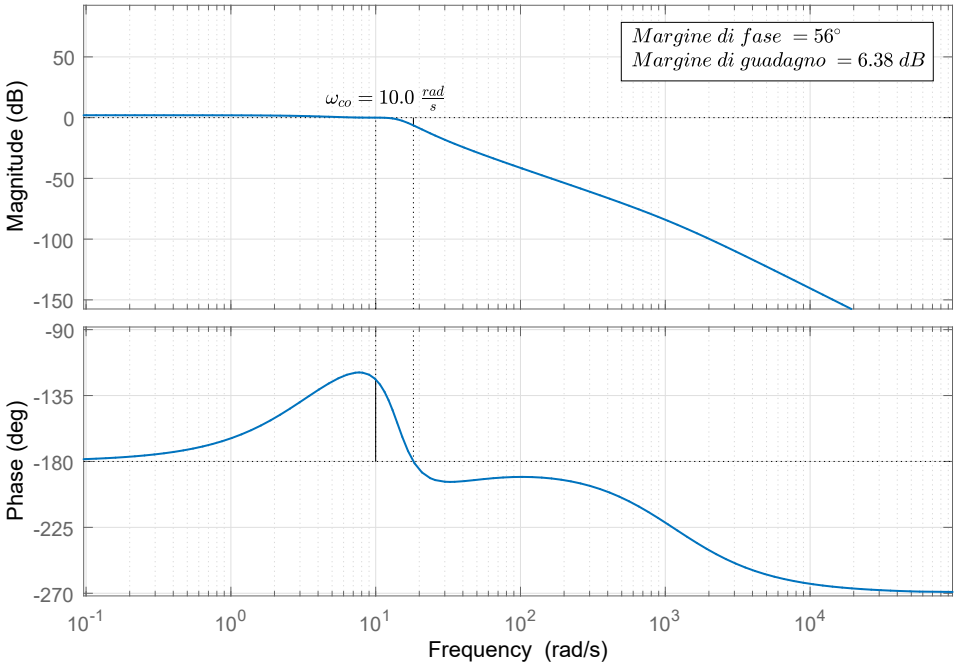


Figura 3.15: Margini di stabilità con controllore PID C_θ

Diagramma di Nyquist in anello aperto della funzione $C_\theta G_{u\theta}$

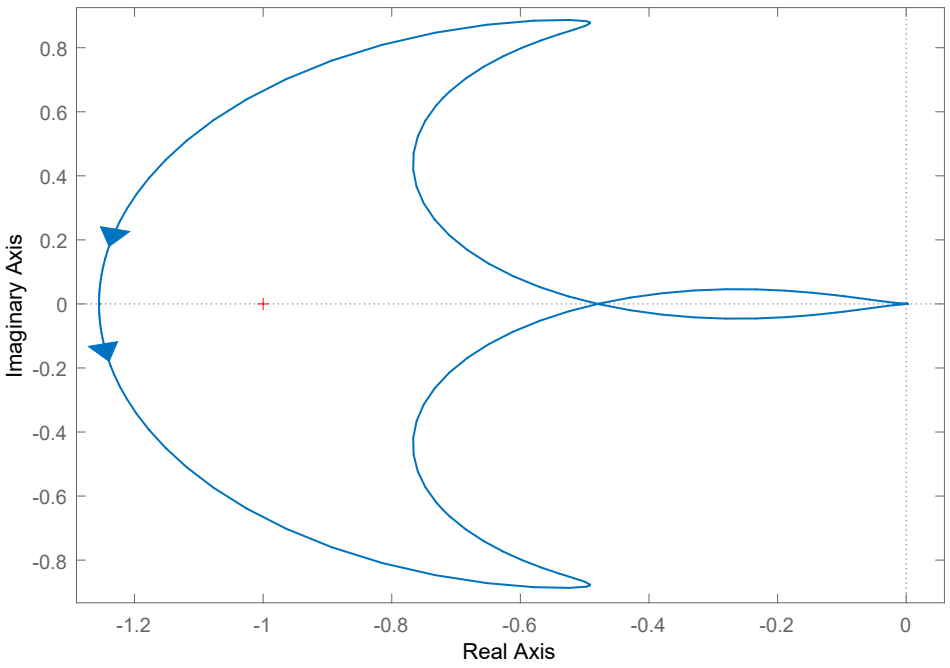


Figura 3.16: Diagramma di Nyquist in anello aperto della funzione $C_\theta G_{u\theta}$

Progettazione dell'anello di controllo esterno

Ci si dedica ora allo studio del secondo anello, quello più esterno, dedicato al controllo posizione del carrello.
Il primo passo consiste nel sostituire all'anello interno la sua funzione di trasferimento in anello chiuso, tramite la relazione:

$$G_{u\theta_{cl}} = \frac{C_\theta G_{u\theta}}{1 + C_\theta G_{u\theta}}$$

Tale operazione è possibile in Matlab mediante la funzione *feedback*, con la quale si ottiene:

$$G_{u\theta_{cl}} = \frac{95354.0\,(s + 16.30)\,(s + 3.69)}{(s + 1143.0)\,(s + 5.36)\,(s + 0.81)\,(s^2 + 3.76s + 235.2)}$$

Lo schema a blocchi del sistema diventa quindi il seguente:

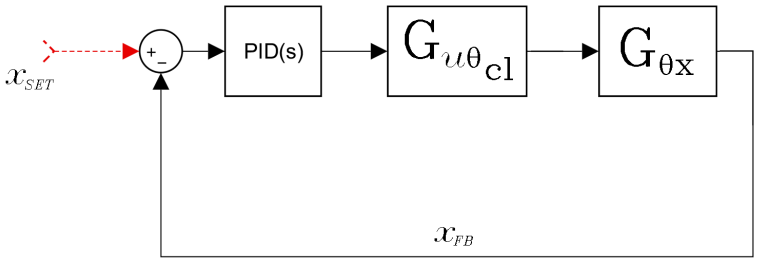


Figura 3.17: Schema a blocchi del sistema con anello interno ridotto

Si calcola poi la funzione di trasferimento complessiva $G_{u\theta_{cl}} G_{\theta x}$ e se ne determinano i poli:

$$G_{ux} = \frac{47677.0\,(s + 16.30)\,(s + 4.43)\,(s + 3.69)\,(s - 4.43)}{s^2\,(s + 1143.0)\,(s + 5.36)\,(s + 0.81)\,(s^2 + 3.76s + 235.2)}$$

$$\begin{aligned}
p_1 &= 0.0 + i0.0 \\
p_2 &= 0.0 - i0.0 \\
p_3 &= -0.8 - i0.0 \\
p_4 &= -1.9 + i15.2 \\
p_5 &= -1.9 - i15.2 \\
p_6 &= -5.4 + i0.0 \\
p_7 &= -1142.9 + i0.0
\end{aligned}$$

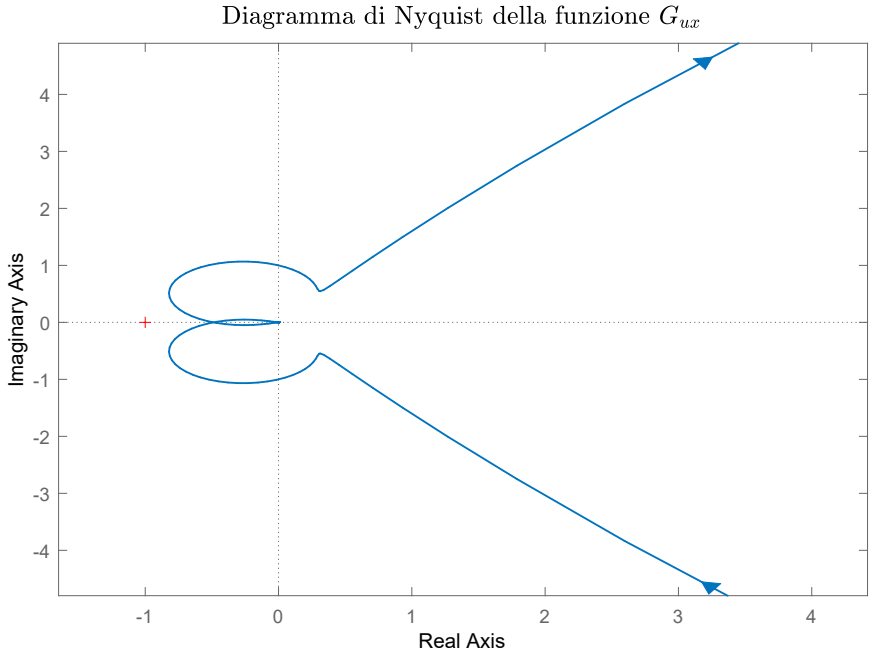


Figura 3.18: Diagramma di Nyquist in anello aperto della funzione G_{ux}

La funzione non presenta poli positivi, ma osservando il suo diagramma di Nyquist si nota che il criterio di stabilità, così come presentato in $(19')$, viene violato: il sistema in anello chiuso risulta instabile. L'eccesso poli su zeri della funzione G_{ux} è pari a 2. Il diagramma di Nyquist avrà quindi due semicerchi di chiusura di raggio infinito percorsi in senso orario e non rappresentati in Figura 3.18. Tenendo conto di questo aspetto si ha un incircolamento orario del punto critico $-1 + i0$, mentre il teorema di Nyquist prevede in questo caso un numero di incircolamenti netti pari a zero non essendo presenti poli instabii. Osservando attentamente Figura 3.18 si può notare come il problema della stabilizzazione sia risolto mediante l'utilizzo di una semplice azione proporzionale con coefficiente $k_p < 0$. Tale operazione ribalta il percorso di Nyquist rispetto all'origine degli assi. Così facendo si ottiene un incircolamento orario e uno antiorario, e di conseguenza un numero di incircolamenti netti nullo.

Per il controllo della posizione del carrello si è deciso di rispettare i seguenti requisiti: banda passante pari a 1 $\frac{rad}{s}$, quindi una decade in meno rispetto all'anello interno, e margine di fase di circa 50°. Un controllore PID che permette di rispettare questi requisiti è il seguente:

$$C_x = k_p + \frac{k_i}{s} + \frac{k_d s}{T_f s + 1} = -0.000802 - \frac{4.68 \cdot 10^{-6}}{s} - \frac{0.0306 s}{0.00875 s + 1}$$

Si riportano infine il diagramma di Nyquist della funzione $C_x G_{ux}$ ed il diagramma di Bode della stessa con relativi margini di fase e guadagno.

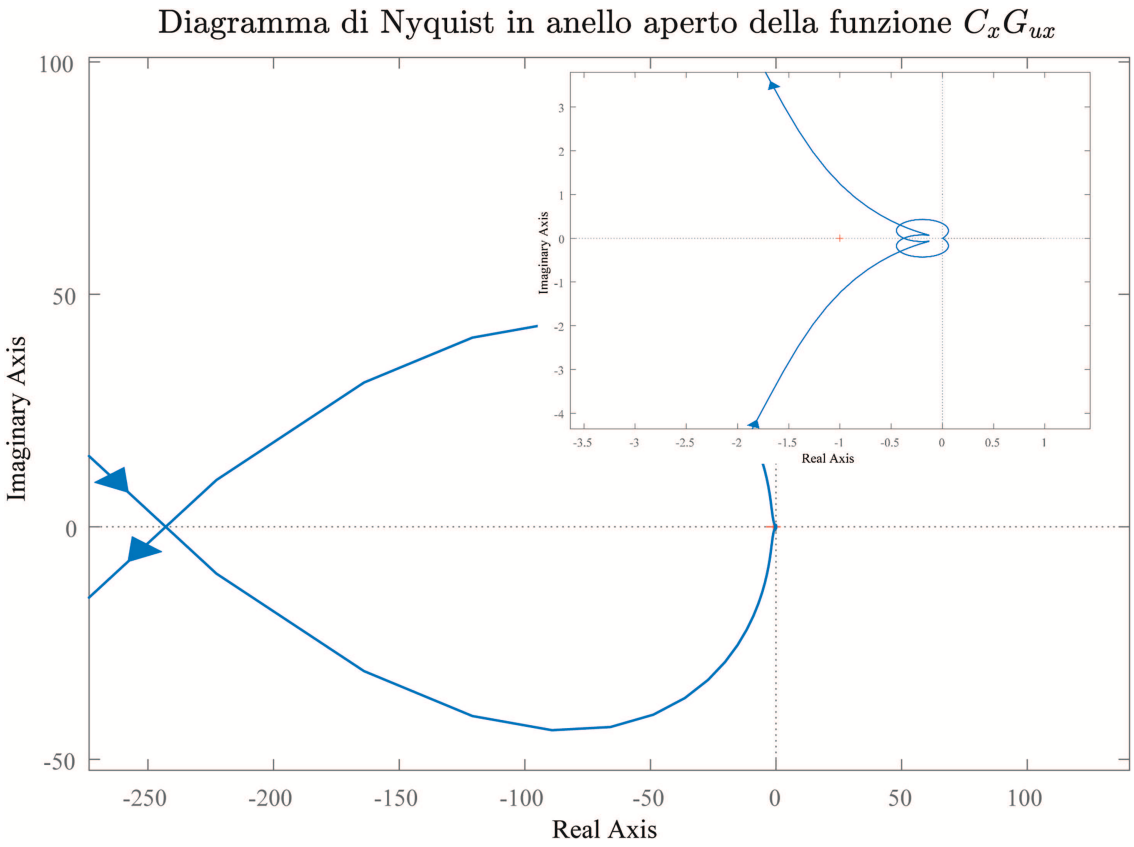


Figura 3.19: Diagramma di Nyquist in anello aperto della funzione $C_\theta G_{u\theta}$

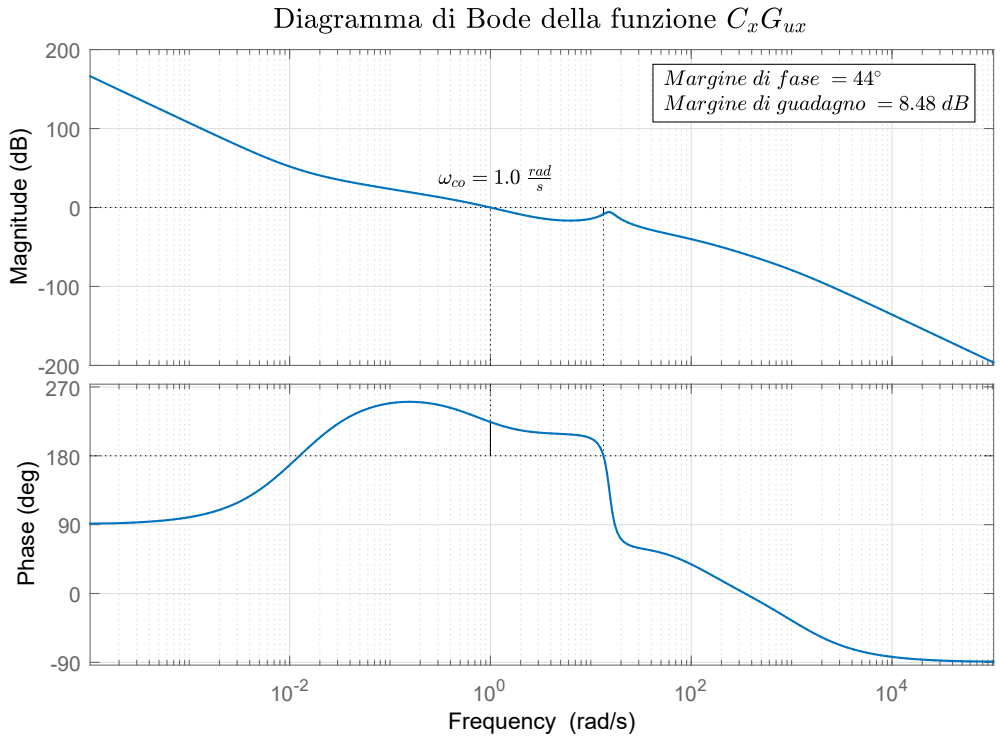


Figura 3.20: Margini di stabilità con controllore PID C_θ

3.2 Studio del sistema non lineare mediante software Amesim

Lo studio del sistema non lineare è stato condotto mediante il software "LMS Amesim", con il quale è possibile modellare e simulare problemi multi-dominio come quello in questione. Come detto all'inizio del presente capitolo, in questa analisi si sono aggiunti alcuni aspetti trascurati in precedenza quali l'influenza dei tubi, delle connessioni pneumatiche e della dinamica propria delle valvole in apertura e chiusura
I componenti utilizzati sono stati selezionati all'interno delle librerie disponibili e per ciascuno di questi è stato scelto il modello più vicino alle ipotesi fatte nello sviluppo del modello linearizzato delle sezioni precedenti. Nella figura seguente viene riportato lo schema del sistema.

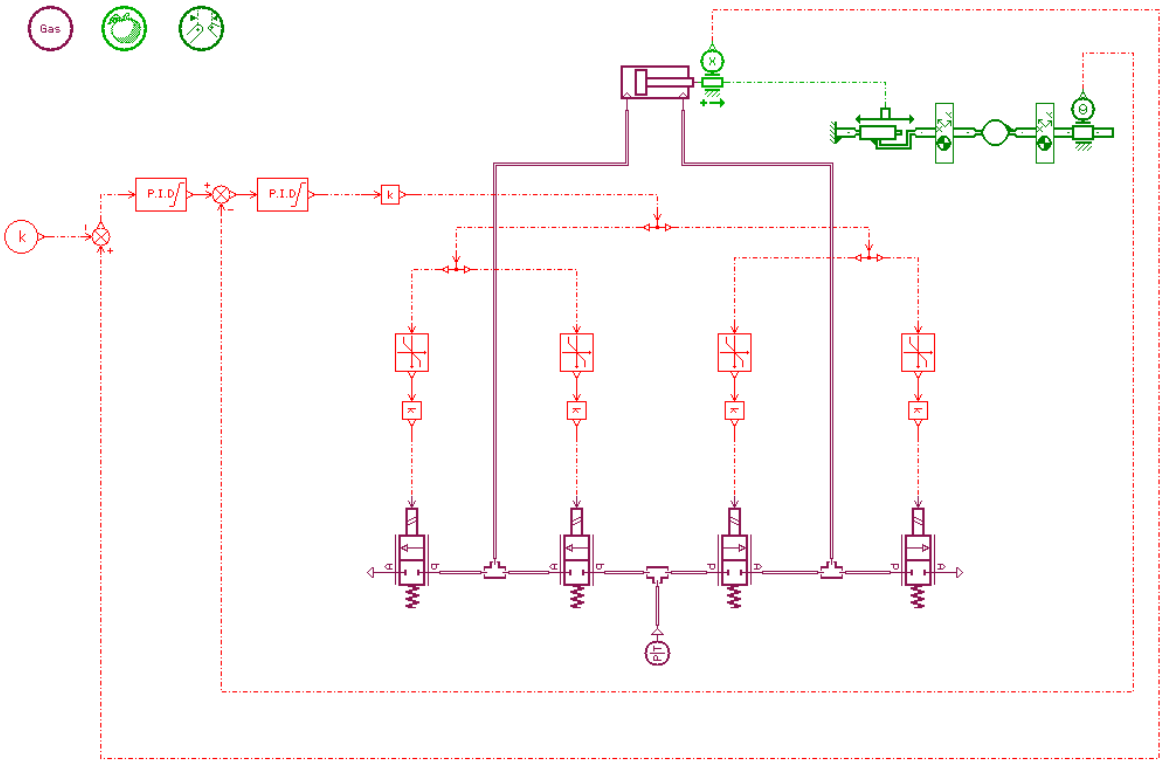


Figura 3.21: Modello Amesim del sistema

Un importante vantaggio garantito dal software consiste sicuramente nella velocità con la quale è possibile modellare il sistema ed eseguire tutte le prove di interesse, utili per la definizione delle prestazioni dello stesso.

In questa sezione, dopo un breve riassunto dei singoli elementi utilizzati, vengono presentati i risultati delle simulazioni effettuate per la valutazione ex ante del comportamento reale del banco di prova. Per un confronto dei risultati simulati con quelli ottenuti sperimentalmente si veda invece il successivo Capitolo 5

3.2.1 Componenti pneumatici

I componenti utilizzati, prelevati dalla libreria pneumatica standard, sono riassunti nella figura sottostante.

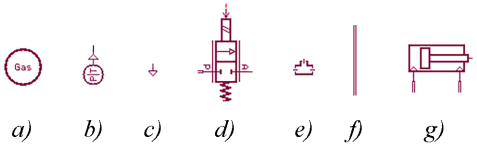


Figura 3.22: Componenti della libreria pneumatica

Come detto precedentemente si è deciso di trascurare gli effetti degli scambi termici tra i componenti e l'ambiente circostante, e quindi gli effetti degli stessi sul fluido di lavoro.

Modello dei gas, alimentazione e scarichi

Il componente in Figura 3.22.a permette di definire il modello da utilizzare per il fluido di lavoro e di specificarne i parametri. Nel caso in esame l'aria è assunta come gas perfetto, di conseguenza i parametri assumono i seguenti valori:

Aria come gas perfetto	
γ	1.4
R	287.2 $\frac{J}{kgK}$
μ	$1.82 \cdot 10^{-5}$ $\frac{Ns}{m^2}$

Tabella 3.3: Caratteristiche dell'aria assunta come gas perfetto

La sorgente di alimentazione e l'ambiente di scarico, rispettivamente b e c in Figura 3.22, sono entrambi pensati come ideali: l'ambiente di alimentazione ha pressione costante di 6 bar e temperatura di 293.15 K, mentre l'ambiente di scarico si trova a 1 bar assoluti e alla stessa temperatura.

Valvole

Le valvole selezionate sono, come nella realtà, valvole proporzionali 2/2. Il simbolo del componente è presentato in Figura 3.22.d, mentre la tabella seguente ne riporta le caratteristiche:

Parametri delle valvole	
C	$14.3\frac{l}{min \cdot bar}$
b	0.3 $(stimato)$
ω_n	50 Hz $(stimato)$
ζ	0.7 $(stimato)$

Tabella 3.4: Caratteristiche delle valvole nel modello Amesim

La banda passante della valvola, nonché il suo smorzamento sono stati stimati guardando le caratteristiche di componenti simili in quanto non è stato possibile eseguire prove specifiche per la valutazione sperimentale.

Come nel modello Matlab, e come avviene nella realtà, una coppia di valvole permette, se attiva, di far fuoriuscire lo stelo del cilindro, mentre l'altra coppia ne gestisce il rientro.

Connessioni

Per la modellazione delle connessioni pneumatiche si è cercato di rispettare al meglio quanto effettivamente presente sul banco di prova.
Come modello dei tubi se ne è selezionato uno che tiene conto della resistenza e della capacità degli stessi, di conseguenza i parametri di rilievo sono il diametro interno e la lunghezza di ciascun tratto, riassunti nella figura seguente.

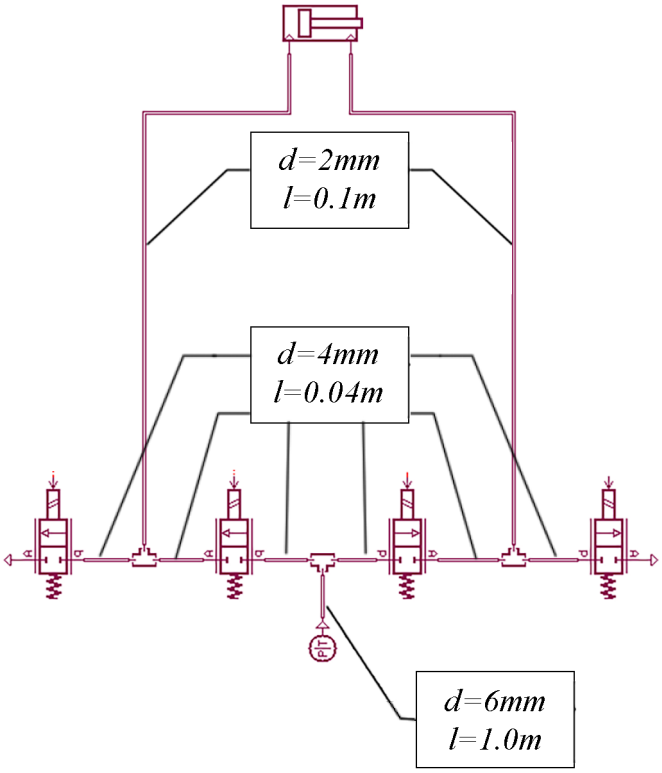


Figura 3.23: Dimensioni delle connessioni pneumatiche utilizzate

Per i raccordi a "T" invece, data la scarsa disponibilità di informazioni, si è optato per il modello "TPTE001", più semplice, in cui è necessario specificare solo i diametri dell'ingresso e delle due uscite.

Cilindro pneumatico

Nel caso del cilindro pneumatico, componente g in Figura 3.22, si sono specificati i seguenti parametri:

Parametri delle valvole	
D	16 mm
d	6 mm
l	500 mm
Costante Politropica	1.35

Tabella 3.5: Caratteristiche del cilindro nel modello Amesim

Il modello selezionato, "PNJ001", è simile a quello utilizzato nella modellazione in Matlab: a livello pneumatico si considera il cilindro privo di fughe come due capacità di volume variabile, a livello meccanico si sfrutta l'equazione di equilibrio alla traslazione orizzontale del pistone per determinare la forza esercitata dallo stelo. Non è stato invece possibile definire parametri per quanto riguarda l'attrito statico.

3.2.2 Componenti meccanici

I componenti meccanici, prelevati dalla libreria Meccanica e da quella Meccanica Planare sono riassunti nella figura seguente, rispettivamente in verde chiaro e verde scuro.

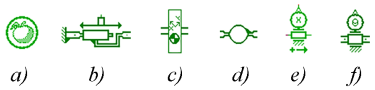


Figura 3.24: Componenti delle librerie meccaniche

Gravità

Il componente *a* permette di definire il valore dell'accelerazione di gravità, assunta nel caso in esame pari a 9.807 $\frac{m}{s^2}$.

Accoppiamento prismatico

Il componente *b* in Figura 3.24 rappresenta una guida prismatica, e nel caso in esame sostituisce la guida a ricircolo di sfere impiegata nella realtà. Il modello disponibile permette di definire due parametri: una forza di richiamo di tipo elastico, non utilizzata nel caso di studio, ed un coefficiente di attrito dinamico posto pari a 20.83 $\frac{Ns}{m}$, come già indicato precedentemente.

Corpi rigidi

Mediante due elementi di tipo *Dynamic Rigid Body*, il cui simbolo è rappresentato in Figura 3.24.c , si sono modellati il carrello ed il pendolo. Nel caso del carrello, alla massa dello stesso è stata aggiunta quella del pistone dell'attuatore pneumatico dal momento che tale parametro non può essere specificato nel modello del cilindro. Tale scelta non modifica in alcun modo il problema, come garantito dalle equazioni di equilibrio presentate precedentemente.
Per simulare un'asta priva di inerzia a cui è connessa una massa puntiforme, nel corpo che rappresenta il pendolo si è fatto coincidere il baricentro dello stesso con la sua estremità più in alto.

Cerniera

Il componente cerniera è raffigurato in Amesim con il simbolo *d*. Anche in questo caso, come per la guida prismatica, si possono inserire due coefficienti per la modellazione di due azioni: una forza di richiamo di tipo elastico, e una forza di attrito viscoso. Nel caso in esame entrambe sono state ignorate per mancanza di informazioni a riguardo.

Trasduttori

Troviamo infine i due trasduttori di posizione: il primo, Figura 3.24.e , fornisce la posizione del carrello, mentre il secondo, Figura 3.24.f , rileva la posizione angolare del corpo al quale è connesso e quindi, in questo caso, del pendolo.

3.2.3 Componenti della libreria Segnali

Tutto quanto riguarda i segnali è rappresentato in rosso nello schema sinottico in Figura 3.21. Partendo dall'anello di controllo più esterno, il segnale in arrivo dal trasduttore di posizione viene confrontato con il riferimento e l'errore derivante costituisce l'ingresso del primo controllore PID. L'uscita di questo viene confrontata con il *feedback* del trasduttore angolare ed il risultato viene elaborato dal secondo compensatore PID. In entrambe le reti è attivo l'*wind-up* della parte integrale, che permette di fermare l'integrazione quando il segnale d'uscita raggiunga la saturazione. Il secondo compensatore è seguito da un blocco *Gain* che permette di scalare l'uscita $0 \div 1$, nell'intervallo $0 \div 10$ compatibile con il segnale di comando per i driver delle valvole utilizzati sul banco di prova. Questa soluzione, impiegata anche nella programmazione del PLC, consente di confrontare direttamente, senza fattori di scala, la legge di controllo adottata sperimentalmente con quelle ottenute nelle varie fasi di modellazione.
Come nella realtà poi, e come già simulato in Matlab, lo stesso comando viene inviato ad una coppia di valvole. Quale coppia sia attiva istante per istante dipende dal segno dell'uscita del secondo controllore PID: un valore positivo indica la fuoriuscita dello stelo e verranno di conseguenza alimentate le valvole che connettono la camera posteriore con l'alimentazione e la camera anteriore con lo scarico; al contrario con un valore negativo verrà alimentata l'altra coppia di valvole e si avrà il rientro dello stelo. Per filtrare il segnale alle valvole in modo che questo giunga solo alla coppia stabilita si sono utilizzati i blocchi di saturazione visibili in Figura 3.21. A partire da sinistra, il primo ed il terzo filtrano i segnali negativi in modo da avere all'uscita un valore nullo, il secondo ed il quarto filtrano i segnali positivi e lasciano invece passare quelli negativi. Infine, esattamente come avviene nella programmazione del PLC, la tensione di alimentazione delle valvole non può assumere valori negativi, per questo motivo, dopo l'operazione di filtraggio di cui sopra, i segnali negativi vengono cambiati di segno utilizzando un *gain* pari a -1 prima di giungere alle valvole.
Un'ultima considerazione riguarda l'ingresso al primo controllore PID. Com'è possibile vedere dal modello del sistema esso è ottenuto dall'operazione $feedback - set$ e non $set - feedback$. In Matlab si è infatti visto che, data la convenzione sui segni scelta per lo spostamento del carrello e l'inclinazione dell'asta, i coefficienti del controllore C_x devono essere negativi. Si è quindi scelto in Amesim di adottare la soluzione di cui sopra per avere invece i coefficienti del controllore positivi.

Generatori di impulsi

Data la mancanza di componenti preconfezionati ed in vista delle attività di simulazione, si è deciso di introdurre anche due generatori di impulsi in modo da simulare disturbi esterni di tipo impulsivo sul carrello e all'estremità superiore del pendolo.

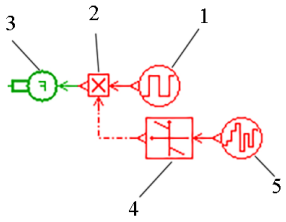


Figura 3.25: Generatore di impulsi

Il componente 1 permette di generare un'onda quadra di ampiezza e periodo desiderati, e viene utilizzato come fonte di impulsi di intensità desiderata. I componenti 4 e 5 insieme permettono di ottenere la generazione casuale dei numeri 1 e -1: Il componente 5 infatti estrae secondo una distribuzione uniforme numeri compresi tra -1 e 1, mentre il componente 4, saturazione inversa, sostituisce al numero in ingresso il valore di soglia indicato, in questo caso 1 per i numeri positivi e -1 per quelli negativi. L'elemento 2 effettua la moltiplicazione tra l'uscita del generatore di onda quadra e l'uscita del componente 4, di fatto generando degli impulsi di intensità e periodo noti, ma direzione casuale. Infine il componente 3 effettua la conversione da grandezze pure a N,ovvero il segnale in forza che deve essere connesso al resto del modello.
Una volta realizzato il sottogruppo lo si è connesso al pendolo, mentre una sua copia è stata connessa al carrello, come mostrato nella figura sottostante.

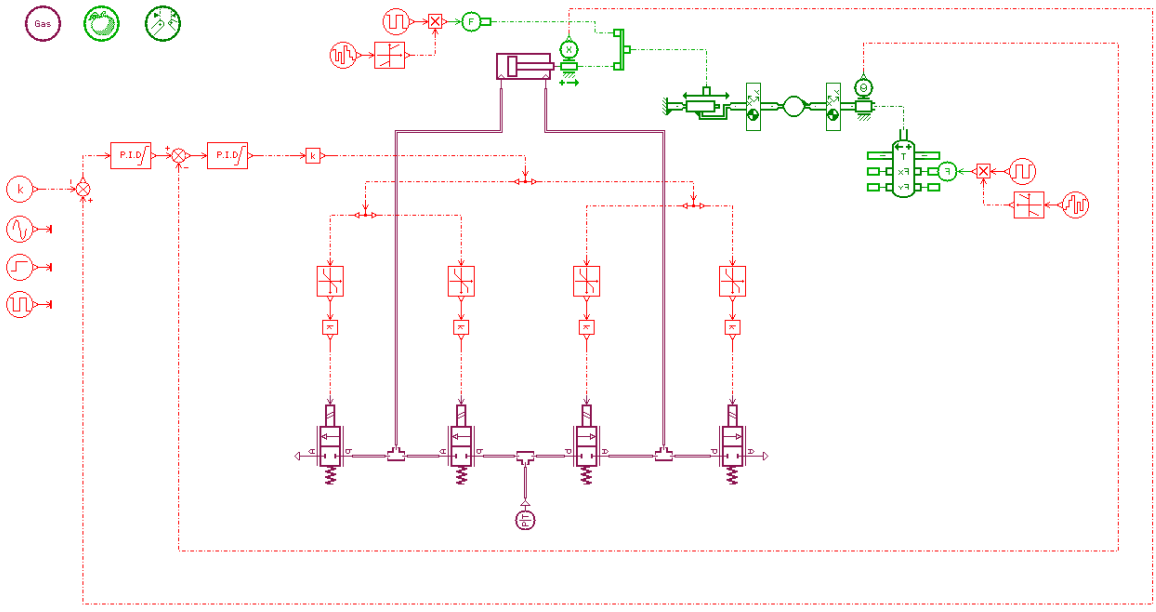


Figura 3.26: Modello Amesim del sistema completo

Nella figura, a sinistra, è inoltre possibile vedere diversi componenti per la generazione di onde quadre, sinusoidali e segnali a gradino, oltre al segnale costante già presente in Figura 3.21, che verranno utilizzati, in fase di simulazione, per generare diversi andamenti del segnale di riferimento per la posizione del carrello.

3.2.4 Risultati di simulazione

Nella presente sezione vengono riportati i risultati di alcune simulazioni eseguite in Amesim per capire quanto le semplificazioni adottate in prima approssimazione in Matlab influenzino le prestazioni e cercare quindi di migliorare i controllori C_θ e C_x ricavati in quella sede.

Simulazione con controllori C_x e C_θ trovati in Matlab

La prima simulazione eseguita consiste nel test dei due controllori trovati in Matlab, e sotto riportati, con riferimento fisso per la posizione del carrello e una piccola perturbazione iniziale, data da un leggerissimo squilibrio delle pressioni nelle camere dell'attuatore.

$$C_x = k_p + \frac{k_i}{s} + \frac{k_d s}{T_f s + 1} = 0.000802 + \frac{4.68 \cdot 10^{-6}}{s} + \frac{0.0306 s}{0.00875 s + 1}$$

$$C_\theta = k_p + \frac{k_i}{s} + \frac{k_d s}{T_f s + 1} = 2.09 + \frac{6.31}{s} + \frac{0.103 s}{0.000875 s + 1}$$

Dai risultati in Figura 3.27 si può vedere come il controllo dell'asta in posizione verticale riesca seppur con un'oscillazione permanente del carrello dovuta alla perturbazione iniziale.

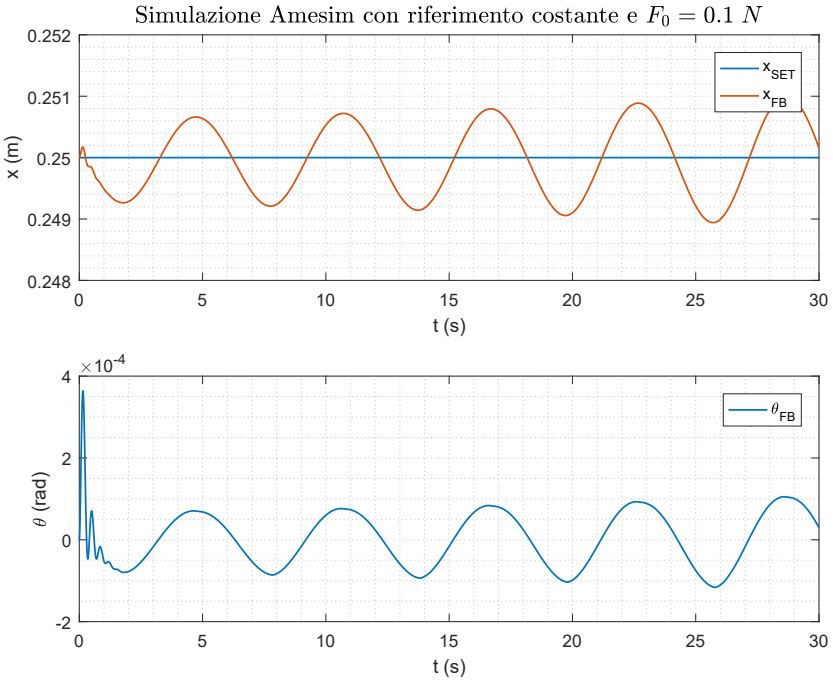


Figura 3.27: Simulazione Amesim con riferimento costante e forza iniziale $F_0 = 0.1\ N$

Aumentando anche di poco lo squilibrio iniziale, passando da $F_0 = 0.1\ N$ a $F_0 = 5\ N$ applicati dallo stelo al carrello, il sistema si dimostra in realtà instabile come visibile nella Figura 3.28.

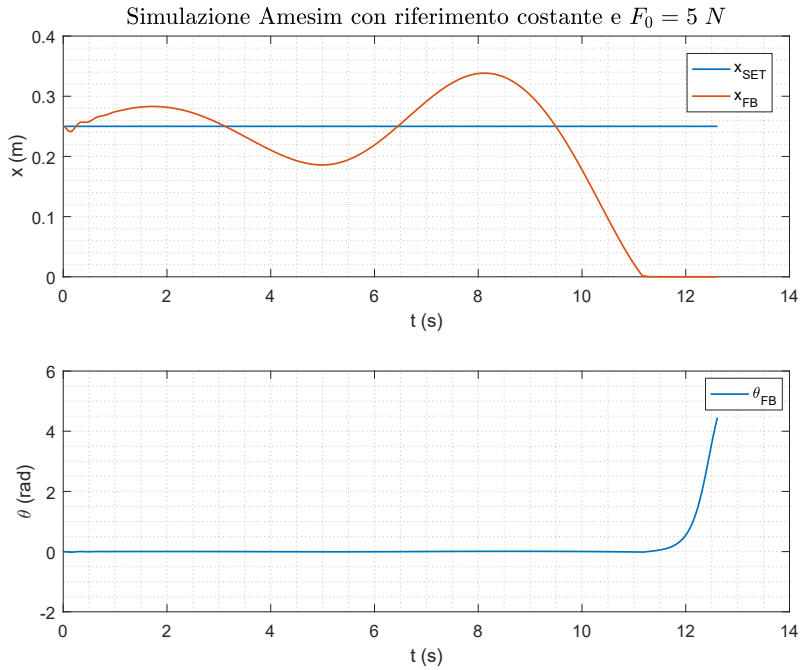


Figura 3.28: Simulazione Amesim con riferimento costante e forza iniziale $F_0 = 5\ N$

Prima di procedere alla modifica delle leggi di controllo si è tentato di capire a cosa sia dovuta tale necessità. In prima battuta si è rimosso l'effetto dei tubi e delle connessioni a T, per avvicinarsi a quanto modellato in Matlab. Il risultato è sicuramente positivo. La figura seguente mostra infatti che, in questo caso, con uno squilibrio di 5 N il controllo avviene con successo. Si è però verificato che aumentando la perturbazione il controllo fallisce. Questo può sicuramente essere attribuito alle non linearità del sistema.

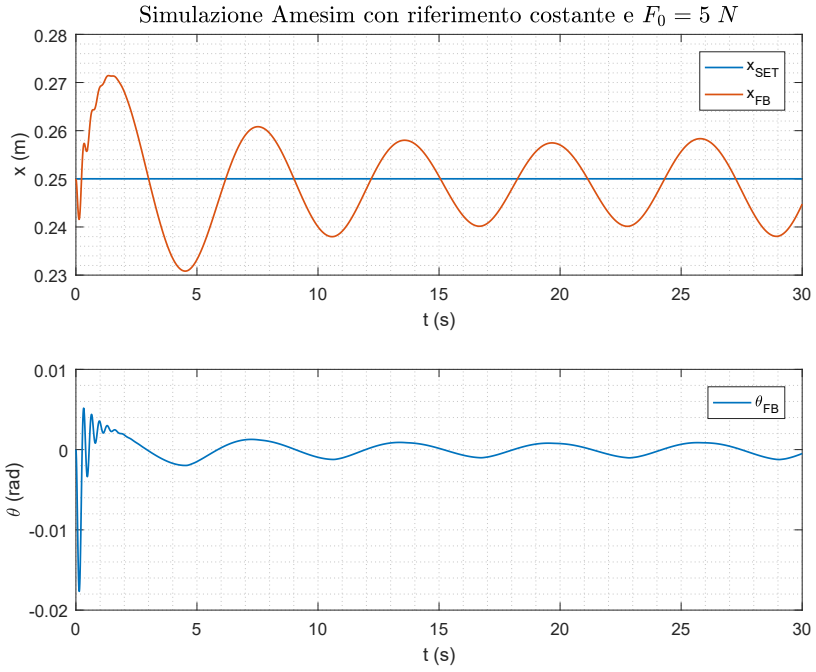


Figura 3.29: Simulazione Amesim con riferimento costante e forza iniziale $F_0 = 0.1\ N$

Simulazioni con controllori ottimizzati

Dalle prove effettuate precedentemente è stato possibile dopo alcuni tentativi giungere ai seguenti controllori che rendono stabile il sistema e garantiscono buone prestazioni in simulazione.

$$C_x = 0.005 + \frac{4.68 \cdot 10^{-6}}{s} + \frac{0.06s}{0.0953s + 1}$$

$$C_\theta = 5.0 + \frac{8.0}{s} + \frac{0.094s}{0.000875s + 1}$$

Confrontandoli con quelli presentati in precedenza si può vedere come non risultino molto diversi, e che la correzione più grande ha riguardato C_x, con un coefficiente k_p aumentato di un fattore 4.
Di seguito si può invece osservare il grafico della risposta ad una variazione a gradino del *setpoint* in x.

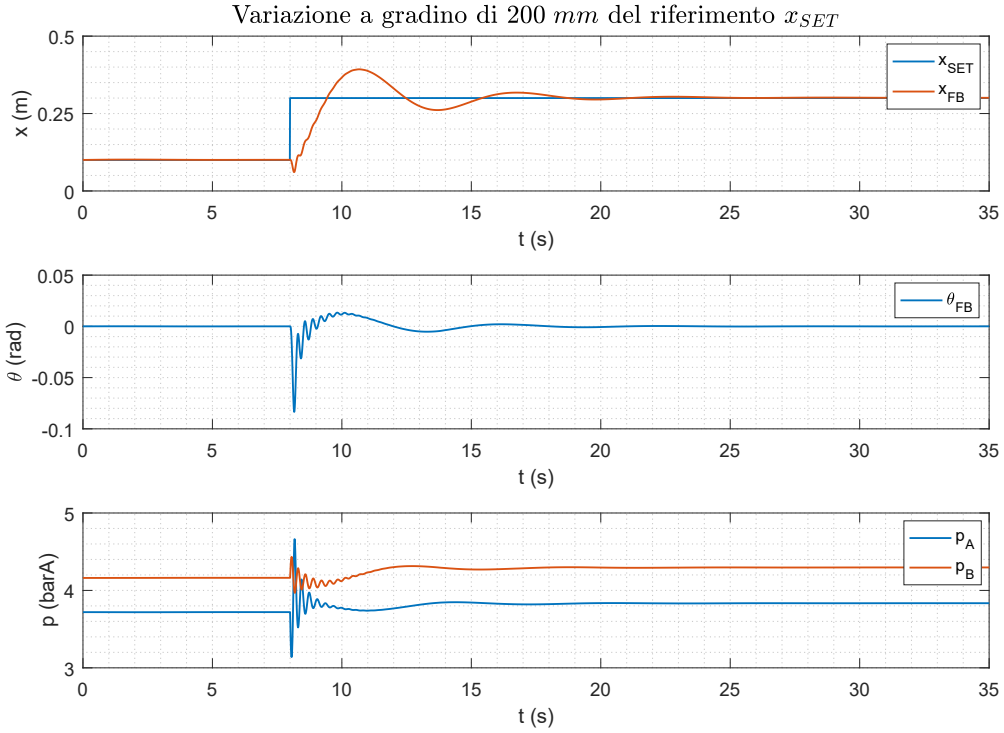


Figura 3.30: Simulazione Amesim con variazione a gradino di 200 mm di x_{SET}

Il movimento del carrello presenta un andamento peculiare con sottoelongazione tipico dei sistemi a non minima rotazione di fase, ovvero con zeri a parte reale positiva, quale il pendolo inverso. Intuitivamente il comportamento si può spiegare pensando che il carrello debba prima sbilanciare leggermente l'asta nella direzione del moto, arretrando quindi in direzione opposta, per poi muoversi verso il punto desiderato e "recuperare" l'inclinazione. Dalla prova effettuata si può notare un tempo di salita di 1.08 s, una sottoelongazione di 0.05 m ed una sovraelongazione pari a 0.13 m. Nel terzo grafico si può invece osservare l'andamento della pressione nelle camere dell'attuatore. Tenuto conto del fatto che le pressioni sono qui espresse in termini assoluti, l'assunzione fatta nella fase di modellazione lineare, che le pressioni si mantengano nell'intorno della metà della pressione di alimentazione, sembra quindi soddisfatta, cosa verificata anche in altre prove effettuate.

Si riportano di seguito i risultati ottenuti in due prove con andamento sinusoidale del riferimento x_{SET}.

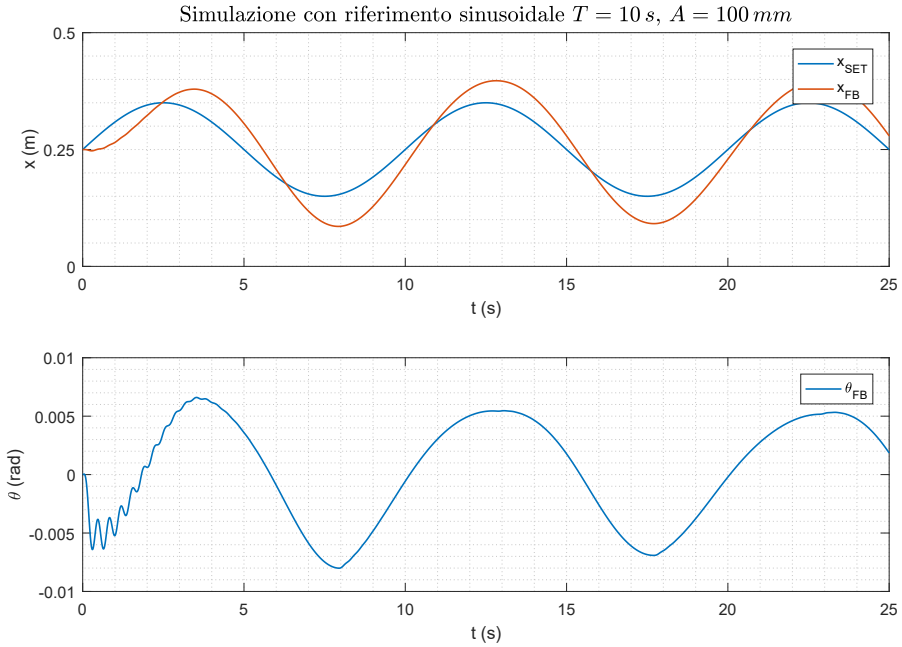


Figura 3.31: Simulazione Amesim con riferimento sinusoidale $T = 10\ mm$ e $A = 100\ mm$

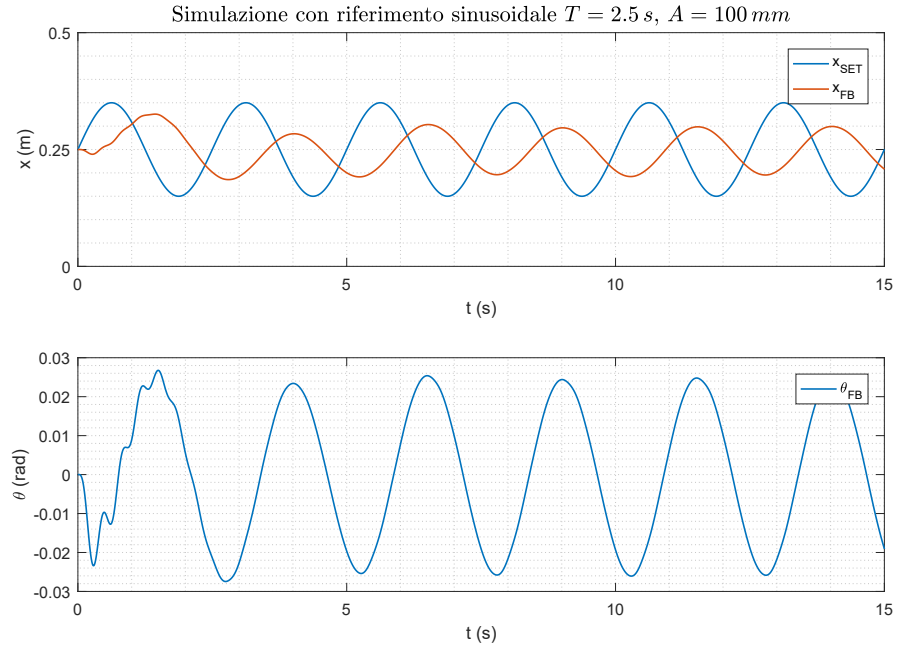


Figura 3.32: Simulazione Amesim con riferimento sinusoidale $T = 2.5\ mm$ e $A = 100\ mm$

In Figura 3.31 si presenta il risultato di una simulazione con sinusoide di ampiezza pari a 100 mm e periodo 10 s. Lo sfasamento presente tra i segnali x_{SET} e x_{FB}, valutato tramite procedura di *fitting*, è di 14.4°. Nella Figura 3.32 il periodo dell'onda sinusoidale è invece di 2.5 s, che implica $\omega = 2.5\frac{rad}{s}$, quindi molto al di sopra della banda passante raggiungibile

dal sistema. A conferma di tale fatto si osservano due fenomeni: l'attenuazione del *feedback* rispetto al riferimento e lo sfasamento molto maggiore, pari a 128°.
Si riportano infine i risultati di due simulazioni in cui sono stati imposti dei disturbi al carrello, Figura 3.33, e alla massa posta in punta all'asta del pendolo, Figura 3.34.

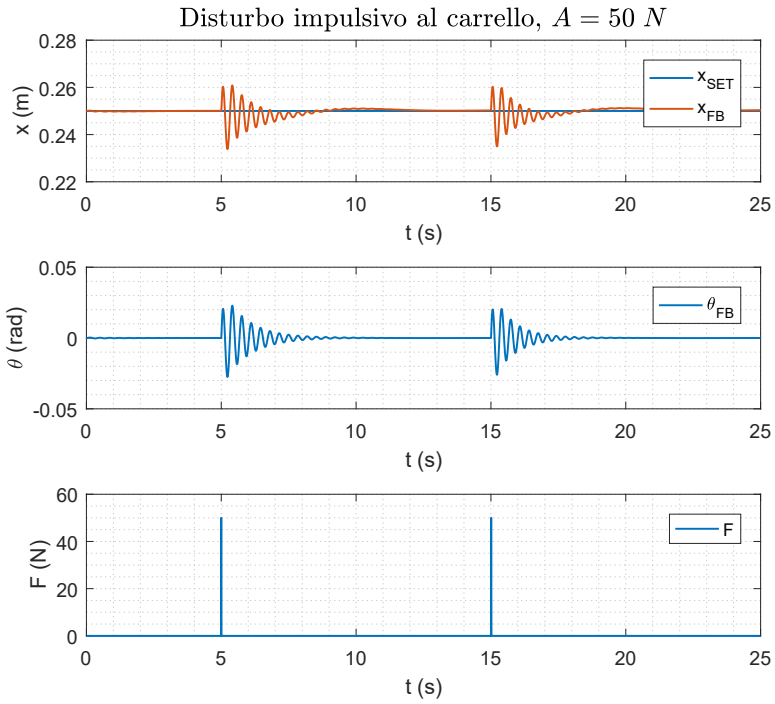


Figura 3.33: Simulazione Amesim di un disturbo impulsivo di 50 N sul carrello

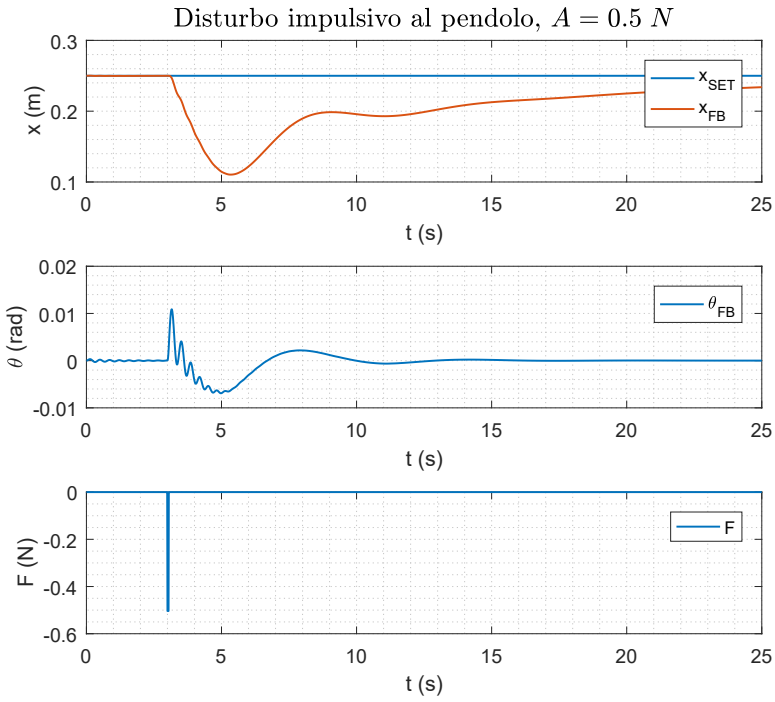


Figura 3.34: Simulazione Amesim di un disturbo impulsivo di di 0.5 N al pendolo

Capitolo 4

Programmazione del PLC

Il PLC, Programmable Logic Controller, utilizzato per l'attività e già presentato nella Sezione 2.2 del presente elaborato, è prodotto dalla Siemens AG con il codice S7-1200.
La programmazione è stata realizzata mediante il software TIA Portal v.14, fornito dalla casa produttrice, necessario per interfacciarsi con il PLC ed eseguire il caricamento dei programmi in memoria. Numerose altre funzionalità sono disponibili, quali ad esempio la registrazione dei valori assunti da ingressi e uscite, nonché da ogni variabile presente nella memoria del controllore.
Di seguito si analizza la struttura del codice sorgente scritto dal candidato ed il suo funzionamento. Per non appesantire la trattazione l'intero codice sorgente è stato riportato nell'Appendice C. Per informazioni sull'utilizzo dell'applicazione P.I.P. Control si rimanda invece alla Sezione 2.5

4.1 Struttura del programma PLC

Il linguaggio utilizzato per la programmazione è il *Ladder* o, secondo terminologia Siemens, il *KOP*. Prima di procedere con l'analisi della struttura del codice si riassumono le caratteristiche di ciascun tipo di blocco disponibile nella programmazione di un PLC Siemens, al fine di rendere più chiara la seguente presentazione.
I blocchi a disposizione sono di quattro tipi: blocchi organizzativi "OB" (colore viola), blocchi funzionali "FB" (colore azzurro), blocchi funzione "FC" (colore verde) ed infine blocchi dati "DB" (colore azzurro). I blocchi organizzativi sono a loro volta suddivisi in diverse tipologie, tutti accomunati però dalla caratteristica di essere attivati in seguito ad un evento o trascorso un determinato periodo di tempo. I blocchi funzionali devono essere attivati all'interno di un blocco di tipo OB e creano un proprio blocco DB durante l'esecuzione. Questo aspetto permette di avere più istanze della stessa FB, ciascuna con il proprio database di variabili. I blocchi FC sono simili agli FB se non per il fatto che non creano un proprio DB di esecuzione e di conseguenza in ogni istante può esistere una sola istanza di una funzione FC. Infine, i blocchi di tipo DB possono essere assimilati a dei veri e propri database più che a delle funzioni: raccolte di variabili accessibili dai singoli OB, FB o FC.

La struttura del programma, rappresentata nella figura sottostante è piuttosto semplice. Il nucleo del codice è costituito dal blocco *"PID Cyclic Interrupt"*, nel quale si trova l'intero algoritmo di controllo, mentre le altre funzioni svolgono compiti ausiliari di gestione e comunicazione con PC esterni.

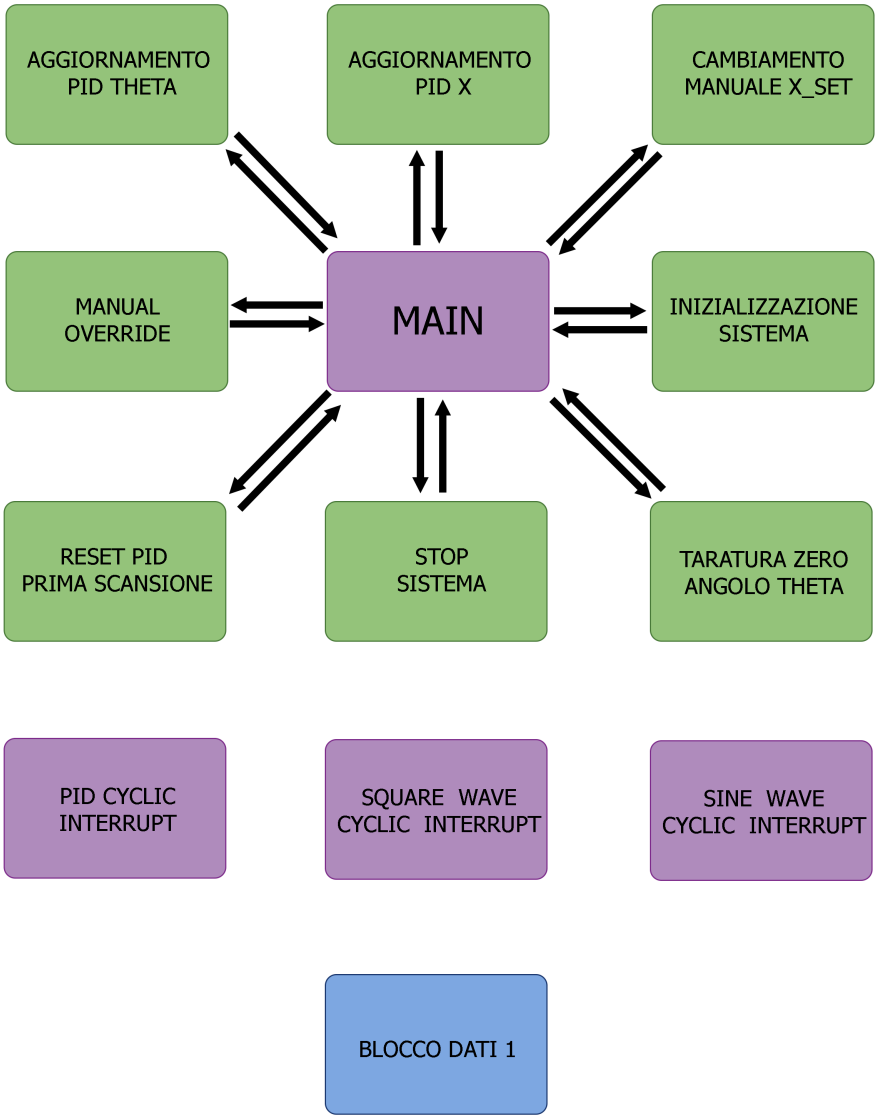


Figura 4.1: Schema sinottico del programma per PLC

Nel complesso sono presenti quattro blocchi OB, otto blocchi FC e un blocco DB. Di seguito ciascun blocco funzionale viene riportato ed analizzato in dettaglio con particolare riguardo alla logica e al funzionamento nel complesso, nonché segmento per segmento.

4.1.1 Blocco OB Main

Ogni Programma per PLC Siemens deve contenere un blocco organizzativo di sottotipo *Main* chiamato nello stesso modo. Esso rappresenta la prima parte di codice ad essere eseguita all'avvio della CPU e viene richiamato all'inizio di ogni ciclo di scansione.
Nel caso in esame la funzione Main è costituita da pochi segmenti di codice Ladder.
Il primo segmento è dedicato all'esecuzione di alcune operazioni preliminari. Il bit $M10.0$ è un bit di sistema, attivo solo durante il primo ciclo di scansione dopo l'avvio. In questo segmento vengono per sicurezza resettati i bit di avvio dei generatori d'onda e dei controllori PID, nonché quello del controllo manuale del banco. Infine si lancia la funzione *"Reset PID*

First Scan", che ha lo scopo di inizializzare alcune variabili utilizzate durante la procedura di aggiornamento dei coefficienti dei due compensatori PID tramite PC. Il secondo ed il terzo segmento sono legati all'utilizzo del dispositivo di controllo manuale presentato in precedenza. Il primo dei due serve ad attivare l'algoritmo di controllo quando si attivi il selettore di avvio su suddetto dispositivo, il secondo permette invece di eseguire l'operazione opposta. Il comando auto-alimentato del bit $M4.0$ è reso necessario dal duplice intervento su di esso da parte sia dell'applicazione P.I.P. Control, sia del dispositivo di controllo manuale. I segmenti successivi, fino al nono, sono dedicati all'attivazione di particolari funzionalità, quando i relativi bit di consenso vengano attivati mediante un PC esterno. Le funzionalità in questione, a ciascuna delle quali corrisponde una differente FC sono analizzate nel seguito. L'ultimo segmento dell'OB Main è di nuovo collegato all'utilizzo del dispositivo di controllo manuale. Quando infatti il bit $M4.0$ risulti attivo, e non sia disponibile la connessione ad un PC, i bottoni sullo stesso permettono di far variare la posizione di riferimento del carrello. Al centro del segmento, sui due rami in parallelo si trova una combinazione logica che permette di escludere l'attivazione della FC posta alla fine quando i tasti risultino premuti contemporaneamente.

4.1.2 Blocco OB Square Wave Cyclic Interrupt

il blocco in questione è del tipo OB e sottotipo *Cyclic Interrupt*. Questi blocchi vengono eseguiti ad intervalli di tempo costanti e prestabiliti, indipendentemente dalla durata del ciclo di scansione. Risultano quindi perfetti per la generazione di forme d'onda, o, come dettagliato in seguito, per il calcolo di una rete di compensazione PID.
Il blocco in questione permette di generare un segnale ad onda quadra di ampiezza e frequenza selezionabili, con *duty-cycle* pari a 0.5.
Il primo segmento esegue un controllo sui consensi, in assenza dei quali le istruzioni successive vengono saltate, così da ridurre al minimo il tempo di calcolo. Sul secondo ed il terzo segmento sono invece inseriti i due temporizzatori TON, *SW_ Timer_ 1* e *SW_ Timer_ 2*, necessari alla generazione dell'onda quadra. L'uscita Q di un temporizzatore TON si attiva una volta trascorso il tempo impostato nell'ingresso PT, in questo caso pari ad un semi-periodo, e si disattiva, con reset del temporizzatore quando viene a mancare l'alimentazione sul ramo su cui quest'ultimo è posto. In luce di quanto detto la figura sottostante presenta l'andamento dei segnali dei due temporizzatori nel caso in cui il tempo PT sia pari ad un secondo.

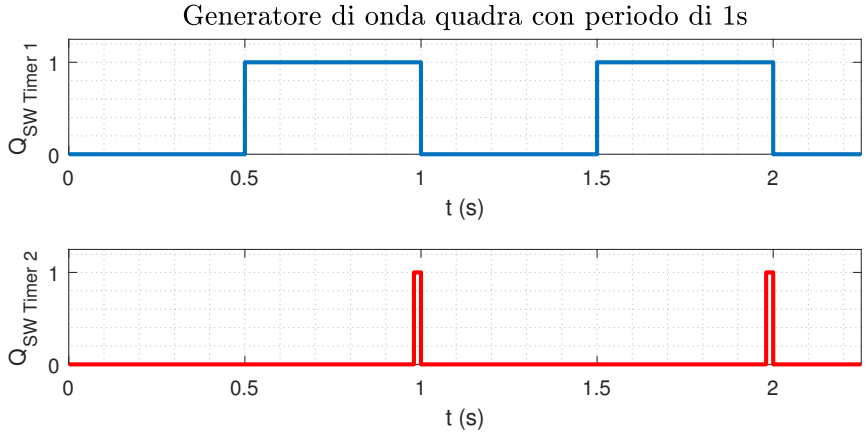


Figura 4.2: Uscite Q nella generazione di un'onda quadra con periodo di 1s

All'avvio della routine il segnale Q del secondo temporizzatore è assente, di conseguenza il primo risulta alimentato. Trascorso un semi-periodo l'uscita Q di *SW_ Timer_ 1* si attiva, così che anche il temporizzatore *SW_ Timer_ 2* inizia a funzionare. Trascorso un altro semi-periodo, l'uscita Q del secondo si attiva, togliendo l'alimentazione al primo. Si genera così una reazione a catena che porta alla sparizione del segnale Q di *SW_ Timer_ 1*, alla conseguente disattivazione di *SW_ Timer_ 2* ed infine alla sparizione del segnale Q di quest'ultimo. A questo punto l'intera procedura si ripete da capo.
Gli ultimi due segmenti di codice permettono l'aggiornamento del riferimento in posizione del carrello, che varia tra un minimo salvato nella variabile *SW_ AMP_ NEG* e un massimo salvato nella variabile *SW_ AMP_ POS*. Questi valori sono inviati al PLC dall'applicazione P.I.P. Control al momento dell'attivazione del generatore di onda quadra e sono calcolati mediante le seguenti relazioni:

$$SW_AMP_NEG = 0.25 - Ampiezza$$

$$SW_AMP_POS = 0.25 + Ampiezza$$

4.1.3 Blocco OB Sine Wave Cyclic Interrupt

Il blocco in questione, come quello precedente, è del tipo *"Cyclic Interrupt"* e permette di far variare il *setpoint* del carrello secondo un'onda sinusoidale di ampiezza e frequenza selezionabili ed equazione:

$$x_{SET} = 0.25 + A\sin(\omega t)$$

Anche in questo caso le variabili utili vengono inizializzate dall'applicazione P.I.P. Control al momento dell'attivazione della funzione mediante il bit $M0.4$.
Il primo segmento, in modo analogo a quanto avviene nel blocco *Square Wave Cyclic Interrupt*, verifica i consensi necessari e in caso questi siano assenti, salta tutti le istruzioni successive. Sul secondo segmento è presente un temporizzatore che si riavvia ogni volta che trascorre un tempo pari ad un periodo dell'onda sinusoidale in questione. Il terzo ed il quarto segmento infine sono dedicati al calcolo e all'aggiornamento della posizione di riferimento del carrello. In primo luogo si preleva l'uscita ET del temporizzatore, nella quale è salvato il tempo trascorso dall'avvio dello stesso, e si effettua la conversione da ms a s. Le operazioni successive consistono nel calcolo e nell'aggiornamento della variabile *X_ SET* secondo l'equazione di cui sopra.

4.1.4 Blocco OB PID Cyclic Interrupt

Come detto il blocco *"PID Cyclic Interrupt"* costituisce il cuore dell'itero programma. E' infatti qui che vengono processati gli errori di posizione angolare e lineare e viene calcolato il comando d'uscita per le valvole. La struttura del codice rispecchia l'architettura a doppio anello chiuso presentata nel precedente capitolo, con l'uscita dal primo controllore PID, quello relativo alla posizione della slitta, che funge da riferimento per l'anello più interno. Prima di analizzare i vari segmenti del blocco, si riassume brevemente la procedura di realizzazione di un controllore PID all'interno di un PLC Siemens. Il primo passo consiste nel creare un blocco di tipo *Cyclic Interrupt*, come il presente, all'interno del quale verrà inserita la rete PID vera e propria. La frequenza con la quale viene chiamato l'interrupt coincide con la frequenza con cui viene calcolato l'algoritmo PID. Quest'ultimo è tutto contenuto all'interno di un componente chiamato *PID Compact*, che fa parte della famiglia *Oggetti Tecnologici*. Una volta creato l'interrupt, il blocco *PID Compact* va posizionato

al suo interno, ed è quindi possibile impostarne i parametri di funzionamento, il più importante dei quali è il periodo di campionamento. Esso stabilisce quante volte l'algoritmo viene eseguito prima che le uscite vengano aggiornate. In altri termini: stabilito un intervallo di un millisecondo per l'interrupt e impostata tale proprietà a quattro millisecondi, l'algoritmo PID viene eseguito quattro volte prima che l'uscita del PLC venga effettivamente aggiornata. Questa tecnica consente di non intasare il bus d'uscita e nel contempo permette al sistema di rispondere al segnale di comando. Più un sistema è lento nella risposta ad una variazione del *setpoint*, più il periodo di campionamento può essere elevato. Nel caso in esame l'algoritmo PID viene eseguito ogni millisecondo, e l'aggiornamento delle uscite avviene ogni due. Pur essendo la 1200 la CPU meno prestante tra quelle offerte dalla Siemens, l'intero blocco *PID Cylcic Interrupt*, contenente due *PID Compact* viene eseguito in un tempo compreso tra 300 μs e 500 μs, quindi ben al di sotto del limite ammissibile di 1 ms.

Il primo segmento si attiva ogni volta che l'algoritmo di controllo viene attivato ed azzera l'errore accumulato dalle componenti integrative dei compensatori. Il secondo ed il terzo segmento sono dedicati al calcolo degli errori in x e θ ed alla loro compensazione. In entrambi i casi il primo passo consiste nella lettura dell'input analogico connesso al sensore, nella normalizzazione del valore letto, ed infine, mediante il blocco $SCALE_X$, nella proiezione del valore normalizzato nell'intervallo di interesse.
Una volta letta e convertita la posizione del carrello, essa viene fornita, insieme con il riferimento in posizione, al primo blocco PID, che compensa l'errore tra i due ingressi e ne salva il risultato nella variabile X_PID_OUT. Questa viene poi utilizzata, sul terzo ramo, nell'ingresso corrispondente al riferimento del secondo blocco PID, il quale compensa l'errore tra suddetto riferimento e il segnale proveniente dal sensore angolare, la cui conversione è già stata spiegata. L'uscita del secondo controllore PID, ovvero il comando per i driver delle valvole, viene poi elaborata nel quarto e nel quinto segmento. La necessità di processare separatamente un comando positivo da uno negativo è data dal fatto che l'uscita del modulo analogico è limitata all'intervallo $0 \div 10\ V$, senza contare che anche i driver non accetterebbero segnali di comando negativi. Nel quinto ramo si ha quindi l'operazione *ABS*, con il quale si ottiene il modulo del segnale d'ingresso.
Il sesto ed ultimo ramo ha il compito di azzerare l'errore accumulato dalla parte integrativa dei controllori nel caso in cui il carrello ed il pendolo si trovino entrambi a finecorsa. Più nello specifico l'azione di azzeramento avviene quando la slitta si trova al finecorsa destro ed il pendolo risulta ruotato in senso orario, o viceversa quando la prima è a sinistra, con il secondo inclinato in senso antiorario. In questi due casi il controllo può infatti considerarsi concluso, in quanto sarebbe necessaria una corsa superiore a quella disponibile per poter proseguire. Se l'azzeramento non venisse eseguito, una volta ripreso il controllo sarebbe necessario del tempo affinché l'errore accumulato venga smaltito.

Un'ultima considerazione di notevole interesse riguarda la conversione tra l'uscita del secondo compensatore PID ed il comando effettivamente inviato alle valvole. Durante le prove effettuate si è verificato che il minimo comando che garantisce flusso attraverso le valvole è pari a 3.5 V, con una pressione di alimentazione di 6.0 bar. Questo aspetto comporta un'elevata non linearità nella risposta delle valvole, superata mappando l'uscita del PID nell'intervallo $3.5 \div 10\ V$, ovvero $9680 \div 27648$. Infine, per rendere più pronto il sistema durante il funzionamento, si è deciso di mantenere sempre un flusso minimo attraverso le valvole, a simulare quanto si ottiene nel caso di valvole proporzionali con ricoprimento negativo delle luci. Quest'ultima considerazione porta ad avere l'intervallo d'uscita visibile nel codice, pari a $14000 \div 27648$.

4.1.5 Blocco FC Aggiornamento PID Theta

Il blocco in questione, di tipo FC, è composto da soli due segmenti. Esso viene chiamato durante la scansione del *"Main"* quando il bit $M4.6$ risulta attivo.
Nel primo segmento si esegue una copia dei valori presenti in alcune variabili del *"Blocco Dati 1"* nelle variabili che corrispondono ai coefficienti del compensatore PID dell'anello di controllo dell'angolo θ. I valori da copiare vengono inviati al PLC dall'applicazione P.I.P. Control e l'operazione di copia si rende necessaria in quanto l'accesso alla zona di memoria relativa ai compensatori PID è protetta per sicurezza e non vi si può quindi accedere direttamente.
Il secondo ed ultimo segmento resetta il bit $M4.6$ in modo tale che al successivo ciclo di scansione il blocco in questione non venga eseguito nuovamente.

4.1.6 Blocco FC Aggiornamento PID X

La presente funzione è del tutto analoga a quella precedente, con l'unica differenza che il bit di attivazione è in questo caso $M4.5$ e si effettua l'aggiornamento dei coefficienti del compensatore PID relativo alla posizione del carrello.

4.1.7 Blocco FC Cambiamento Manuale X SET

Nel caso in cui non sia disponibile la connessione ad un PC, il banco può essere controllato, come detto, mediante un dispositivo di controllo manuale appositamente realizzato. A tale scopo sono presenti sullo stesso due bottoni che permettono, una volta azionato l'algoritmo di controllo, di far variare il setpoint del carrello. La pressione dei pulsanti porta alla chiusura dei contatti $I0.1$ e $I0.2$ con conseguente esecuzione del presente blocco.
Il primo segmento inizia con un contatto che effettua il riconoscimento del fronte di salita dell'uscita Q del temporizzatore posto sul secondo ramo. Ad ogni fronte di salita il *setpoint* viene incrementato di un millimetro. Tali fronti distano tra loro 10 ms, valore impostato nell'ingresso PT del temporizzatore. Lo stesso si disattiva all'accensione dell'uscita Q, per la presenza del contatto normalmente chiuso all'inizio del secondo segmento, per poi riattivarsi al ciclo di scansione successivo dal momento che la propria disattivazione comporta lo spegnimento di tutte le uscite.
Lo scopo di tale algoritmo è quello di generare variazioni del *setpoint* prevedibili, controllabili e indipendenti dalla durata del ciclo di scansione. Per ogni secondo di pressione di uno dei due pulsanti si ha un incremento o decremento del riferimento della posizione del carrello pari a 100 mm.

4.1.8 Blocco FC Manual Override

Questa funzione rende possibile muovere a piacere il carrello mediante l'applicativo Windows Form sviluppato e risulta utile nel caso si voglia riportare lo stesso in posizione centrale, oppure ancora quando si voglia far eseguire qualche corsa al cilindro, prima di avviare l'algoritmo di controllo, per ridurre il fenomeno dell'incollaggio delle guarnizioni.
La funzione viene eseguita all'attivazione del bit $M4.1$. Al suo interno le valvole vengono comandate a coppie secondo i valori presenti nelle variabili OUT_SPEED e IN_SPEED, che determinano rispettivamente la tensione inviata ai driver che gestiscono la fase di fuoriuscita dello stelo e a quelli che intervengono nella fase di rientro. I valori di OUT_SPEED e IN_SPEED vengono inviati dall'applicazione P.I.P Control in funzione della configurazione attiva.

4.1.9 Blocco FC Inizializzazione Sistema

Il procedimento di inizializzazione del sistema viene avviato all'interno del *Main* quando il bit $M4.4$ assume valore 1. Come detto nella Sezione 2.5 la procedura è stata pensata per garantire l'avvio del controllo in condizioni di sicurezza.
Nel primo segmento si calcola la posizione del carrello, posta pari a zero quando lo stelo è completamente rientrato. Quando la stessa risulta inferiore a 8 mm o superiore a 492 mm, il secondo ramo si attiva e vengono eseguite le seguenti operazioni: disattivazione delle valvole, attivazione del bit $M4.0$, che da il via ai controllori PID, ed infine disattivazione di $M4.4$ in modo tale che al ciclo di scansione successivo la procedura di inizializzazione appena terminata non venga eseguita. Nel caso in cui il carrello non si trovi a fine corsa si attiva invece il terzo ramo, nel quale viene letta l'inclinazione dell'asta del pendolo, e, in base ad essa, vengono inviati opportuni comandi alle valvole. Nello specifico lo scopo è quello di portare lentamente il carrello al fine corsa appropriato, in modo che una volta avviato l'algoritmo di controllo non si abbiano movimenti improvvisi dello stesso. Il movimento lento è garantito dal ridotto valore di tensione inviato al driver delle valvole: 16000 corrisponde a 5.8 V; mentre la coppia di valvole da alimentare è definita, come detto, dall'angolo dell'asta: il carrello viene mosso in modo tale che, una volta giunto a fine corsa, l'asta penda lontano dal centro della guida. In questa configurazione, una volta attivati i controllori PID, il carrello viene spinto contro il finecorsa già raggiunto e non si osservano quindi movimenti. E' a questo punto possibile riportare la slitta verso il centro inclinando l'asta del pendolo in tale direzione.

4.1.10 Blocco FC Reset PID Prima Scansione

Il blocco in questione viene attivato una volta durante il primo ciclo di scansione, ed ha l'unico scopo di inizializzare le variabili di servizio utilizzate per l'aggiornamento dei parametri dei due controllori PID. L'operazione di inizializzazione, effettuata nel primo e nel secondo ramo mediante le istruzioni *MOVE*, viene eseguita per motivi di sicurezza e nelle variabili in questione vengono salvati i valori correnti dei coefficienti delle due reti PID.

4.1.11 Blocco FC Stop Sistema

La procedura *"Stop Sistema"* viene attivata ogni volta che si effettua la disconnessione tramite l'applicazione P.I.P. Control, o quando si disattiva il selettore bistabile del dispositivo di controllo manuale. A livello di codice, la condizione necessaria e sufficiente per l'avvio del presente blocco coincide con l'attivazione del bit $M4.7$, chiamato appunto "STOP". La funzione consiste di tre segmenti. Nel primo vengono disattivati i bit di consenso relativi ai generatori d'onda, all'algoritmo di controllo e alla funzione di gestione manuale del banco di prova. Nel secondo vengono disattivate le valvole ed infine nel terzo si disattiva il bit $M4.7$, così che la presente funzione venga eseguita una sola volta.

4.1.12 Blocco FC Taratura Zero Angolo Theta

Per rendere il più semplice possibile l'utilizzo del banco si è introdotta la possibilità di effettuare la taratura dello zero del sensore angolare in modo intuitivo mediante applicazione P.I.P. Control, senza bisogno di operare tramite TIA Portal. La procedura consiste nell'attivare il controllo manuale del banco di prova, posizionare l'asta in posizione verticale ed infine premere il pulsante "AZZERA" dell'interfaccia grafica. Alla pressione coincide

l'attivazione del bit $M4.3$ e la conseguente esecuzione della presente funzione.
Nel primo segmento si realizza la lettura dell'angolo dell'asta, dove l'arrotondamento permette di ottenere una lettura più stabile. Tale valore diventa il nuovo riferimento di zero per l'angolo θ e viene sovrascritto a quello precedente nella variabile *THETA_ZERO*. L'ultimo segmento, in modo analogo a quanto accade in altre funzioni, resetta il bit di attivazione della funzione in modo che la stessa non venga richiamata al ciclo di scansione successivo.

4.2 Struttura del controllore PID Compact

Il controllore PID disponibile all'interno del TIA Portal prende, come detto, il nome di *PID Compact*.
La legge di controllo impiegata al suo interno ha la seguente struttura:

$$C_{PID} = K_p \left[(w_p x_{SET} - x_{FB}) + \frac{1}{T_i s} (x_{SET} - x_{FB}) + \frac{T_d s}{\tau T_d s + 1} (w_d x_{SET} - x_{FB}) \right]$$

Nella quale x_{SET} e X_{FB} indicano un generico segnale di riferimento e il corrispondente *feedback* proveniente dal trasduttore.
Essa è molto simile a quella di un controllore PID classico nella forma a costanti di tempo, se non fosse per i due coefficienti w_p e w_d, che prendono rispettivamente il nome di "coefficiente di ponderazione della parte proporzionale" e "coefficiente di ponderazione della parte derivativa". Lo scopo di w_p e w_d, che assumono valori nell'intervallo $0 \div 1$, è quello di escludere o far intervenire in maniera limitata le componenti proporzionale e derivativa nel caso in cui l'errore in ingresso al controllore sia dovuto ad una variazione del riferimento e non della variabile di processo.
Per avere corrispondenza con le simulazioni, questi coefficienti sono posti pari a uno. La legge di controllo diventa quindi la seguente:

$$C_{PID} = K_p \left[(x_{SET} - x_{FB}) + \frac{1}{T_i s} (x_{SET} - x_{FB}) + \frac{T_d s}{\tau T_d s + 1} (x_{SET} - x_{FB}) \right]$$

E' stato così possibile determinare l'equivalenza tra la forma implementata all'interno del PLC Siemens e quella classica che utilizza k_p, k_i, k_d e T_f. Le formule di conversione sono le seguenti:

$$K_p = k_p$$

$$T_i = \frac{k_p}{k_i}$$

$$T_d = \frac{k_d}{k_p}$$

$$\tau = \frac{T_f}{T_d}$$

Grazie ad esse è possibile testare sul banco di prova le stesse leggi di controllo trovate nel capitolo precedente ed ottenere un confronto diretto dei risultati derivanti. Inoltre, come già accennato nella Sezione 2.5, per rendere più semplice la conversione tra una forma e l'altra si è introdotta all'interno dell'applicazione P.I.P. Control la possibilità di scegliere quale forma impiegare. In questo modo è l'applicazione stessa ad eseguire la conversione, se necessario, prima di inviare i parametri aggiornati al PLC.

Capitolo 5

Risultati Sperimentali

Le prove sperimentali sono state eseguite allo scopo di raccogliere dati da confrontare con i risultati predetti dai modelli realizzati in Matlab e LMS Amesim, nonché per approfondire e comprendere meglio le potenzialità del banco di prova.

Ciascun test è stato eseguito a partire da condizioni stazionarie, con il carrello posizionato a metà corsa, fatta eccezione per le prove di risposta a gradino in quanto, data l'ampiezza della variazione, la corsa sarebbe risultata insufficiente.
In tutte le prove il salvataggio dei dati è avvenuto mediante l'apposito strumento disponibile all'interno del software TIA Portal, il quale concede di memorizzare i valori assunti dalle variabili di interesse, che vengono via via trasmessi dal PLC al PC mediante cavo di rete. Il periodo di campionamento minimo è pari ad un ciclo di scansione e risulta quindi non inferiore al millisecondo. Data però la ridotta banda passante del sistema in esame non si sono registrati problemi o artefatti dovuti alla bassa frequenza di acquisizione. Un altro aspetto emerso durante le prove è stata la necessità di limitare il numero di variabili acquisite. Queste vengono infatti salvate in una zona di memoria dedicata che funziona da *buffer*. Al crescere del numero di segnali registrati decresce quindi il numero massimo di campioni per ciascuno di essi, ed in definitiva la durata della registrazione. Data questa limitazione non è stato possibile acquisire più di cinque variabili contemporaneamente, senza che la breve durata della prova impedisse l'esaurimento del transitorio da parte del sistema.

Nella presente sezione, dopo aver brevemente ripercorso la fase iniziale di scelta dei parametri dei due compensatori PID utilizzati nel PLC, si riportano i risultati sperimentali delle diverse prove effettuate con una loro breve analisi. La sezione si conclude con il confronto tra i risultati di cui sopra e quelli ottenuti dai modelli precedentemente sviluppati in Matlab ed Amesim.

5.1 Ottimizzazione sperimentale dei controllori PID

Il primo passo verso la stabilizzazione del sistema reale è stato quello di utilizzare i controllori PID ricavati nel modello non lineare realizzato in Amesim, tenendo conto del fatto che alcuni aspetti quali l'attrito coulombiano e l'attrito alla cerniera del pendolo non sono stati simulati.
Il sistema è risultato instabile, come mostrato in Figura 5.1, ma fin da subito si sono ottenuti risultati promettenti. Semplicemente portando il coefficiente k_i dell'anello interno da 8 a 12 si è ottenuta la stabilizzazione dell'angolo, ma con ampie oscillazioni da parte del carrello come mostrato in Figura 5.2.

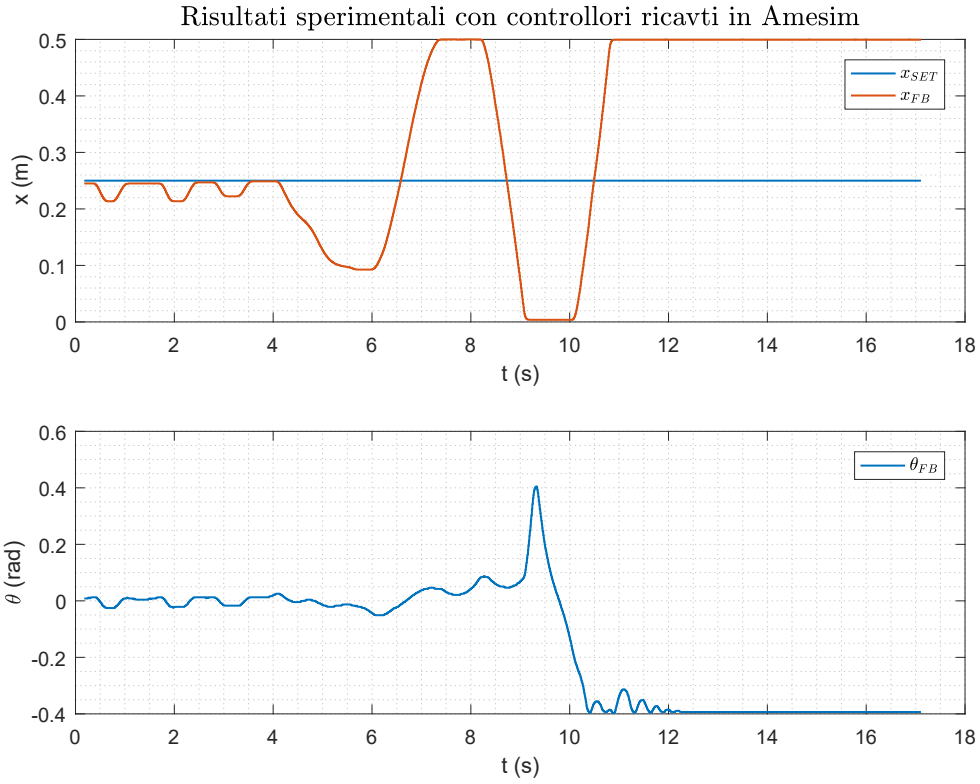


Figura 5.1: Risultati prova sperimentale con controllori ricavati in Amesim

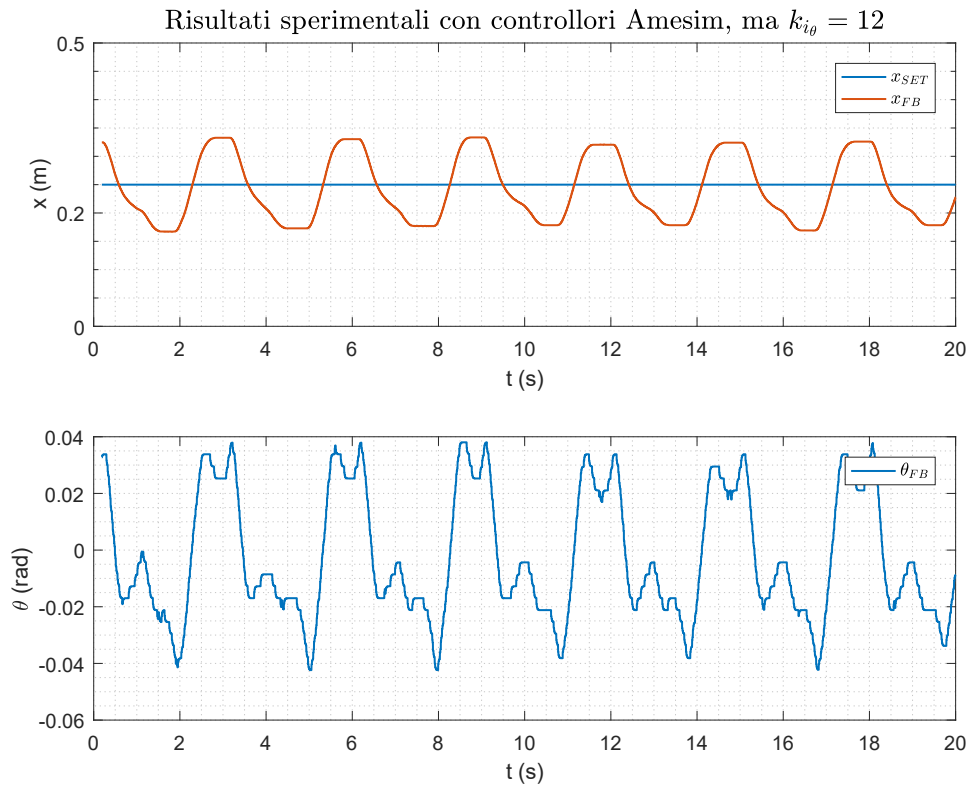


Figura 5.2: Risultati prova sperimentale con controllori ricavati in Amesim, ma $k_{i_\theta} = 12.0$

Per verificare la stabilità si sono eseguite anche una prova di risposta a gradino ed una di inseguimento di un riferimento sinusoidale. I risultati sono riportati nelle figure sottostanti.

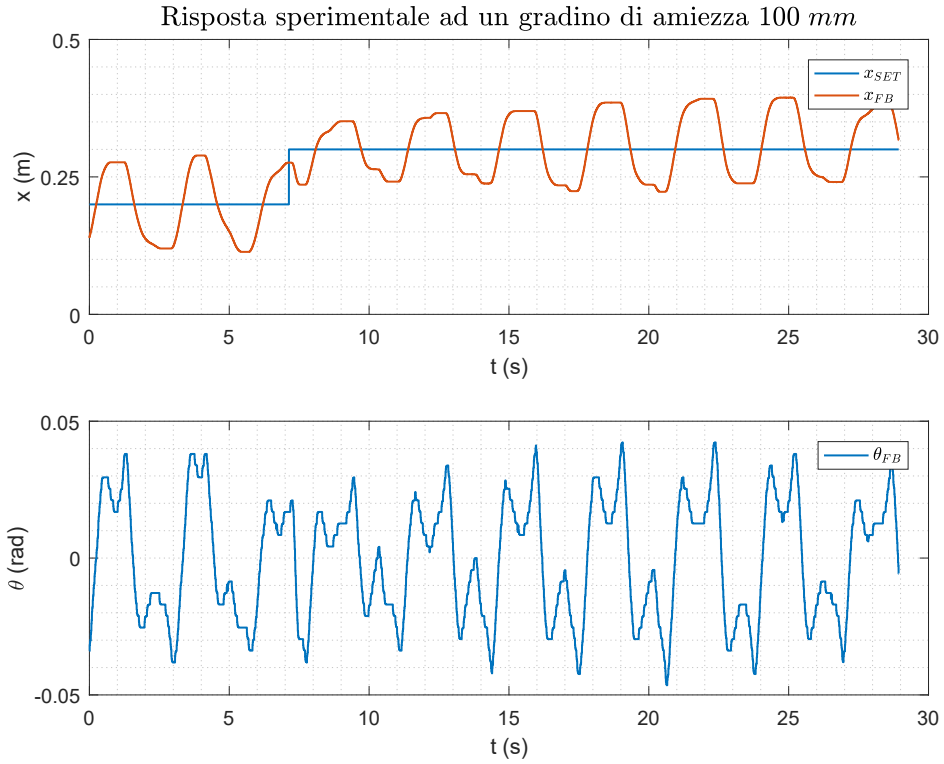


Figura 5.3: Prova di risposta ad un gradino di ampiezza pari a 100 mm

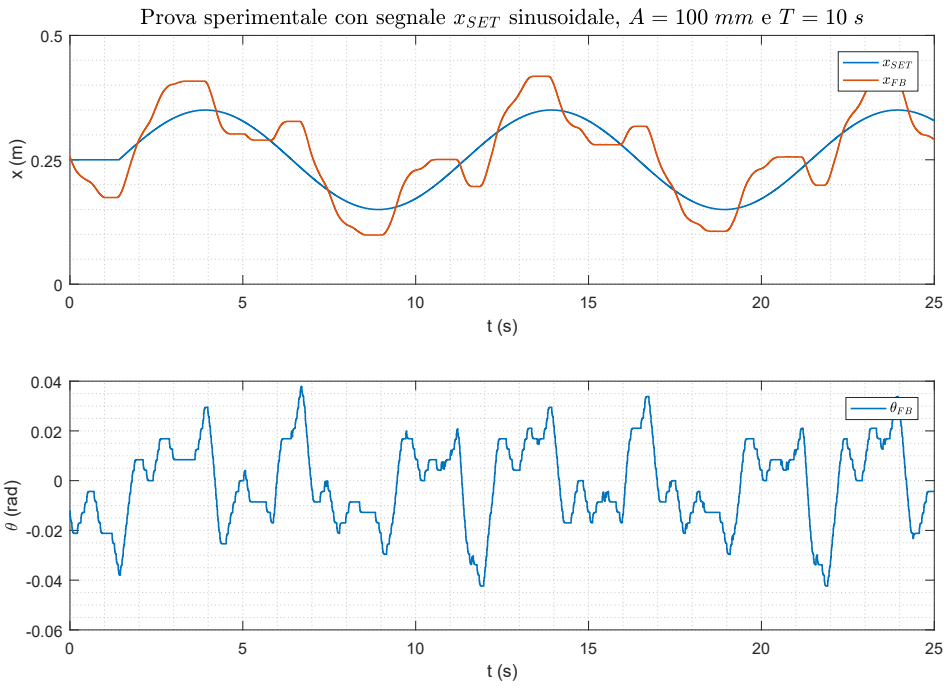


Figura 5.4: Risultati sperimentali con segnale x_{SET} sinusoidale, $A = 100\ mm$ e $T = 10\ s$

Dopo alcune prove di taratura si è giunti ai seguenti controllori:

$$C_x = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{\tau T_d s + 1}\right) = 0.045 \left(1 + \frac{1}{5.0s} + \frac{2.0s}{0.09s + 1}\right)$$

$$C_\theta = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{\tau T_d s + 1}\right) = 7.735 \left(1 + \frac{1}{0.319s} + \frac{0.0646s}{0.00091s + 1}\right)$$

Che nella forma standard diventano:

$$C_x = k_p + \frac{k_i}{s} + \frac{k_d s}{T_f s + 1} = 0.045 + \frac{0.009}{s} + \frac{0.09s}{0.09s + 1}$$

$$C_\theta = k_p + \frac{k_i}{s} + \frac{k_d s}{T_f s + 1} = 7.735 + \frac{24.2}{s} + \frac{0.5s}{0.00091s + 1}$$

La taratura è stata eseguita, tenendo presenti i valori trovati nei modelli, spegnendo il controllo della posizione del carrello e dedicandosi alla stabilizzazione dell'angolo dell'asta. Solo una volta ottenuto tale obiettivo si è passati alla taratura dell'anello esterno. La stabilizzazione dell'anello interno si considera conclusa quando, partendo con il pendolo in posizione prossima alla verticale, si osserva un moto uniforme del carrello verso uno dei finecorsa. Se lo squilibrio iniziale non è eccessivo, la base dovrebbe muoversi ad una velocità tale da mantenere circa invariato l'angolo dell'asta.
Si sono infine utilizzati i risultati delle prove sperimentali per modificare leggermente i parametri al fine di ottimizzare il funzionamento.

5.2 Prove Sperimentali

Le prove sperimentali sono di seguito suddivise in funzione del tipo di *setpoint* fornito all'anello esterno di controllo, ovvero a quello che si occupa del controllo posizione del carrello. Si sono eseguite prove con *set* a gradino, ad onda quadra e ad onda sinusoidale, facendo variare la lunghezza dell'asta del pendolo e la massa dello stesso per valutare l'effetto di tali parametri. L'ultima parte della presente sezione è invece dedicata all'analisi della risposta in presenza di disturbi esterni di tipo impulsivo sul carrello e sulla massa posta all'estremità del pendolo.

5.2.1 Inseguimento di segnale a gradino

La prima prova riportata riguarda un segnale x_{SET} a gradino con ampiezza della variazione di 200 mm. La lunghezza dell'asta è pari a 550 mm ed la massa utilizzata vale 0.180 kg. In questa come nelle prove successive il carrello è stato portato nella posizione $x = 100$ mm e, dopo aver atteso una decina di secondi per garantire la conclusione del transitorio, si è imposta la variazione del *setpoint*. Lo spostamento iniziale risulta necessario in quanto l'ampiezza della variazione, a cui bisogna ancora sommare la sovraelongazione della risposta, non è compatibile con una partenza dalla posizione centrale.

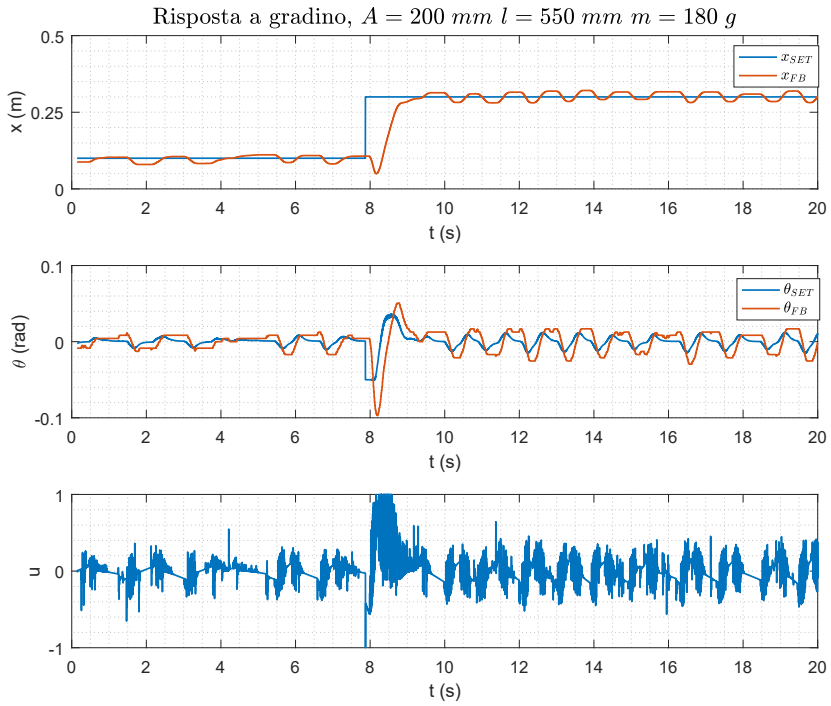


Figura 5.5: Risposta a gradino, $A = 200\ mm$, $l = 550\ mm$ e $m = 180\ g$

Il tempo di salita è di circa 1.55 s, mentre la sovraelongazione è pari a 13 mm.
La stessa prova è stata eseguita anche con una lunghezza l del pendolo pari a 400 mm e massa invariata, e con lunghezza invariata e massa pari a circa $1; kg$. I risultati sono di seguito riportati.

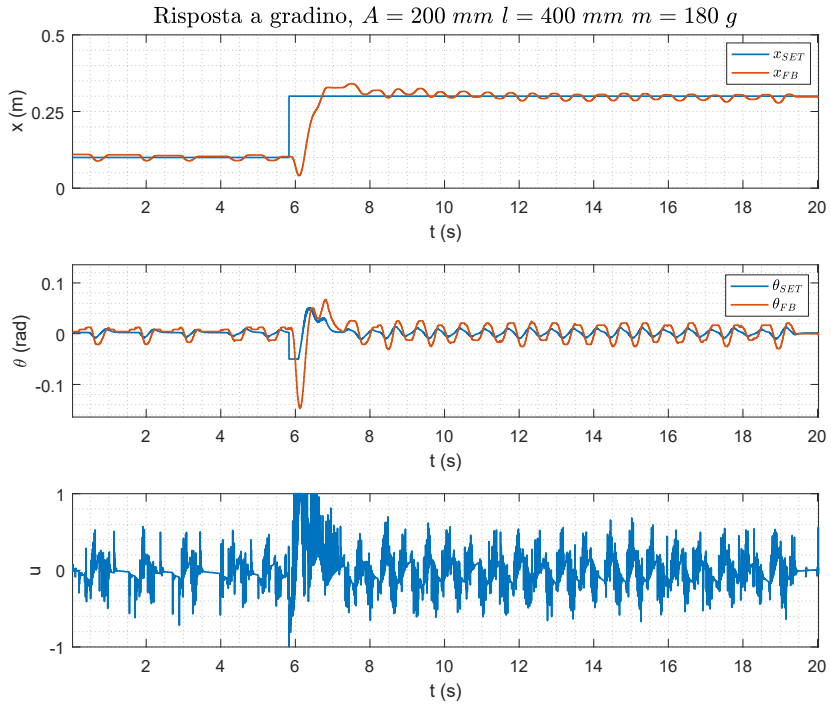


Figura 5.6: Risposta a gradino, $A = 200\ mm$, $l = 400\ mm$ e $m = 180\ g$

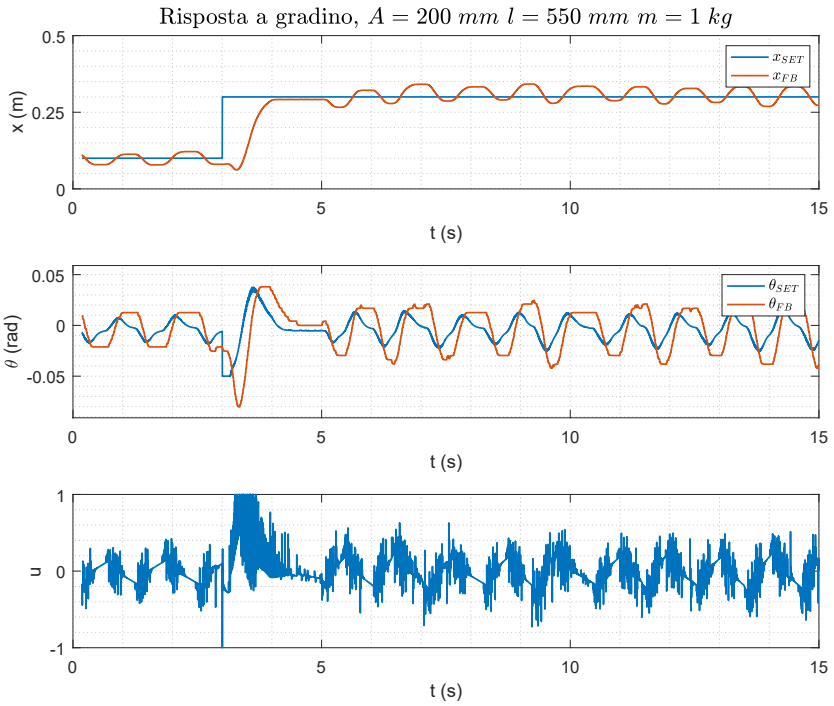


Figura 5.7: Risposta a gradino, $A = 200\ mm$, $l = 550\ mm$ e $m = 1\ kg$

Confrontando i risultati ottenuti si può notare come al diminuire della lunghezza dell'asta il tempo di salita si sia ridotto, 0.95 s contro 1.55 s, ma sia aumentata la sovraelongazione, in questo caso pari a 40 mm, così come il tempo di assestamento e l'oscillazione dell'asta attorno alla posizione di equilibrio. Al contrario, aumentando la massa concentrata del pendolo il tempo di salita cresce leggermente, ma il sistema risulta più stabile, con l'oscillazione del pendolo ridotta, in particolar modo nella fase del transitorio iniziale. In tutti i casi è possibile vedere che il carrello non rimane mai fermo, ma oscilla continuamente intorno al riferimento. Questo comportamento, che non è stato possibile eliminare, è probabilmente da attribuirsi all'attrito Coulombiano, di cui non si è tenuto conto nei modelli. Un'ulteriore motivazione è probabilmente da ricercarsi nel fatto che le valvole vengano comandate a coppie e, come accennato nel Capitolo 4, vengano mantenute continuamente in regolazione. Data la differente superficie di influenza delle facce del pistone, sarebbe invece meglio differenziare i comandi per ottenere più facilmente una situazione di equilibrio stabile. Per contro, non mantenere le valvole in regolazione, di fatto annullando il flusso d'aria in ingresso alle camere, comporta un netto peggioramento del comportamento del sistema, che risulta meno pronto nella risposta.

5.2.2 Inseguimento di segnale ad onda quadra

Di seguito vengono presentate due prove di inseguimento di un segnale ad onda quadra. In entrambe l'ampiezza dell'onda è pari a 100 mm, 200 mm picco-picco. La lunghezza dell'asta è pari a 550 mm, mentre la massa è di 180 g.

Nel primo caso il sistema arriva quasi a regime, esaurendo la fase di assestamento, prima che il valore di x_{SET} cambi nuovamente. Lo stesso non accade invece nel secondo caso. Il periodo di 2.5 s dell'onda quadra fa si che il carrello raggiunga a malapena il nuovo riferimento prima che lo stesso vari. Non si nota ancora attenuazione nella risposta del sistema, così come non sembra peggiorare il controllo dell'angolo del pendolo.

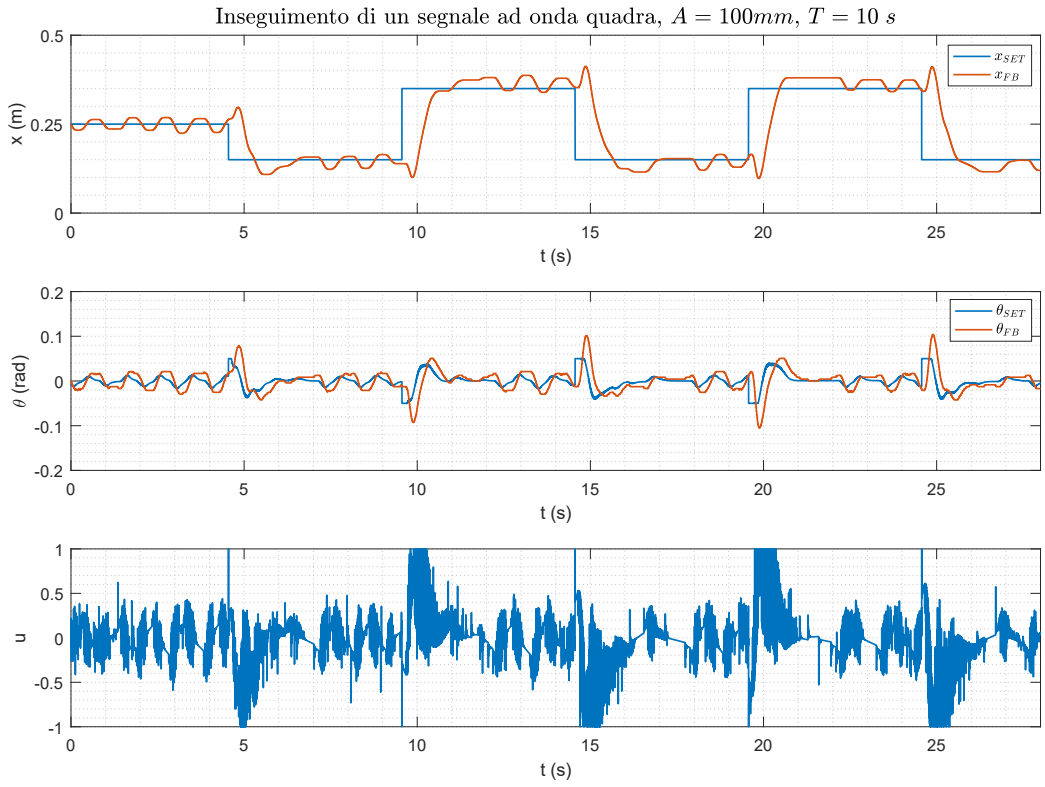


Figura 5.8: Inseguimento di onda quadra, $A = 100\ mm$, $T = 10\ s$

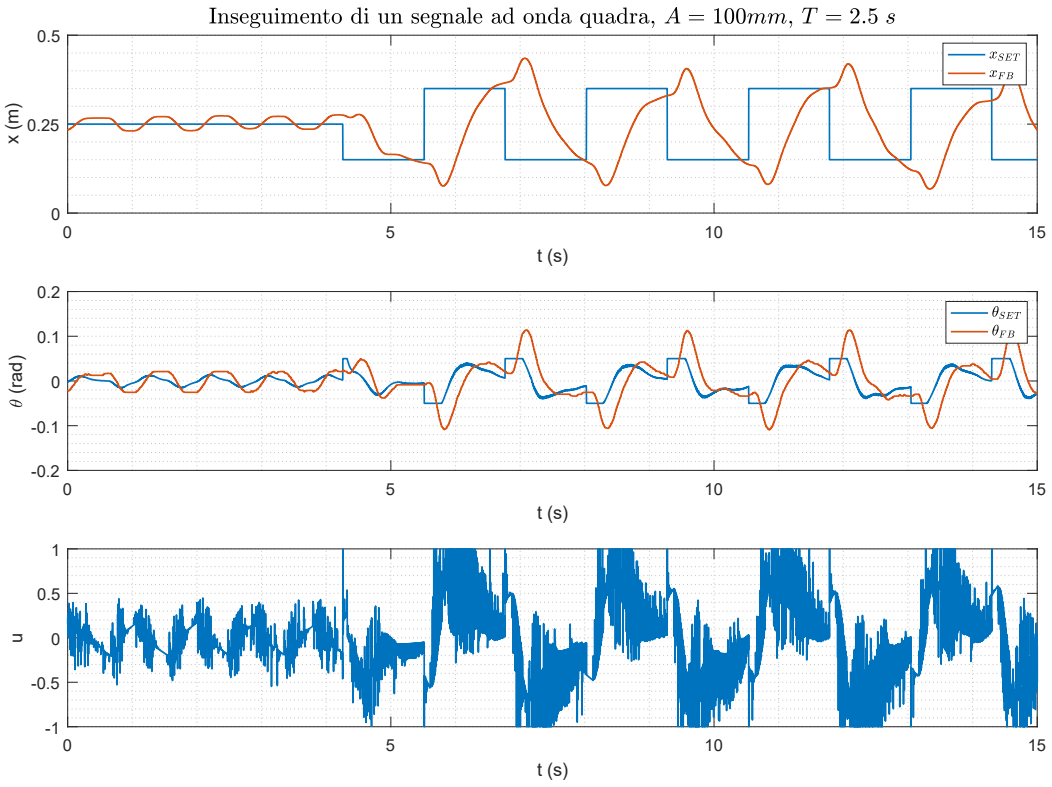


Figura 5.9: Inseguimento di onda quadra, $A = 100\ mm$, $T = 2.5\ s$

Osservando il terzo grafico delle due figure, che riporta il comando normalizzato per i driver in uscita dal secondo PID, si può vedere che nel secondo caso questo satura più spesso, determinando una maggiore non linearità nella risposta del sistema.

5.2.3 Inseguimento di segnale ad onda sinusoidale

Le prove di inseguimento di segnali sinusoidali permettono di osservare facilmente il fenomeno dello sfasamento che aumenta all'aumentare della frequenza di variazione del *setpoint*. Al raggiungimento del valore critico $-180°$, a meno che la risposta del sistema non sia ormai sufficientemente attenuata, questo diventa instabile.

Nel seguito si riportano due prove effettuate con una lunghezza dell'asta pari a 550 mm ed una massa concentrata di 180 g. La Figura 5.10 riporta i risultati registrati con un'ampiezza $A = 100\ mm$ e un periodo $T = 10\ s$.
Durante l'inseguimento l'angolo dell'asta non supera mai il valore di 0.034 rad, ovvero 1.95°. Per quanto riguarda il carrello, questo riesce a seguire il riferimento con uno sfasamento di 13.87°. Tale risultato, seppur soddisfacente, evidenzia come si sia già superata la banda passante del sistema per quanto riguarda il posizionamento del carrello. In effetti ad un periodo di 10 s corrisponde una pulsazione ω pari a 0.6 $\frac{rad}{s}$, quindi prossima alla massima banda passante di 1 $\frac{rad}{s}$ ottenibile durante la modellazione effettuata in Matlab. Purtroppo non è stato possibile eseguire prove con un periodo dell'onda sinusoidale significativamente maggiore, per le limitazioni relative memoria interna del PLC di cui si è discusso. Il massimo periodo registrabile è stato di 20 s ed in tal caso lo sfasamento si riduce a 8.43°.

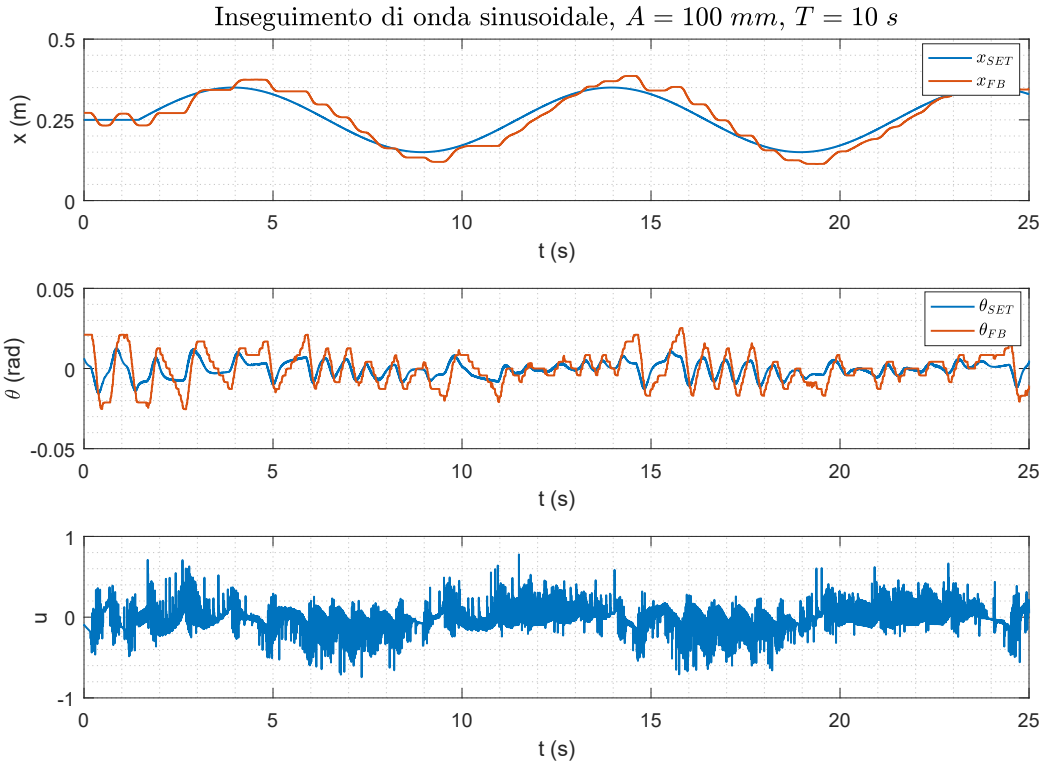


Figura 5.10: Inseguimento di onda sinusoidale, $A = 100\ mm$, $T = 10\ s$

La figura seguente riporta invece una prova eseguita a parità di condizioni rispetto a quella precedente, ma con un periodo $T = 2.5\ s$.

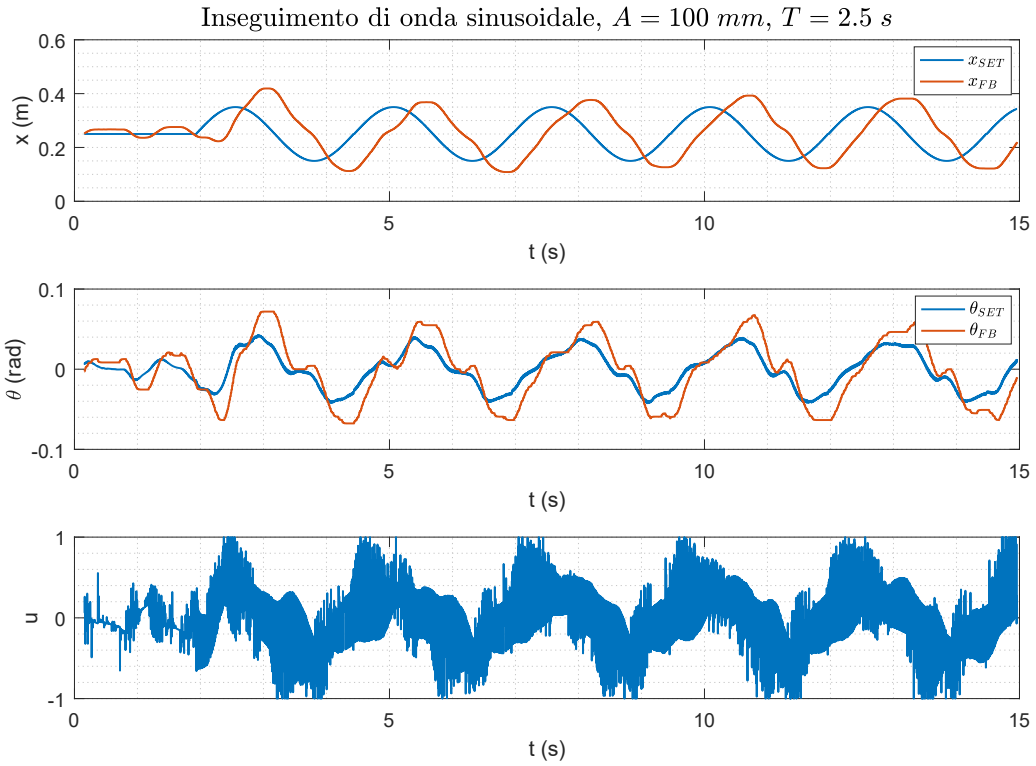


Figura 5.11: Inseguimento di onda sinusoidale, $A = 100\ mm$, $T = 2.5\ s$

Pur avendo superato ampiamente la banda passante del sistema, non si nota attenuamento della risposta. Lo sfasamento è invece cresciuto molto ed è in questo caso pari a 78.3°. Osservando il terzo grafico di Figura 5.11 si nota inoltre che anche l'attività sul comando, coincidente con l'uscita dal secondo compensatore, è cresciuta ed arriva a saturazione.

L'ultima prova presentata in questa sezione riguarda un'onda di ampiezza pari a 100 mm e periodo 10 s, come la prima analizzata, ma in questo caso la lunghezza dell'asta del pendolo è stata ridotta a 400 mm. Osservando la successiva Figura 5.12 e confrontandola con Figura 5.10 si può osservare un movimento del carrello con oscillazioni più frequenti nell'intorno del riferimento istantaneo. Lo stesso si può dire per θ, ovvero per l'inclinazione dell'asta del pendolo. Il sistema risulta in definitiva meno stabile, cosa confermata anche dallo sfasamento tra riferimento e *feedback* della posizione x, che diventa di 22.5° contro i 13.87° registrati nella prima prova, quando si aveva $l = 550\ mm$.
Dai risultati ottenuti con riferimenti a gradino e onda quadra, ed ora con andamento sinusoidale si può quindi concludere che un accorciamento dell'asta comporta una riduzione dei margini di stabilità del sistema.

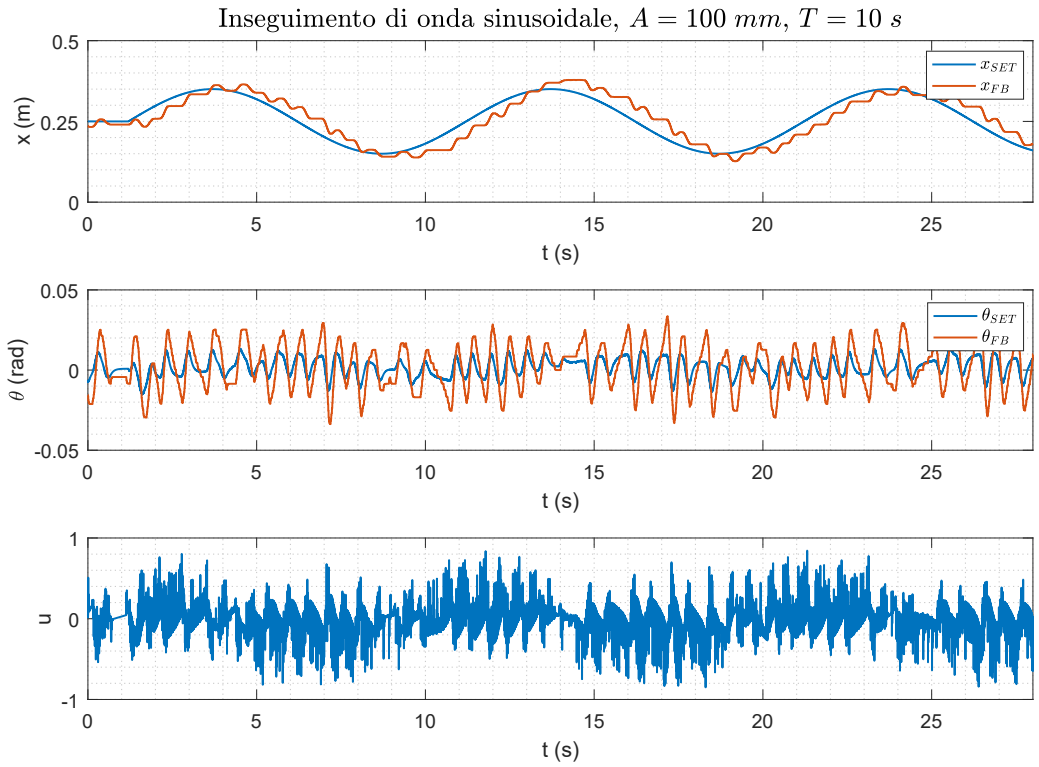


Figura 5.12: Inseguimento di onda sinusoidale, $A = 100\ mm$, $T = 10\ s$

5.2.4 Risposta a disturbi esterni impulsivi

Le ultime prove condotte riguardano la risposta ai disturbi esterni sul carrello e sulla massa concentrata. I disturbi, di tipo impulsivo, sono stati impartiti manualmente e non si hanno quindi dati riguardanti l'intensità degli stessi. L'analisi non potrà che essere di tipo puramente qualitativo. L'interesse verso queste prove è rivolto all'osservazione della risposta del sistema nei due casi ed al variare dei parametri delle reti di compensazione.

Nuovamente si fa riferimento alla condizione base che vede $l = 550\ mm$ e $m = 180\ g$. Nella prima prova, Figura 5.13 si sono impartiti due impulsi al carrello, in direzioni opposte ed attendendo tra l'uno e l'altro che il sistema esaurisse il transitorio. Nella seconda invece, Figura 5.14, si è disturbato il pendolo colpendo molto leggermente la massa posta alla sua estremità.
Da subito risulta evidente come il sistema sia molto più robusto ai disturbi al carrello rispetto a quelli che riguardano il pendolo. Due sono i motivi. In primo luogo piccoli impulsi alla massa concentrata comportano comunque inclinazioni rilevanti per via del braccio, costituito dall'asta del pendolo, che la forza ha rispetto alla cerniera. In secondo luogo un impulso esterno al carrello comporta una compressione "passiva" del gas in una delle camere ed un'espansione nell'altra: si genera così un fenomeno di molla di gas che compensa automaticamente il disturbo, senza che il controllore debba intervenire. Basti osservare le due figure: nel secondo caso, con un'inclinazione di picco dell'asta di $0.05\ rad$, pari a metà di quella che si raggiunge nel primo, il carrello è costretto a compiere un movimento di circa $180\ mm$ per compensare il disturbo, non potendo contare sulla reazione spontanea del gas nelle camere.

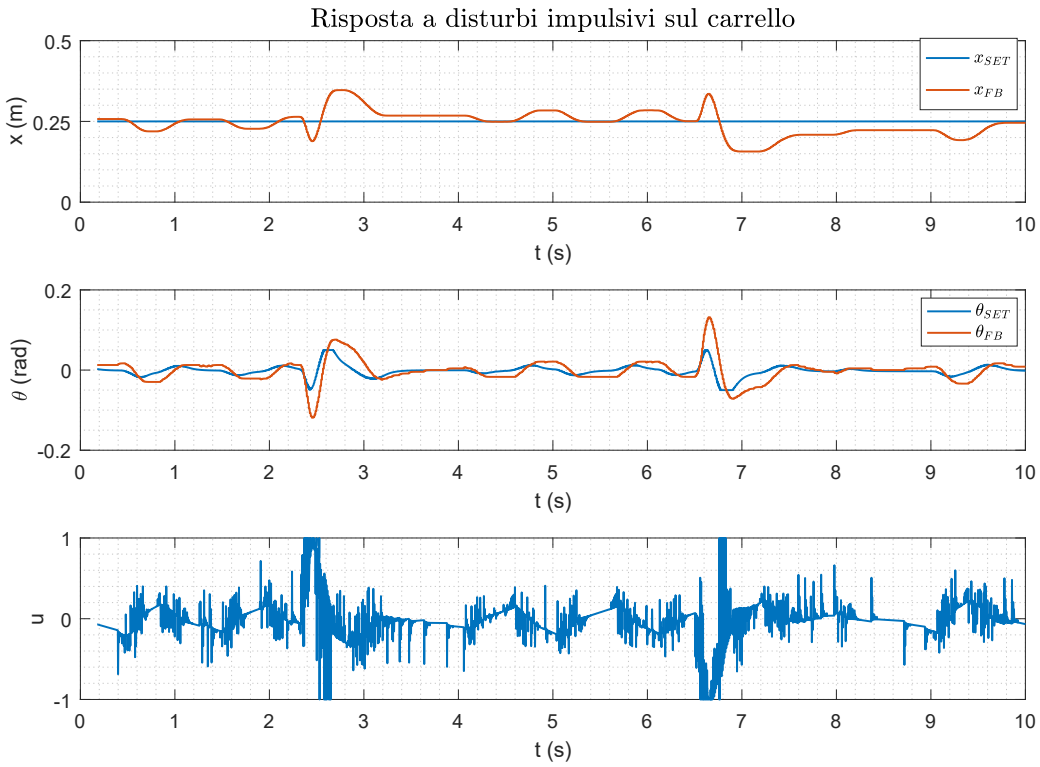


Figura 5.13: Risposta a disturbi impulsivi sul carrello con $l = 550\ mm$ e $m = 180\ g$

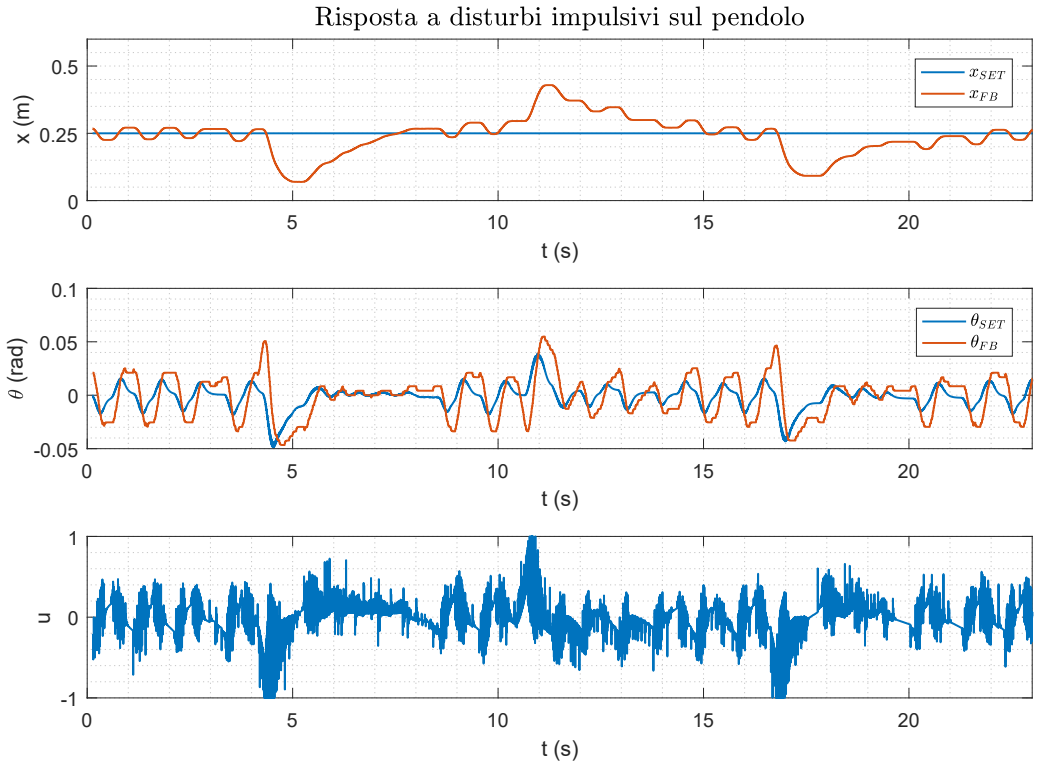


Figura 5.14: Risposta a disturbi impulsivi sul pendolo con $l = 550\ mm$ e $m = 180\ g$

Nelle figure seguenti, a titolo di paragone, si riportano i risultati ottenuti con una lunghezza dell'asta ridotta a 400 mm, Figura 5.15, e con una massa concentrata di 570 g, Figura 5.16.

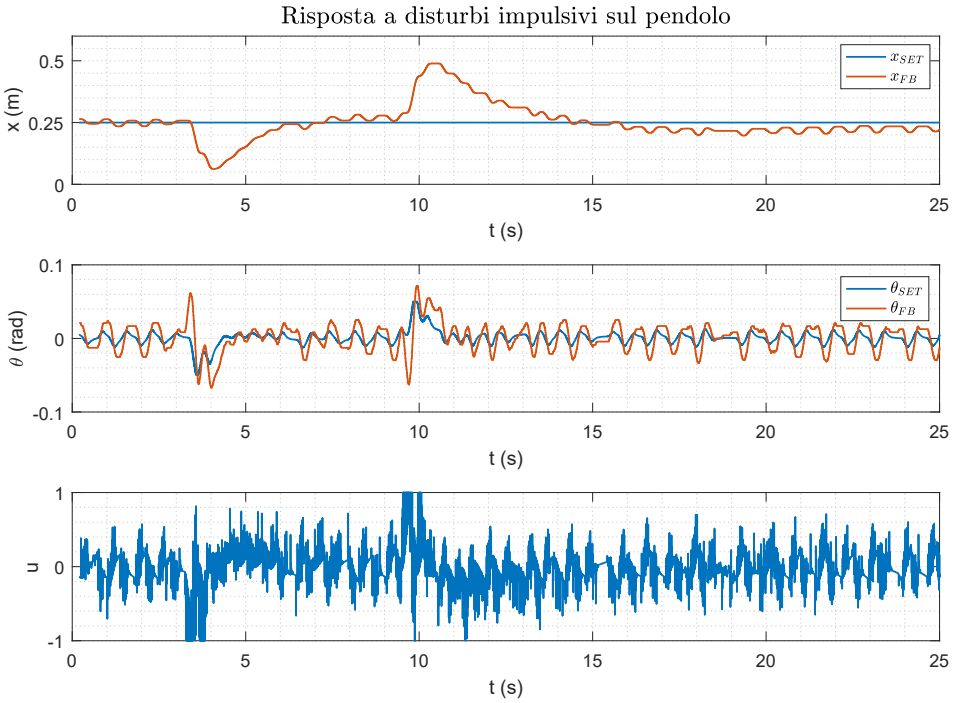


Figura 5.15: Risposta a disturbi impulsivi sul pendolo con $l = 400\ mm$ e $m = 180\ g$

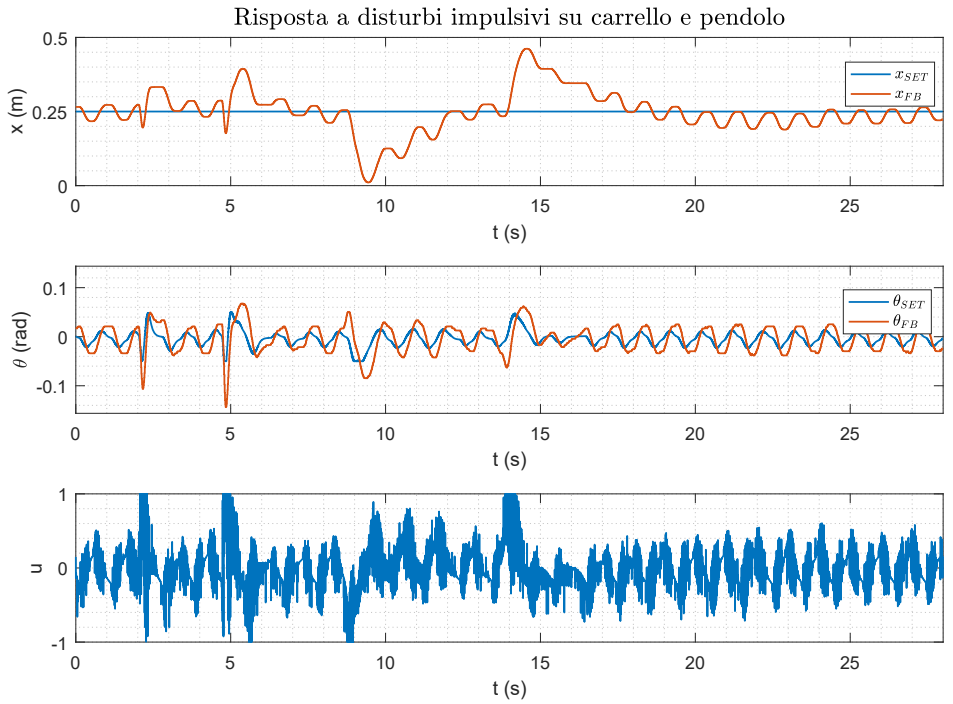


Figura 5.16: Risposta a disturbi impulsivi con $l = 550\ mm$ e $m = 570\ g$

Nel primo caso la prova riguarda disturbi impulsivi impartiti al pendolo. Risulta evidente dal confronto con Figura 5.14 che, a parità di inclinazione del pendolo a seguito della perturbazione, il movimento del carrello necessario è maggiore. Anche l'attività sul comando risulta cresciuta, come già notato nelle precedenti prove.
Nel secondo caso si sono impartiti da prima due disturbi al carrello e successivamente due impulsi al pendolo.

Un'ultima prova è stata condotta aumentando la componente derivativa del compensatore C_θ, per rendere più pronto il sistema nella risposta ai disturbi. La figura seguente mostra come un aumento troppo accentuato, $kd = 1.2$, porti ad un peggioramento del comportamento, con oscillazioni prolungate dopo le perturbazioni, in questo caso una al carrello e successivamente una al pendolo.

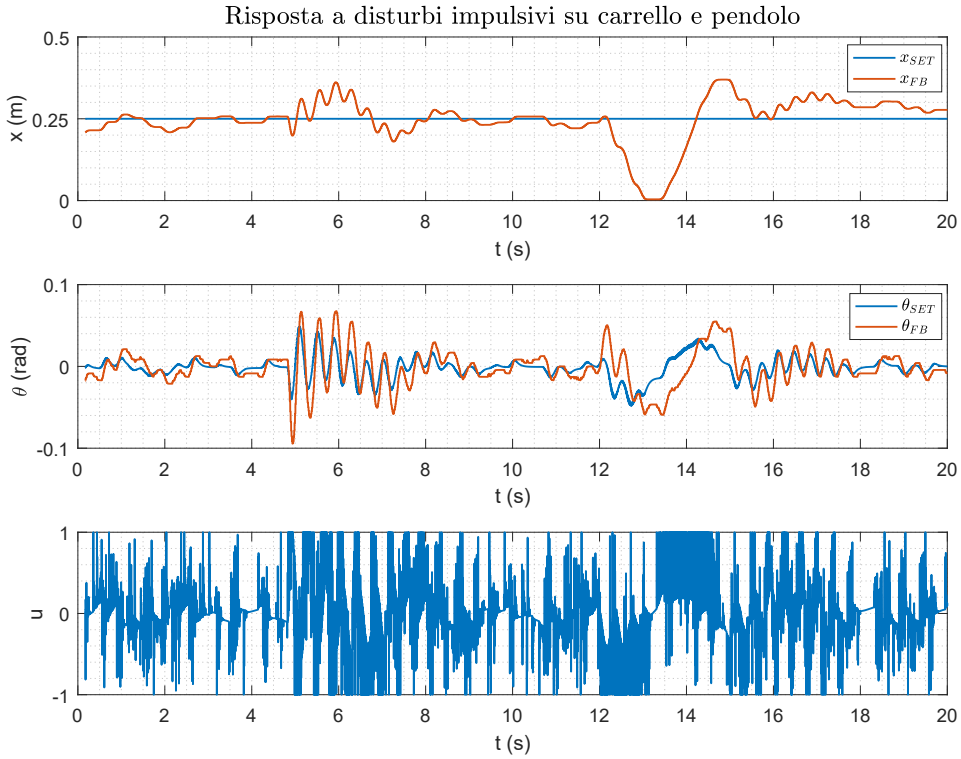


Figura 5.17: Risposta a disturbi impulsivi con $l = 550\ mm$, $m = 180\ g$ e $k_{d\theta} = 1.2$

Come si evince da tutti i risultati finora riportati, il massimo impulso sul pendolo sopportabile dal sistema è, in termini di intensità, quello che porta ad un angolo θ di circa $0.06\ rad$, ovvero $3.44°$. Se il disturbo esterno genera un'inclinazione superiore, il carrello giunge a fine corsa e la compensazione fallisce.

5.3 Confronto tra le prove sperimentali ed i risultati simulati

A conclusione di questa parte dell'elaborato si riportano alcuni confronti, a parità di parametri, tra le simulazioni realizzate in Matlab ed Amesim, utilizzando i rispettivi modelli, e le prove sperimentali eseguite sul banco di prova.
In Matlab l'esecuzione delle prove è avvenuta creando un semplice schema Simulink, riportato in Figura 5.18, in cui sono state impiegate le funzioni di trasferimento ed i controllori calcolati in precedenza.

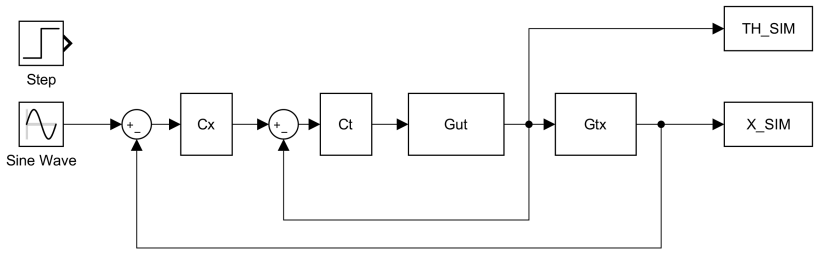


Figura 5.18: Modello simulink impiegato per i test in Matlab

Il primo confronto viene realizzato sovrapponendo le risposte ad una variazione a gradino del segnale x_{SET} di ampiezza pari a 100 mm. Per i due modelli i parametri utilizzati sono quelli riportati in Tabella 3.1. Per il pendolo si ha quindi $l = 500$ mm e $m = 500$ g. Si è quindi cercato nella realtà di riprodurre tali condizioni con $l = 500mm$ e $m = 570$ g. Come visibile in Figura 5.19 i comportamenti risultano piuttosto simili durante il transitorio, sopratutto tra le simulazioni. Si nota che la curva viola, corrispondente alla simulazione in Amesim, presenta un tempo di salita leggermente inferiore rispetto a quella verde, ottenuta in Matlab/Simulink, ed una sovraelongazione maggiore. La più veloce in termini di tempo di salita risulta essere la curva rossa, quella sperimentale, con una sovraelongazione paragonabile a quella della curva viola. Anche in termini di sottoelongazione iniziale il modello Amesim e i risultati sperimentali si equivalgono, e risultano entrambe leggermente maggiori, 1 cm, di quella prevista da Matlab. La discrepanza maggiore tra i risultati simulati e quelli sperimentali riguarda però il comportamento a regime. Mentre nei primi due casi le oscillazioni del carrello scompaiono del tutto o quasi, nella realtà il carrello ha oscillazioni continue, la cui ampiezza raggiunge i 3 cm. Una possibile spiegazione per tale fenomeno è stata presentata nelle sezioni precedenti.
Le differenze maggiori si riscontrano nel secondo grafico, che riporta l'andamento dell'angolo dell'asta nei tre casi. Le oscillazioni rilevate sperimentalmente risultano più grandi di quelle previste dalle simulazioni, in particolare a regime, dove la curva viola ne prevede di piccolissime, mentre in Matlab, curva verde, scompaiono del tutto. L'andamento sperimentale può essere giustificato pensando al fatto che l'oscillazione del carrello comporta inevitabilmente un'oscillazione permanente anche dell'angolo dell'asta. Anche sovrapponendo le curve risulta però difficile osservare se la seconda sia effetto o causa della prima.

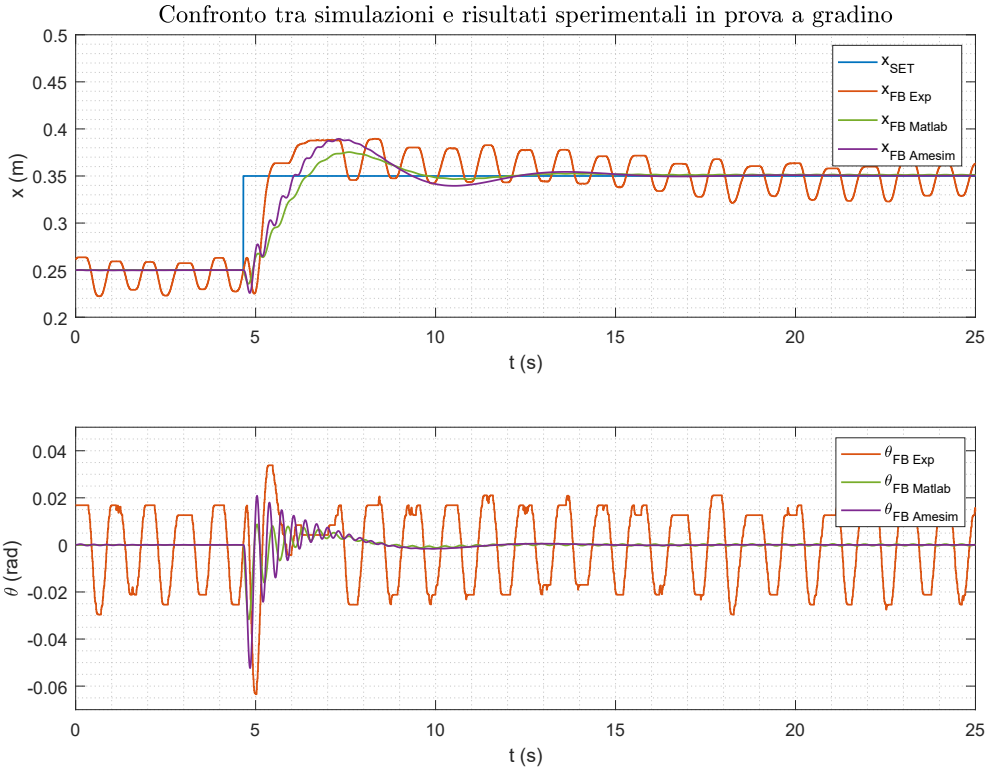


Figura 5.19: Risultati simulati vs sperimentali in prova a gradino

Di seguito si riportano invece i risultati ottenuti in alcune prove sinusoidali per valutare la differenza tra sfasamento previsto e reale, e quindi avere un'idea della differenza delle bande passanti.
Nella prima prova, Figura 5.20, l'onda sinusoidale ha frequenza pari a 0.1 Hz e ampiezza di 100 mm. Come prima, in rosso vengono rappresentati i risultati sperimentali, in verde quelli ottenuti in Matlab ed infine in viola quelli ricavati in Amesim. Si può notare come in tutti e tre i casi l'inseguimento ha successo e si nota una leggera sovraelongazione rispetto al segnale di riferimento. Anche gli andamenti dell'angolo θ dell'asta predetti da Matlab e Amesim si accordano tra loro ed entrambi differiscono molto dall'andamento reale che risulta molto meno uniforme, conseguenza probabilmente del movimento non fluido del carrello. Si riesce comunque a riconoscere, seppur lievemente, l'andamento sinusoidale che presentano i risultati delle simulazioni. Per quanto riguarda lo sfasamento tra riferimento e *feedback* di posizione della slitta, nel caso della curva verde esso vale 27.70°, per quella viola 13.02° ed infine per quella rossa 13.87°.

La Figura 5.21 riporta invece il caso in cui il periodo del riferimento di riduce a 5 s. Confrontando questo risultato con quello precedente è evidente che lo sfasamento sia aumentato, come ci si attende, e vale 87.67° per la curva verde, 94.55° per quella viola ed infine 39.03° per quella rossa. Anche la sovraelongazione è cresciuta, in particolare nel caso della curva viola, che riporta i risultati del modello Amesim. Per quanto riguarda l'angolo dell'asta, valgono le considerazioni fatte in precedenza. Risulta però in questo caso nitido l'andamento in media sinusoidale del segnale ottenuto sperimentalmente.

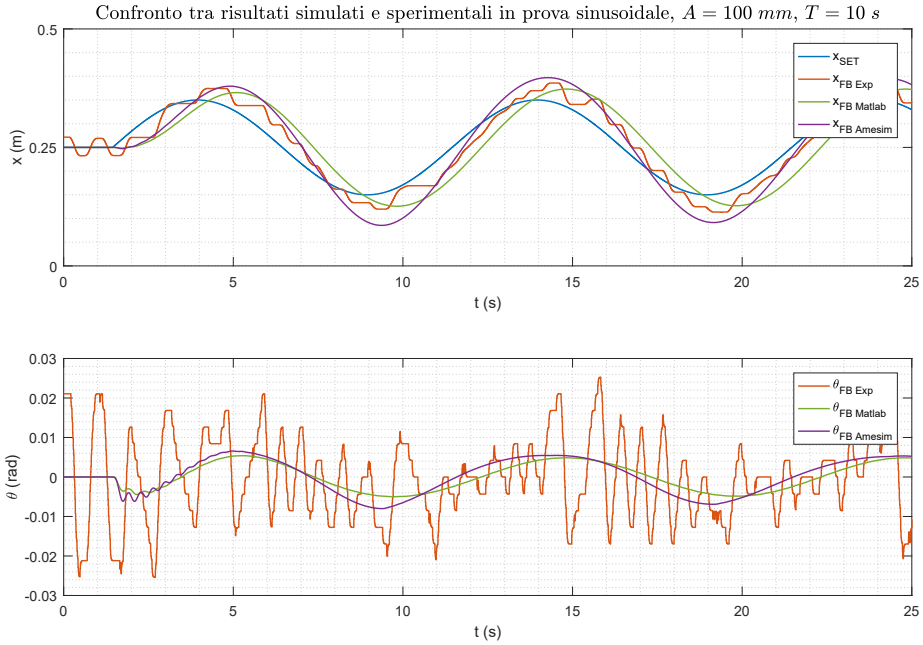


Figura 5.20: Risultati simulati vs sperimentali con set sinusoidale, $A = 100mm$, $T = 10\ s$

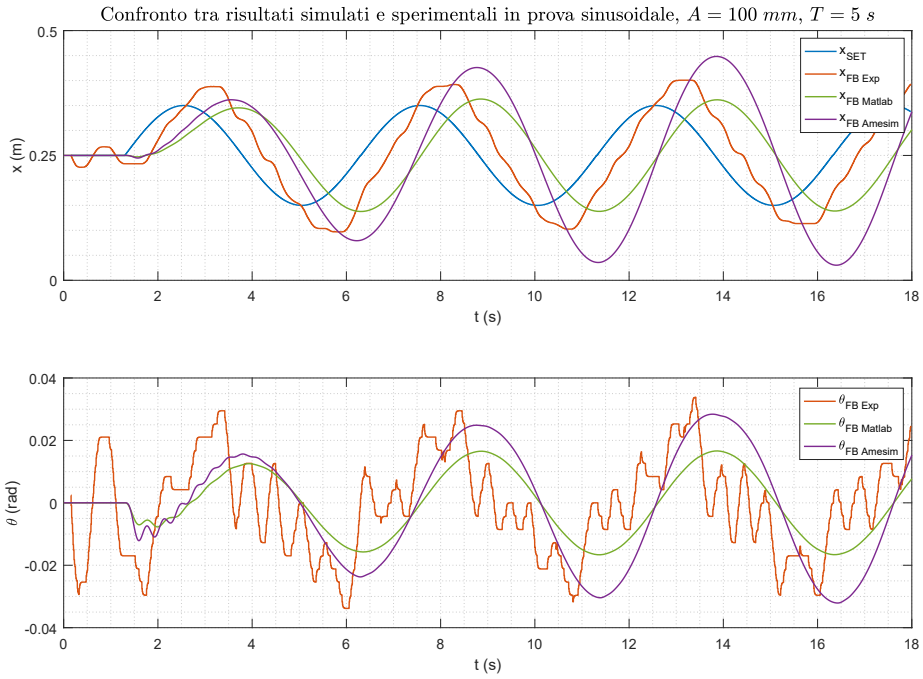


Figura 5.21: Risultati simulati vs sperimentali con set sinusoidale, $A = 100mm$, $T = 5\ s$

I risultati appena presentati mostrano come per alcuni aspetti i modelli sviluppati si accordino con la realtà, anche se i controllori implementati differiscono. Per risolvere questo aspetto è necessario complicare i modelli, tenendo conto di altri aspetti quali l'attrito Coulombiano. Sarebbe anche utile eseguire dei test sulle valvole per valutare la bontà delle ipotesi fatte in termini di conduttanza, rapporto critico e banda passante.

Capitolo 6

Prospettive di sviluppo

L'idea che ha portato alla stesura del presente elaborato è stata, come detto, quella di creare un banco di prova ad uso didattico, che permetta di analizzare e comprendere un problema classico quale è quello del controllo di un pendolo inverso, calato nel contesto dell'automazione a fluido. Date le caratteristiche del sistema, nascono ulteriori complicazioni quali la necessità di un doppio controllo, sulla x e sulla θ, qui risolta utilizzando un'architettura ad anelli di controllo annidati.

Nella presente sezione si riassumono alcune idee del candidato per un futuro sviluppo dell'attività. In primo luogo sarebbe interessante proseguire con le prove sperimentali per raffinare la scelta dei parametri dei controllori PID, al fine di ottimizzare il funzionamento del sistema. Si potrebbe poi modificare i modelli di base sviluppati in questa sede aggiungendo contributi, quali quello dell'attrito Coulombiano con la guida lineare, fin'ora trascurati. Sarebbe importante condurre prove approfondite sulle valvole al fine di valutare la conduttanza ed il rapporto critico, nonché la banda passante delle stesse. La conduttanza in particolare gioca un ruolo importante comparendo a numeratore in (15). Si potrebbero sviluppare, avendo a disposizione le necessarie informazioni, modelli ad hoc in LMS Amesim per valvole e cilindro, sfruttando la *Pneumatic Component Design Library*. In una direzione complementare si potrebbero eseguire simulazioni volte a valutare il comportamento del sistema al variare di parametri quali la corsa e l'alesaggio del cilindro. Uno sviluppo alternativo a quello presentato in questa sede potrebbe consistere nell'utilizzo di valvole digitali da controllare mediante segnale di comando PWM. Le valvole digitali sono più economiche di quelle proporzionali e, se dotate di banda passante sufficientemente elevata, dovrebbero garantire risultati paragonabili a quelli qui presentati. Tale aspetto è stato confermato da alcune prove effettuate in Amesim sostituendo agli elementi proporzionali delle valvole digitali con relativo comando PWM. La figura sottostante riporta la risposta che si ottiene ad una variazione a gradino del segnale X_{SET}, con gli stessi compensatori presentati nel Capitolo 3, una banda passante delle valvole pari a $120Hz$ e una frequenza del PWM di $20Hz$.

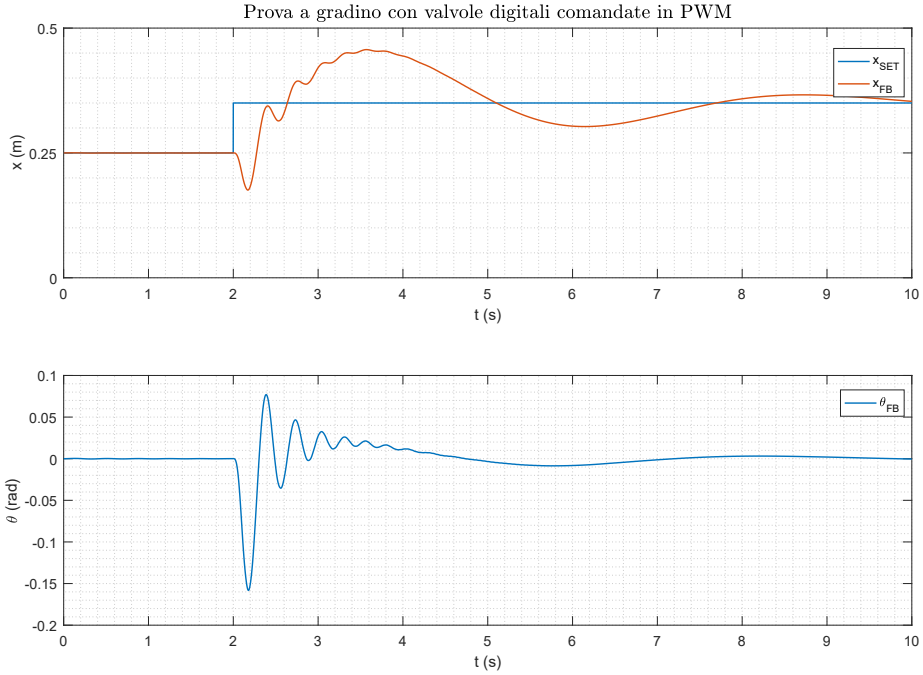


Figura 6.1: Risposta a gradino con valvole digitali comandate in PWM

A livello di controllore impiegato, si potrebbe tentare l'utilizzo di un PLC più performante, per aumentare la rapidità del controllo, oppure utilizzare dei moduli di ingresso con una risoluzione maggiore. In direzione opposta si potrebbe tentare la stabilizzazione del sistema con dispositivi a basso costo quali una scheda Arduino o similare.
Una possibilità interessante infine potrebbe essere quella di non limitare il controllore ai due poli e due zeri disponibili con un compensatore PID, ma passare a funzioni più complesse per garantire prestazioni migliori da parte del sistema controllato.

Appendice A

A.1 Funzionamento dei driver delle valvole

In questa sezione si discute il funzionamento dei driver accoppiati alle valvole nella realizzazione del banco di prova. Come detto nell'elaborato, lo scopo dell'abbinamento è quello di ottenere un comportamento proporzionale in flusso.
Per quanto non sia stato possibile disassemblare una valvola per osservarne la struttura interna, è però logico supporre che questa sia costituita da un otturatore mantenuto in posizione da una molla, la quale garantisce la proporzionalità nel posizionamento del primo, a sua volta mosso da un attuatore lineare.

Quando la bobina, di induttanza L, dell'attuatore è attraversata da una corrente i, genera un campo magnetico la cui forza F di trazione sul corpo dell'otturatore è proporzionale al modulo di i secondo la formula:

$$F = (Ni)^2 \frac{\mu_0 A}{2g^2}$$

In cui N è il numero di spire della bobina, μ_0 è la permittività magnetica del vuoto, A è l'area interna del solenoide ed infine g è il valore del traferro presente tra solenoide e corpo dell'otturatore.
Data quindi una forza F e una molla di costante elastica k lo spostamento dell'otturatore sarà dato da:

$$x = \frac{F}{k}$$

Non resta che capire come venga calcolata ed imposta nel sistema in esame la corrente da inviare alla valvola. L'intero processo è affidato al driver il quale realizza un vero e proprio sistema di controllo in anello chiuso della corrente. Prima di procedere con l'analisi, si riassume brevemente il funzionamento della tecnica PWM, acronimo di *Pulse Width Modulation*, utilizzata dal driver durante il funzionamento.
La tecnica PWM consiste nel generare segnali ad onda quadra di ampiezza e periodo fissi e prestabiliti e durata degli impulsi variabile in funzione di un parametro che prende il nome di *duty-cycle*, abbreviato *dc* nel seguito. Formalmente, data una frequenza di lavoro f del generatore PWM, si definiscono il periodo $T = \frac{1}{f}$ e l'intervallo t_{on}, ovvero il tempo in cui il segnale è non nullo. Avremo quindi:

$$dc = \frac{t_{on}}{T}$$

In altri termini, suddiviso il tempo in intervalli costanti e pari a T, il segnale sarà diverso da zero per una frazione *dc* del periodo. La figura sottostante riporta un esempio di quanto

appena detto nel caso di un segnale con le seguenti caratteristiche: ampiezza pari a 10, $T = 25$ e $dc = 0.5$

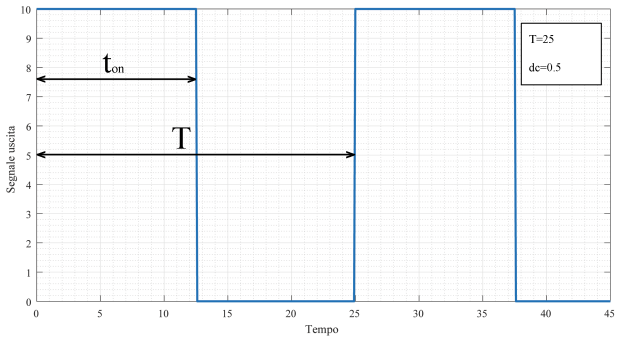


Figura A.1: Andamento di un segnale PWM con $T = 25$ e $dc = 0.5$

Nel caso in esame un microprocessore traduce il valore di riferimento della posizione dell'otturatore, imposto dall'esterno sotto forma di un segnale in corrente o tensione, in un valore di corrente che deve scorrere nelle spire del solenoide. Tale valore viene poi confrontato con il *feedback* proveniente dalla valvola e l'errore derivante viene compensato attraverso un'apposita legge di controllo. Il risultato dell'operazione di compensazione è il valore di *duty-cycle* del segnale d'uscita del driver. Esso giunge poi al solenoide interno alle valvole con conseguente fenomeno di carica e scarica dell'induttore con legge esponenziale. Se la frequenza del segnale PWM è sufficientemente alta, 500 Hz in questo caso, i transitori di variazione della corrente si trasformano in onde triangolari in cui il *ripple* dipende dal valore di L: più è elevato il valore dell'induttanza e minore sarà il *ripple* di corrente. La figura sottostante sintetizza quanto detto. Si deve notare che ad L sono stati assegnati valori bassi per rendere di facile visualizzazione il fenomeno discusso.

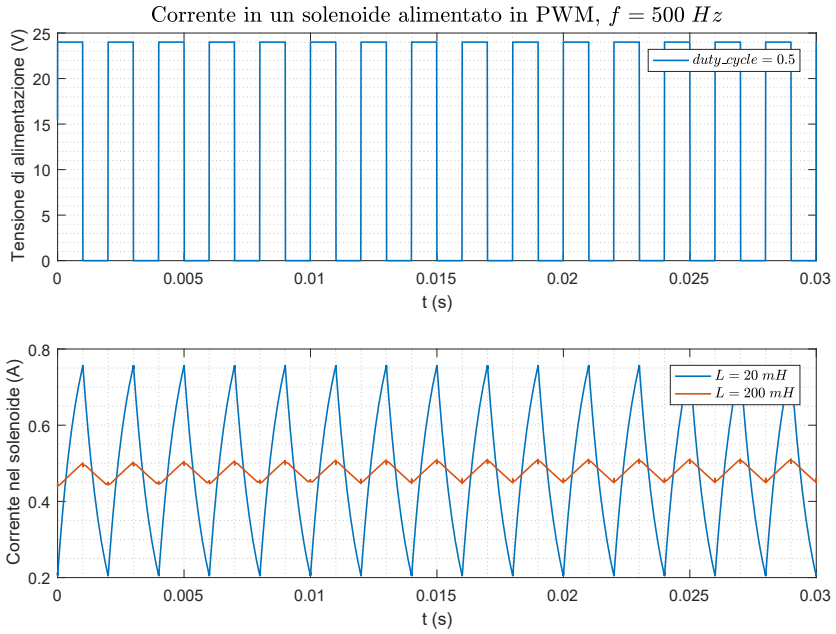


Figura A.2: Andamento della corrente in un solenoide alimentato in PWM

A migliorare il comportamento della valvola interviene inoltre la banda passante limitata della stessa. Come detto la forza sul corpo dell'otturatore è proporzionale alla corrente che attraversa le spire del solenoide, la quale presenta un piccolo *ripple*. Il periodo dell'onda triangolare della corrente è lo stesso del segnale PWM di eccitazione, quindi 500 Hz. Di conseguenza, se la frequenza propria della valvola è sufficientemente più bassa, le fluttuazioni verranno ulteriormente attenuate, garantendo un posizionamento dell'otturatore più preciso e stabile.

Appendice B

B.1 Calcolo del coefficiente di attrito viscoso

Il calcolo del coefficiente di attrito viscoso è stato realizzato per l'intero gruppo cilindro pneumatico e carrello mediante prove sperimentali.
Le prove, dieci in totale, sono state eseguite trascinando il carrello lungo l'intera corsa L: la forza F di trazione è stata registrata mediante dinamometro digitale, mentre il tempo t necessario per la corsa è stato rilevato con un cronometro digitale.
Per ogni ripetizione si è poi proceduto al calcolo del coefficiente di attrito secondo la seguente relazione:

$$b_i = \frac{F_i}{v_i}$$

Dove il pedice i indica il numero identificativo della prova, F_i il valore della forza di trazione ed infine v_i la velocità del carrello durante la stessa, calcolata come $v_i = \frac{L}{t_i}$. La tabella seguente riporta i dati e i risultati sperimentali.

Risultati delle prove sperimentali				
n° *prova*	$L\ (m)$	$F\ (N)$	$t\ (s)$	$b\ \left(\frac{N \cdot s}{m}\right)$
1	0.500	4.91	2.4	20.0
2	0.500	3.43	2.6	20.0
3	0.500	4.91	2.4	20.0
4	0.500	5.89	1.9	20.0
5	0.500	6.38	1.7	20.0
6	0.500	6.87	1.5	20.0
7	0.500	6.37	1.7	20.0
8	0.500	7.36	1.5	20.0
9	0.500	6.37	2.0	20.0
10	0.500	3.92	2.5	20.0

Tabella B.1: Risultati sperimentali delle prove per il calcolo del coefficiente di attrito b

Il valore finale utilizzato nella modellazione risulta dalla media dei dieci ottenuti, quindi:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{10} b_i}{10} = 21.8 \approx 22\ \frac{Ns}{m}$$

B.2 Calcolo delle funzioni di trasferimento $G_{u\theta}$ e $G_{\theta x}$ e G_{ux}

Di seguito si riportano i passaggi necessari per il calcolo analitico delle funzioni di trasferimento $G_{u\theta}$, $G_{\theta x}$ e G_{ux} a partire dalle equazioni $(3'')$, $(5')$, $(11')$, $(11'')$ e (12) del Capitolo 3 di seguito riportate.

$$\ddot{x} = l\ddot{\theta} - g\theta \quad (3'')$$
$$M_c l\ddot{\theta} + b_c\dot{x} - (m + M_c)\, g\theta = F \quad (5')$$

$$\dot{p}_A = -C_A\dot{x} + K_A u_A \quad (11')$$
$$\dot{p}_B = C_B\dot{x} - K_B u_B \quad (11'')$$

$$F = p_A A_A - p_B A_B - b_p\dot{x} - M_p\ddot{x} \quad (12)$$

Riassumendo, la la $(3'')$ e $(5')$ derivano dalle equazioni di equilibrio del carrello e del pendolo, la $(11')$ e $(11'')$ dall'equazione di continuità applicata alle camere del cilindro pneumatico ed infine la (12) rappresenta l'equilibrio meccanico del pistone. Applicando ora la trasformata di Laplace si ottiene:

$$s^2\overline{x}(s) = ls^2\overline{\theta}(s) - g\overline{\theta}(s) \quad (B.1)$$
$$M_c ls^2\overline{\theta}(s) + b_c s\overline{x}(s) - (m + M_c)\, g\overline{\theta}(s) = \overline{F}(s) \quad (B.2)$$

$$s\overline{p}_A(s) = -C_A s\overline{x}(s) + K_A\overline{u}_A(s) \quad (B.3')$$
$$s\overline{p}_B(s) = C_B s\overline{x}(s) - K_B\overline{u}_B(s) \quad (B.3'')$$

$$\overline{F}(s) = \overline{p}_A(s)\, A_A - \overline{p}_B(s)\, A_B - b_p s\overline{x}(s) - M_p s^2\overline{x}(s) \quad (B.4)$$

Nel prosieguo, per semplicità di notazione, le variabili sopra-segnate nella variabile complessa di Laplace s vengono indicate come le equivalenti dipendenti dal tempo. Le equazioni sono di seguito riscritte, dopo aver svolto le opportune semplificazioni, in una forma più conveniente:

$$x = \frac{ls^2\theta - g\theta}{s^2} \quad (B.5)$$
$$M_c ls^2\theta + b_c sx - (m + M_c)\, g\theta = F \quad (B.6)$$

$$p_A = \frac{-C_A sx + K_A u}{s} \quad (B.7')$$
$$p_B = \frac{C_B sx - K_B u}{s} \quad (B.7'')$$

$$F = p_A A_A - p_B A_B - b_p sx - M_p s^2 x \quad (B.8)$$

L'equazione $(B.5)$ fornisce subito la funzione di trasferimento $G_{\theta x}$:

$$G_{\theta x} = \frac{x}{\theta} = \frac{ls^2 - g}{s^2}$$

Il passaggio successivo consiste nel sostituire $(B.8)$ in $(B.6)$

$$M_c l s^2\theta + b_c s x - (m + M_c)\, g\theta = p_A A_A - p_B A_B - b_p s x - M_p s^2 x \quad (B.9)$$

Sostituendo ora in $(B.9)$ le espressioni di p_A e p_B espresse in $(B.7')$ e $(B.7'')$:

$$M_c l s^2\theta + b\frac{l s^2\theta - g\theta}{s^2} - (m + M_c)\, g\theta = \frac{-C_A s x + K_A u}{s} A_A - \frac{C_B s x - K_B u}{s} A_B + \\ - b_p \frac{l s^2\theta - g\theta}{s^2} - M_p s^2 \frac{l s^2\theta - g\theta}{s^2} \quad (B.10)$$

Non resta ora che semplificare l'espressione per giungere alla funzione di trasferimento $G_{u\theta}$ che lega il comando alle valvole con l'angolo dell'asta del pendolo.

$$G_{u\theta} = \frac{(K_A A_A + K_B A_B)\, s}{(M_c + M_p)\, l s^4 + (b_c + b_p)\, l s^3 - (m + M_c + M_p)\, g s^2 + (A_A C_A + A_B C_B)\, l s^2 - (b_c + b_p)\, g s - (A_A C_A + A_B C_B)\, g}$$

Infine G_{ux} si ricava mediante la relazione $G_{ux} = G_{u\theta} G_{\theta x}$:

$$G_{ux} = \frac{(K_A A_A + K_B A_B)\, s}{(M_c + M_p)\, l s^4 + (b_c + b_p)\, l s^3 - (m + M_c + M_p)\, g s^2 + (A_A C_A + A_B C_B)\, l s^2 - (b_c + b_p)\, g s - (A_A C_A + A_B C_B)\, g} \frac{l s^2 - g}{s^2}$$

Appendice C

C.1 Codice sorgente del programma per PLC S7-1200

Nelle pagine seguenti si riporta il codice sorgente del programma di controllo del banco, scritto dal candidato e caricato sul PLC Siemens S7-1200.

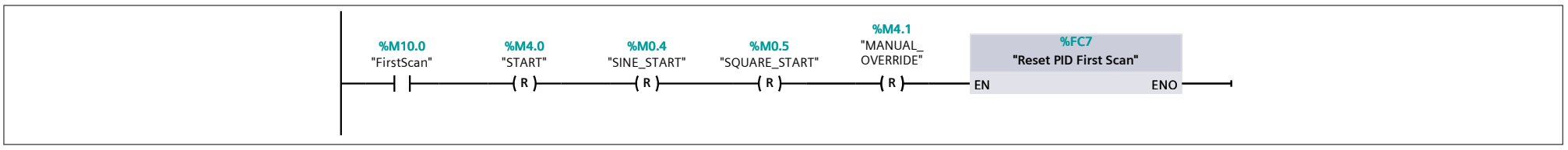
Main [OB1]

Main Proprietà							
Generale							
Nome	Main	**Numero**	1	**Tipo**	OB	**Linguaggio**	KOP
Numerazione	Automatico						
Informazioni							
Titolo	"Main Program Sweep (Cycle)"	**Autore**		**Commento**		**Famiglia**	
Versione	0.1	**ID definito dall'utente**					

Nome	Tipo di dati	Valore di default	Controllo	Commento
▼ Input				
Initial_Call	Bool			Initial call of this OB
Remanence	Bool			=True, if remanent data are available
Temp				
Constant				

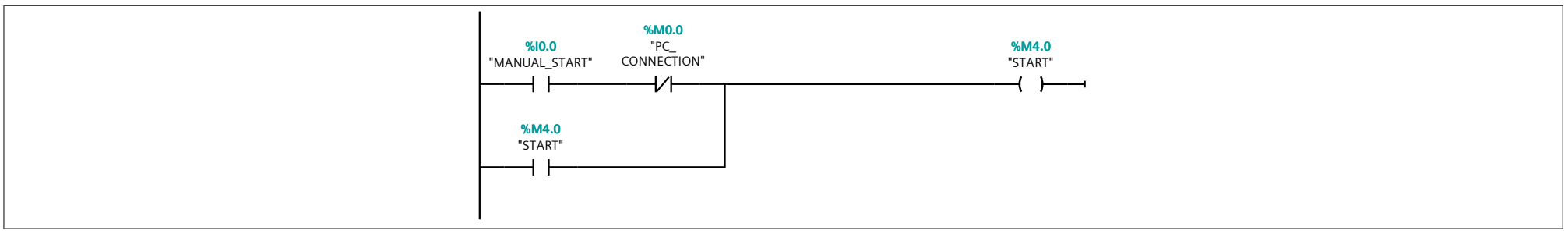
Segmento 1: Operazioni preliminari eseguite una volta all'avvio della CPU

All'avvio della CPU ci si accerta che tutti i bit di controllo siano a 0 e si inizializzano le variabili connesse al funzionamento dei blocchi PID_Compact



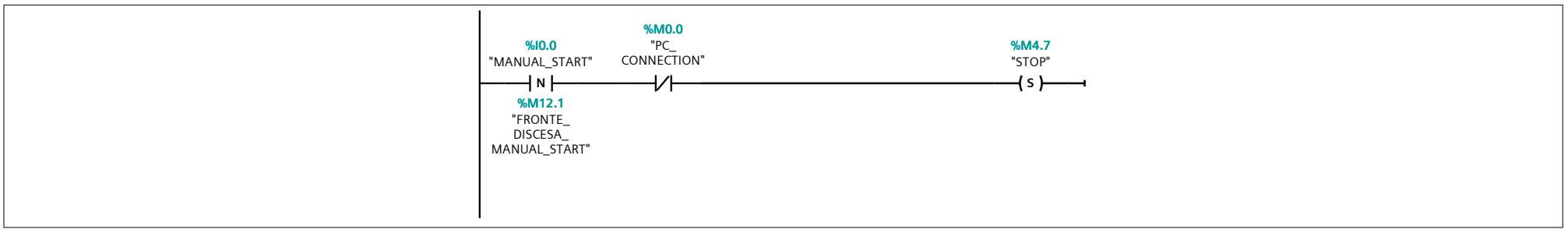
Segmento 2: Controllo della presenza del consenso per l'attivazione dell'algoritmo di controllo

Nel caso sia presente il consenso da parte del dispositivo di controllo manuale e non vi sia connessione con un PC esterno, il bit "START" viene attivato e il controllo ha inizio



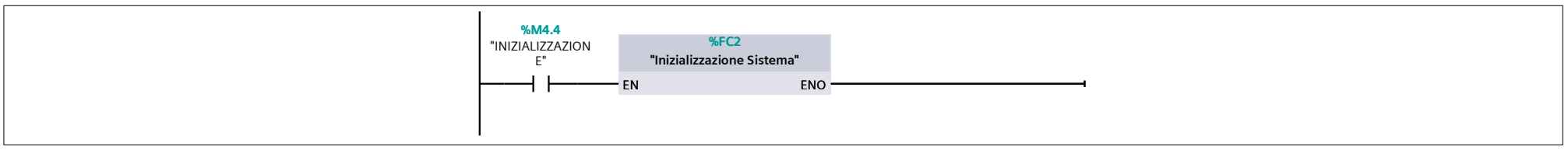
Segmento 3: Stop del controllo

Nel caso in cui il segnale del dispositivo di controllo manuale venga meno e non sia presente la connessione ad un PC Esterno, viene avviata la procedura di arresto del sistema ponendo a 1 il bit "STOP"



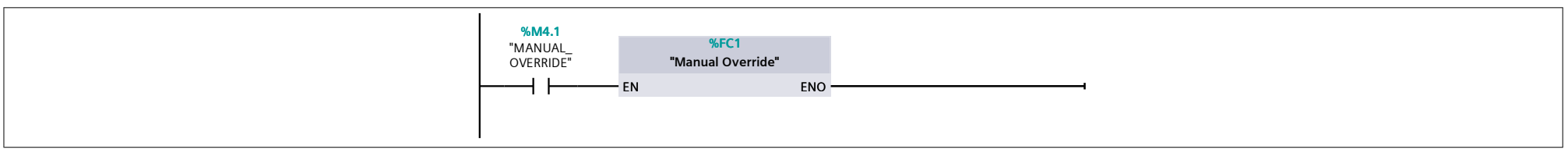
Segmento 4: Quando richiesto viene attivata la procedura di reinizializzazione del sistema

Nel caso in cui un PC esterno invii il comando di reinizializzazione, i controllori PID vengono fermati e il carrrello viene riportato al finecorsa apporopriato (in base alla posizione del pendolo). Una volta giunto a finecorsa i controllori vengono riavviati

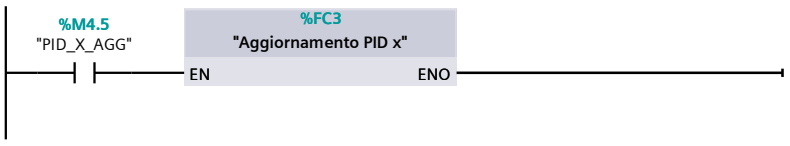


Segmento 5: Attivazione della procedura di override manuale del controllo

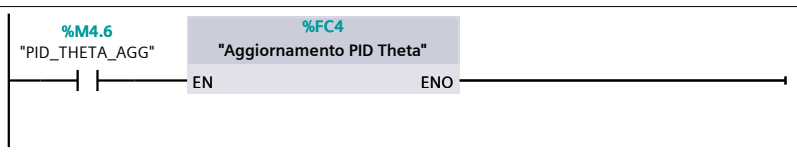
Nel caso in cui un PC esterno invii il comando di "MANUAL OVERRIDE", i controllori PID vendono esclusi e l'utente ha la possibilità di controllare manualmente la posizione del carrello



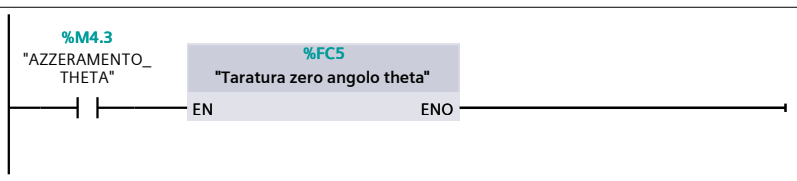
Segmento 6: Procedura di aggiornamento dei coefficienti del controllore PID x



Segmento 7: Procedura di aggiornamento dei coefficienti del controllore PID Theta

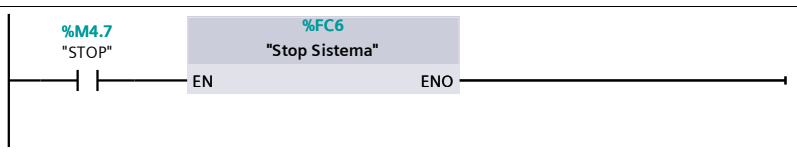


Segmento 8: Procedura di taratura del sensore angolare



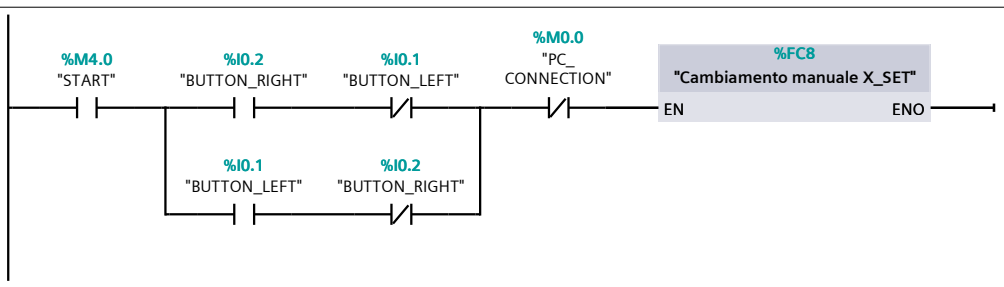
Segmento 9: Procedura di arresto del sistema

Avvio della procedura di arresto del sistema quando un PC esterno o il dispositivo di controllo manuale inviino il comando "STOP"

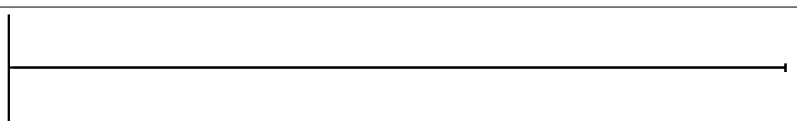


Segmento 10: Gestione degli input provenienti dai bottoni del dispositivo di controllo manuale

In caso i controllori PID siano attivi e non sia presente una connessione ad un PC esterno, i bottoni sul dispositivo di controllo manuale permettono di muovere il carrello a destra e sinistra cambiandone il setpoint



Segmento 11:

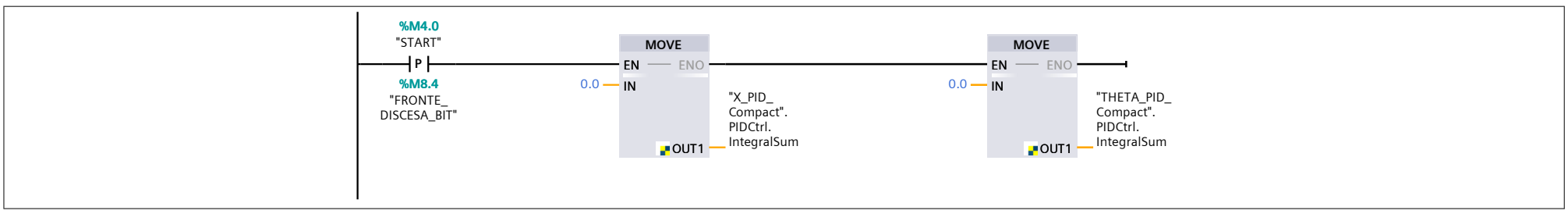


PID Cyclic interrupt [OB32]

PID Cyclic interrupt Proprietà							
Generale							
Nome	PID Cyclic interrupt	**Numero**	32	**Tipo**	OB	**Linguaggio**	KOP
Numerazione	Automatico						
Informazioni							
Titolo		**Autore**		**Commento**		**Famiglia**	
Versione	0.1	**ID definito dall'utente**					

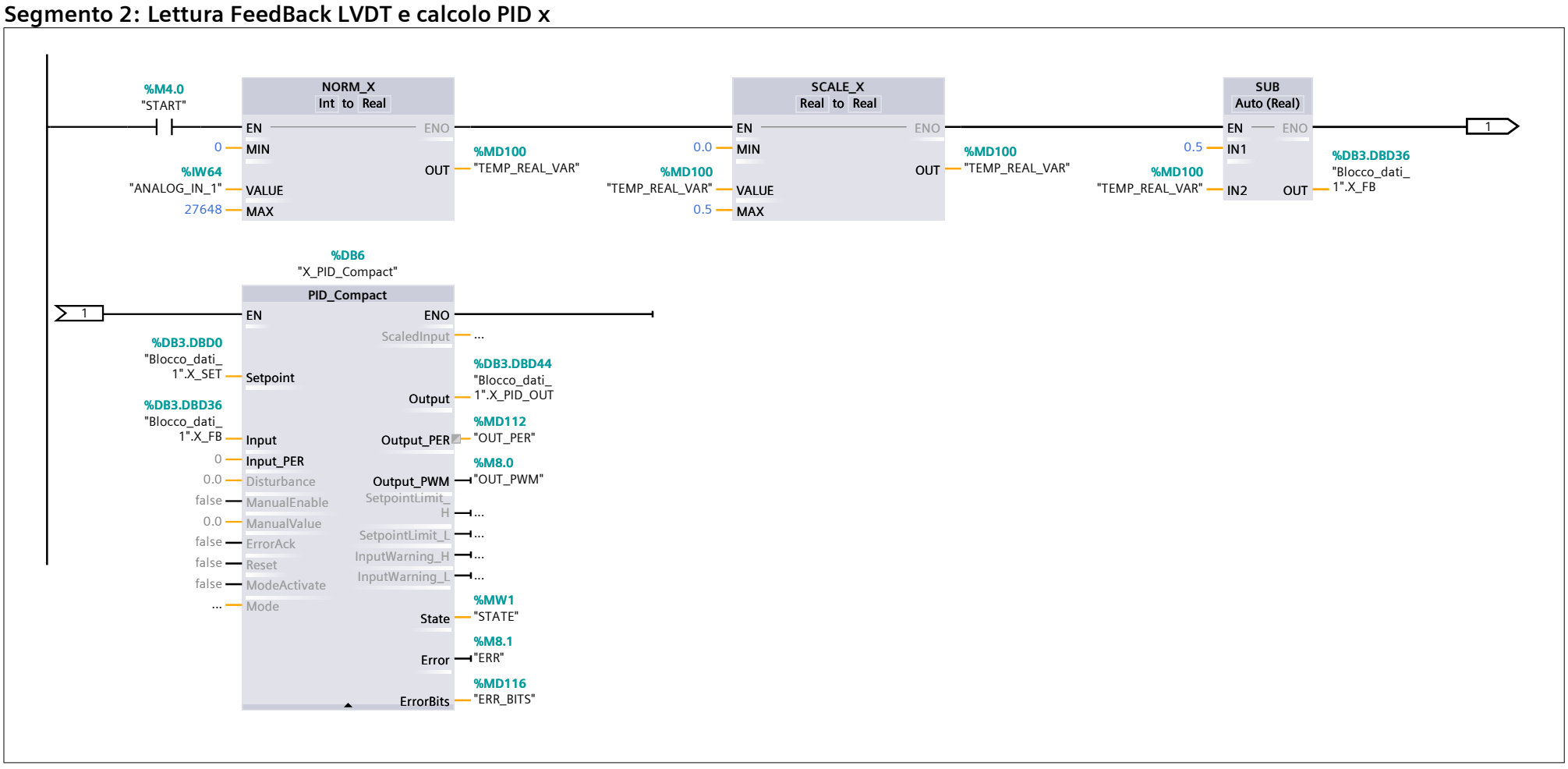
Nome	Tipo di dati	Valore di default	Controllo	Commento
▼ Input				
Initial_Call	Bool			Initial call of this OB
Event_Count	Int			Events discarded
Temp				
Constant				

Segmento 1: Reset della parte integrale dei controllori PID all'avvio



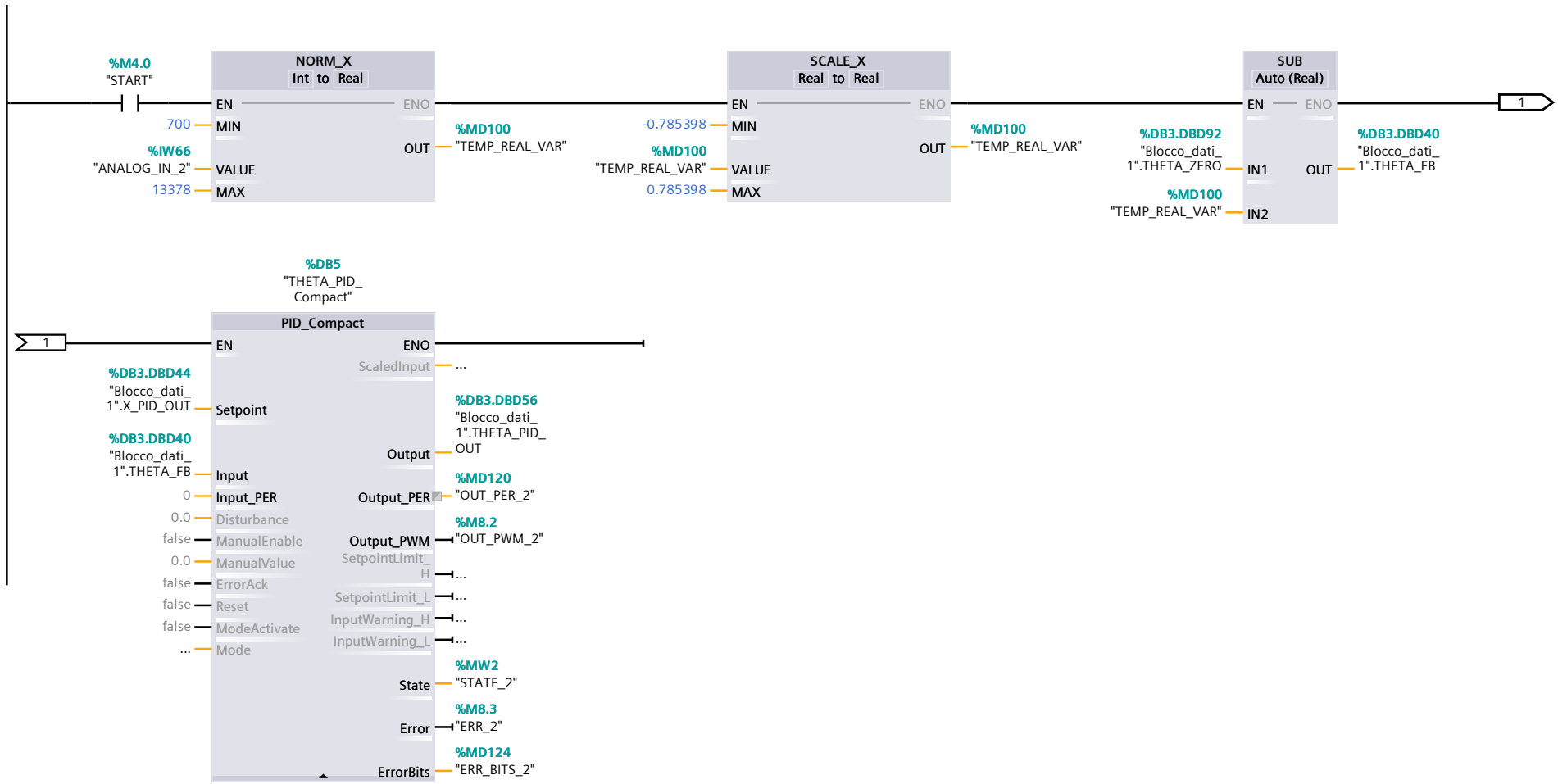
Segmento 2: Lettura FeedBack LVDT e calcolo PID x

Segmento 2: Lettura FeedBack LVDT e calcolo PID x

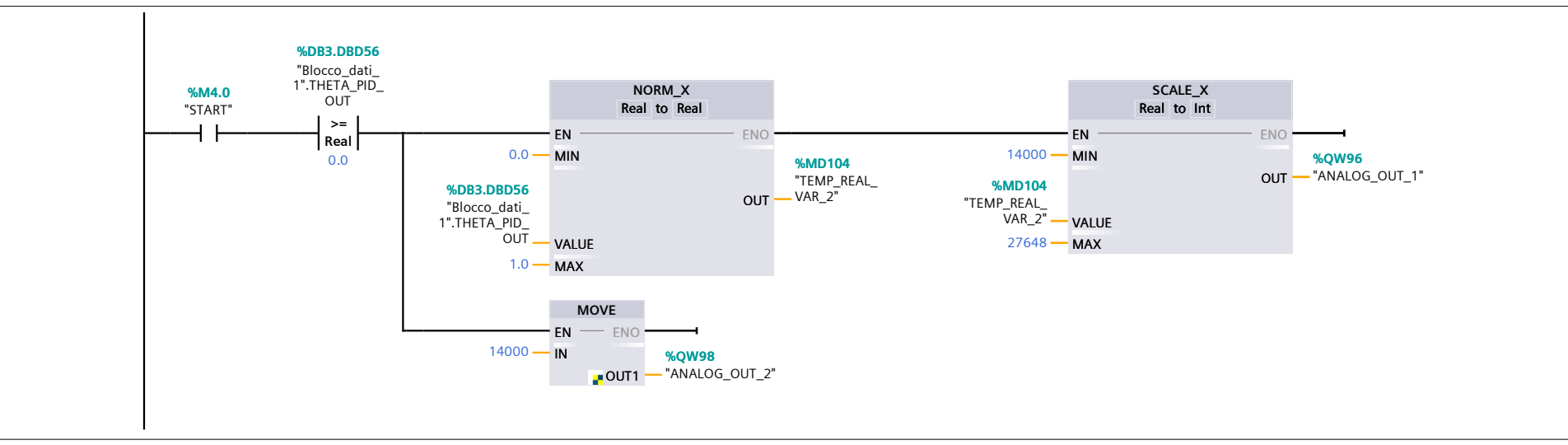


Segmento 3: Lettura FeedBack Theta e calcolo PID Theta

Segmento 3: Lettura FeedBack Theta e calcolo PID Theta

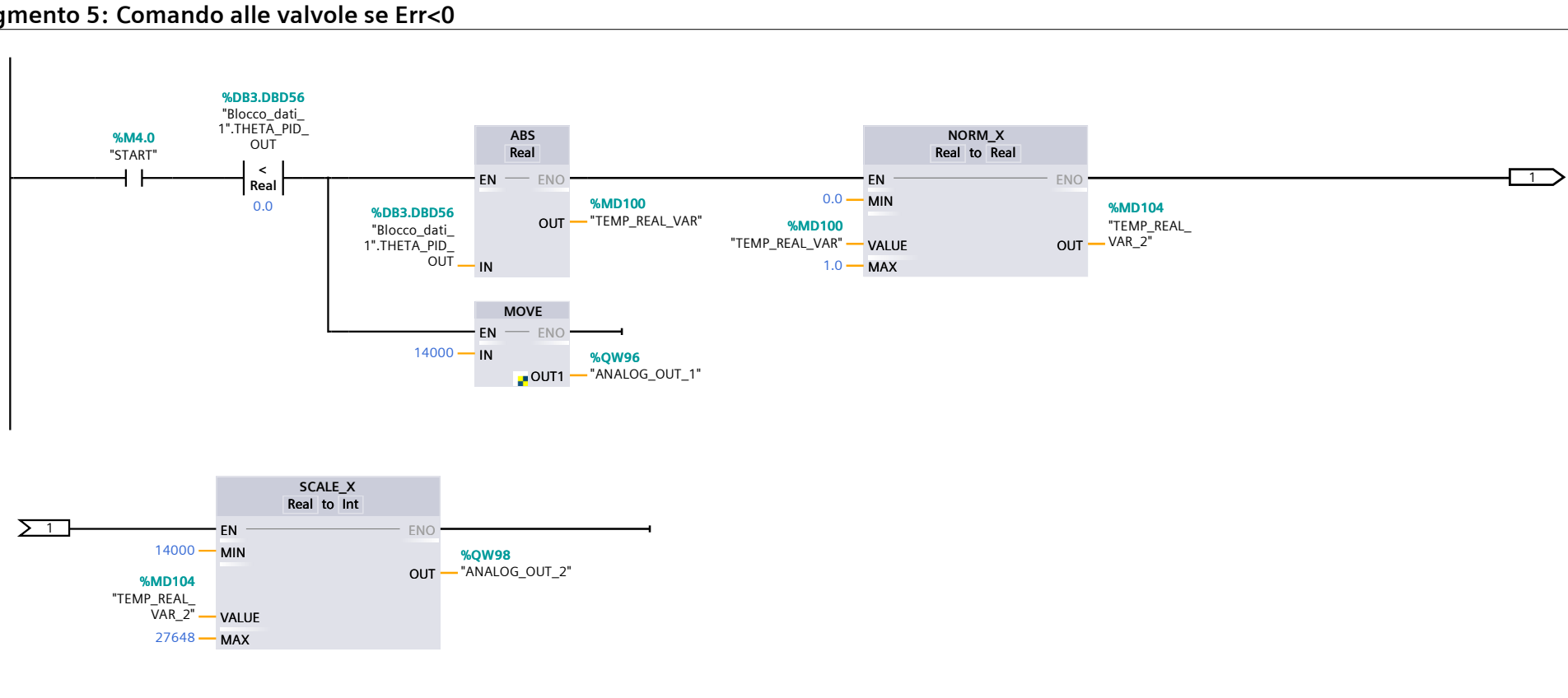


Segmento 4: Comando alle valvole se Err>0

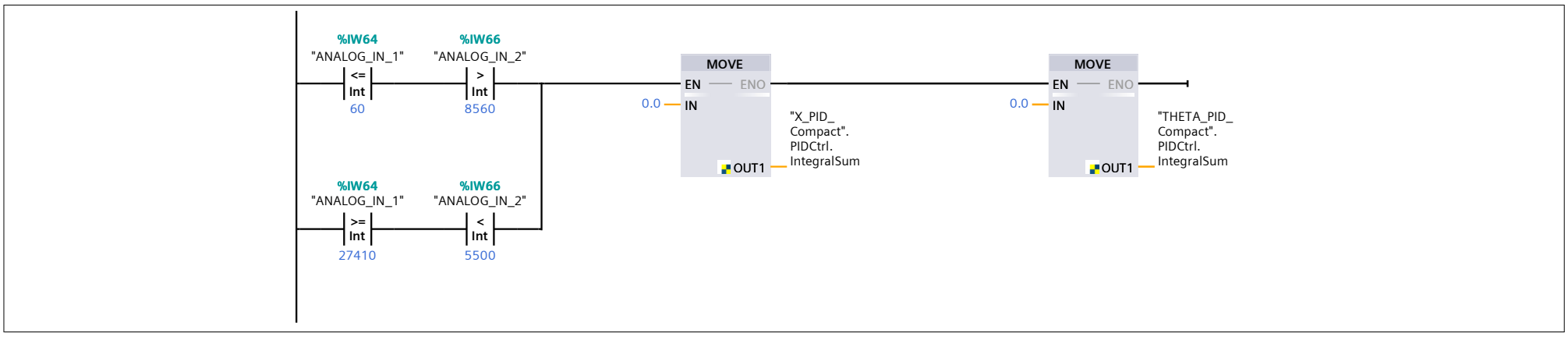


Segmento 5: Comando alle valvole se Err<0

Segmento 5: Comando alle valvole se Err<0



Segmento 6: Reset della componente integrale dei controllori se il carrello e il pendolo sono entrambi a fine corsa

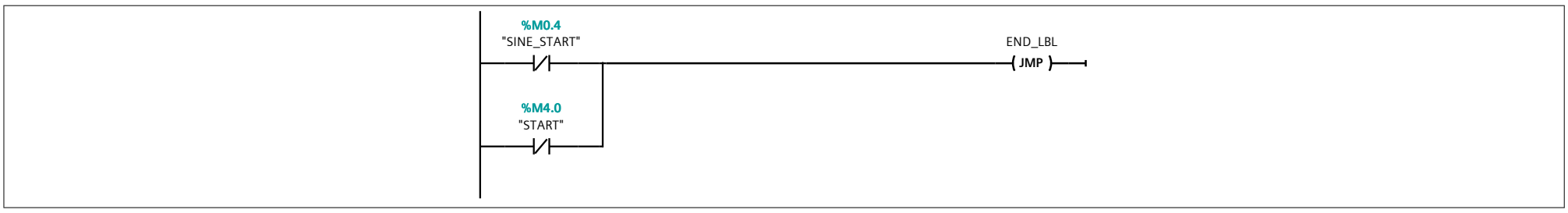


Sine Wave Cyclic interrrupt [OB31]

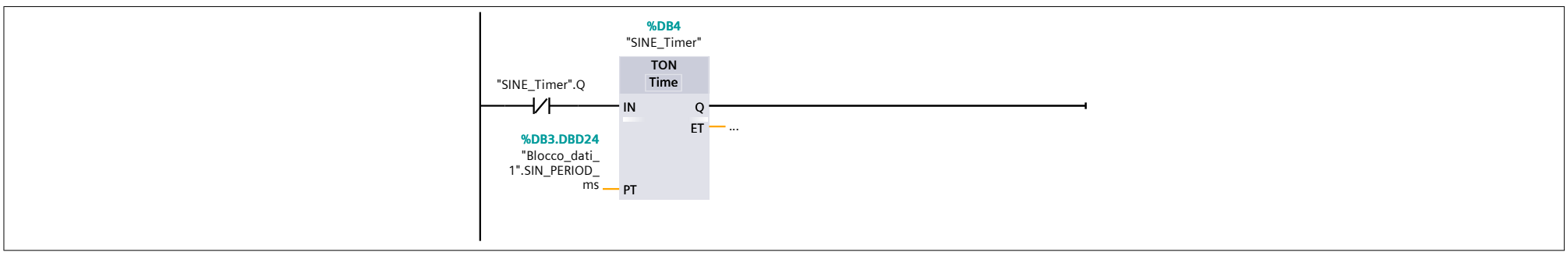
Sine Wave Cyclic interrrupt Proprietà							
Generale							
Nome	Sine Wave Cyclic interrrupt	**Numero**	31	**Tipo**	OB	**Linguaggio**	KOP
Numerazione	Automatico						
Informazioni							
Titolo		**Autore**		**Commento**		**Famiglia**	
Versione	0.1	**ID definito dall'utente**					

Nome	Tipo di dati	Valore di default	Controllo	Commento
▼ Input				
Initial_Call	Bool			Initial call of this OB
Event_Count	Int			Events discarded
Temp				
Constant				

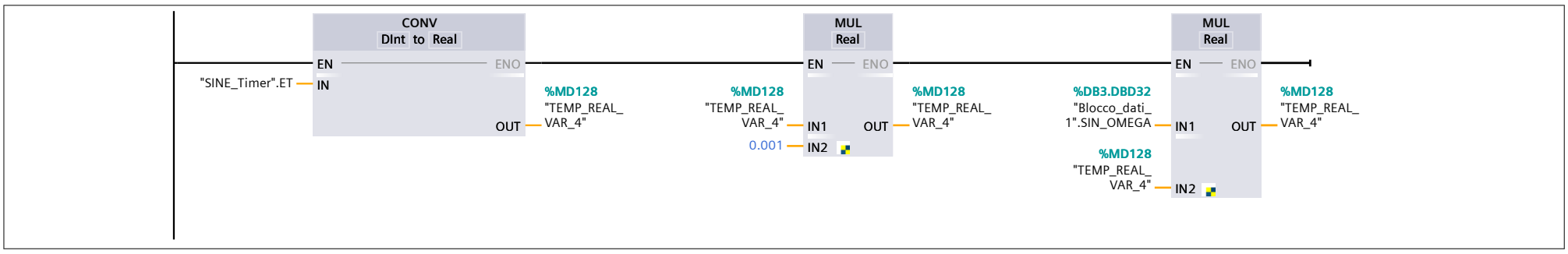
Segmento 1: Controllo dei consensi



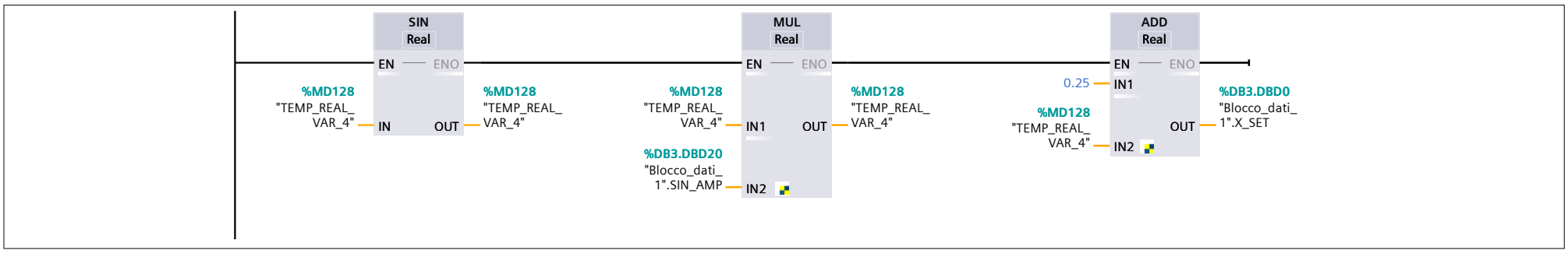
Segmento 2:



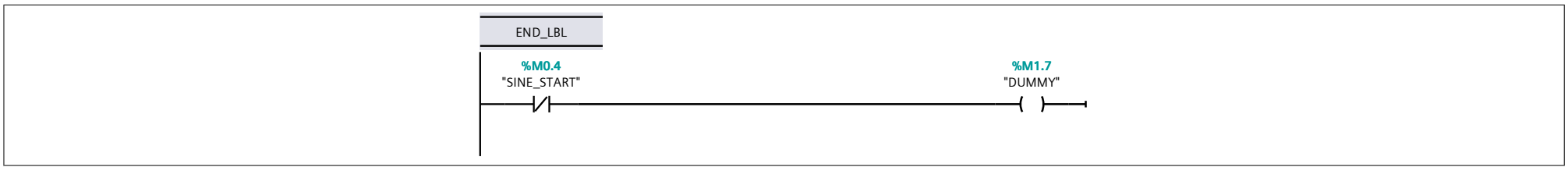
Segmento 3: Calcolo del prodotto omega*t



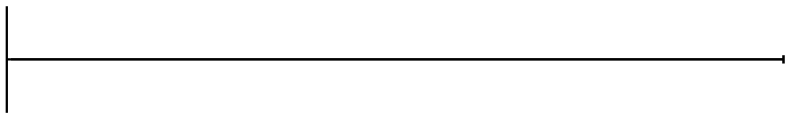
Segmento 4: Calcolo del prodotto A*sin(omega*t) e aggiornamento della posizione X_SET



Segmento 5:



Segmento 6:

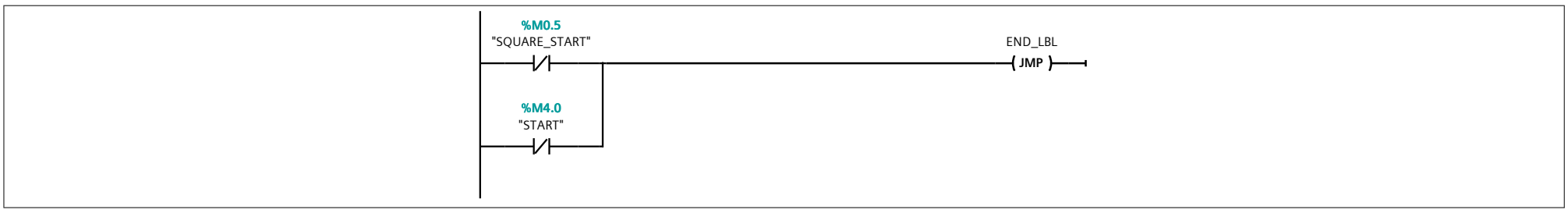


Square Wave Cyclic interrupt [OB30]

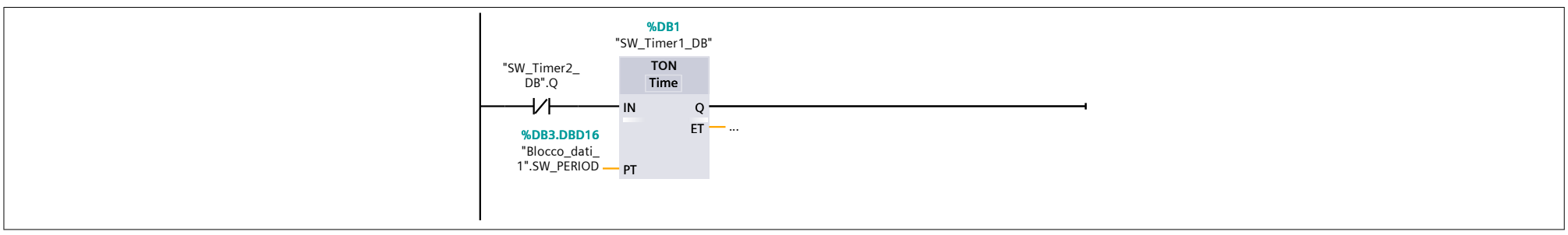
Square Wave Cyclic interrupt Proprietà							
Generale							
Nome	Square Wave Cyclic interrupt	**Numero**	30	**Tipo**	OB	**Linguaggio**	KOP
Numerazione	Automatico						
Informazioni							
Titolo		**Autore**		**Commento**		**Famiglia**	
Versione	0.1	**ID definito dall'utente**					

Nome	Tipo di dati	Valore di default	Controllo	Commento
▼ Input				
Initial_Call	Bool			Initial call of this OB
Event_Count	Int			Events discarded
Temp				
Constant				

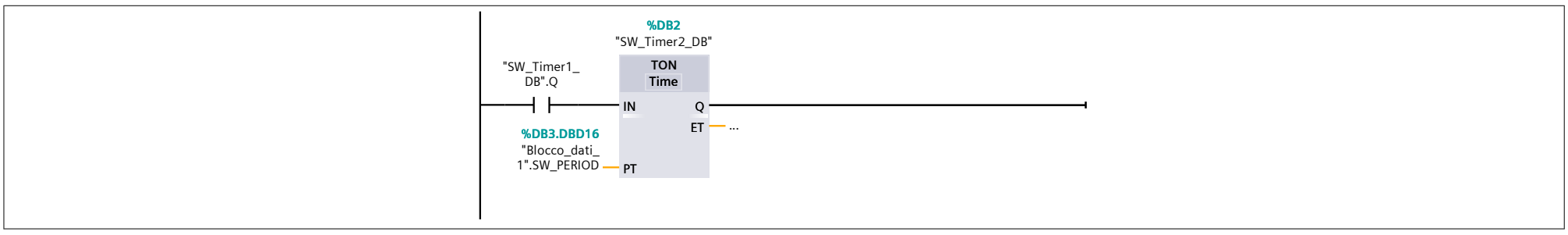
Segmento 1: Controllo dei consensi



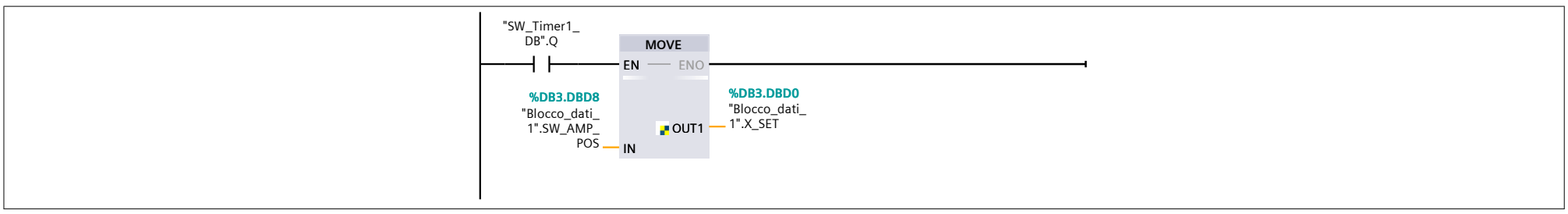
Segmento 2: Timer1 per la generazione dell'onda quadra



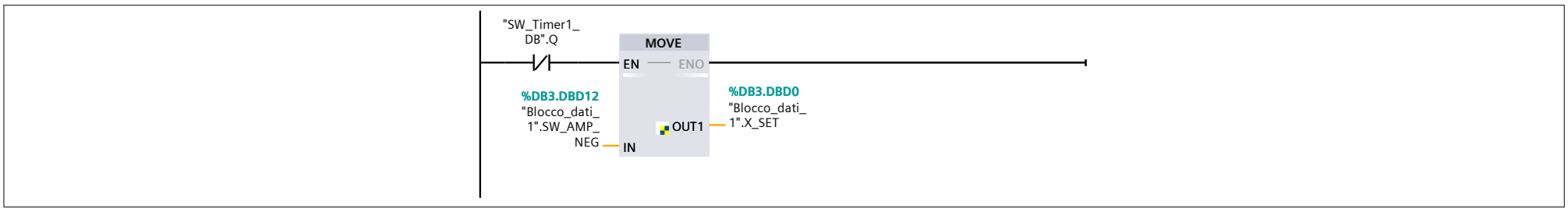
Segmento 3: Timer 2 per la generazione dell'onda quadra



Segmento 4: Aggiornamento della posizione X_SET



Segmento 5: Aggiornamento della posizione X_SET



Segmento 6:

END_LBL

%M0.5
"SQUARE_START"

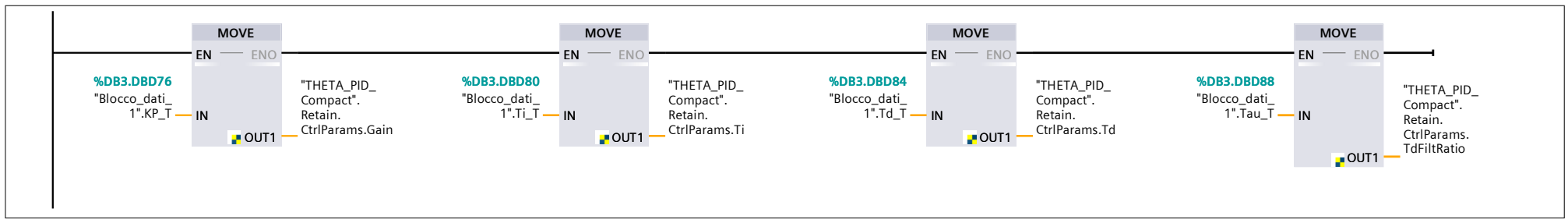
%M1.7
"DUMMY"

Aggiornamento PID Theta [FC4]

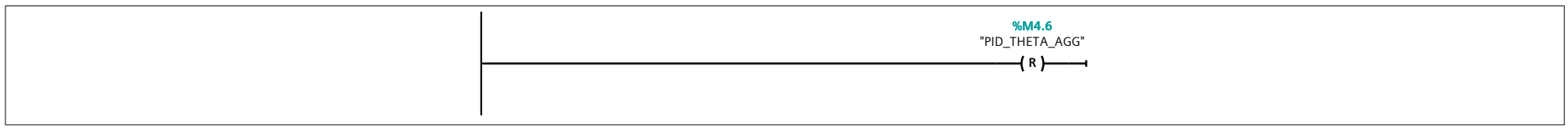
Aggiornamento PID Theta Proprietà							
Generale							
Nome	Aggiornamento PID Theta	**Numero**	4	**Tipo**	FC	**Linguaggio**	KOP
Numerazione	Automatico						
Informazioni							
Titolo		**Autore**		**Commento**		**Famiglia**	
Versione	0.1	**ID definito dall'utente**					

Nome	Tipo di dati	Valore di default	Controllo	Commento
Input				
Output				
InOut				
Temp				
Constant				
▼ Return				
Aggiornamento PID Theta	Void			

Segmento 1:



Segmento 2: Bit di start della procedura di modifica parametri PID theta

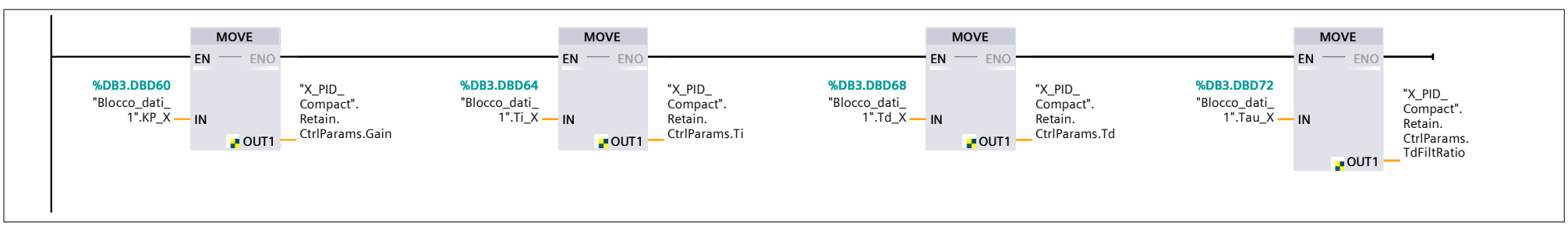


Aggiornamento PID x [FC3]

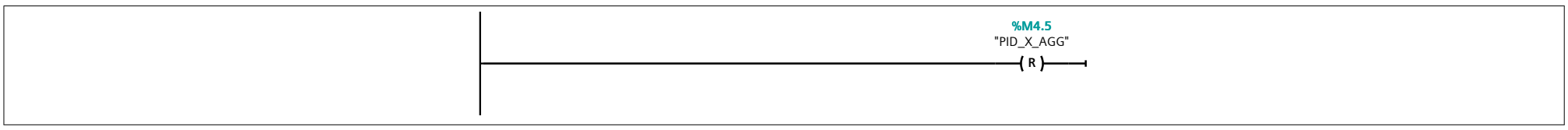
Aggiornamento PID x Proprietà							
Generale							
Nome	Aggiornamento PID x	**Numero**	3	**Tipo**	FC	**Linguaggio**	KOP
Numerazione	Automatico						
Informazioni							
Titolo		**Autore**		**Commento**		**Famiglia**	
Versione	0.1	**ID definito dall'utente**					

Nome	Tipo di dati	Valore di default	Controllo	Commento
Input				
Output				
InOut				
Temp				
Constant				
▼ Return				
Aggiornamento PID x	Void			

Segmento 1:



Segmento 2: Bit di start della procedura di modifica parametri PID x

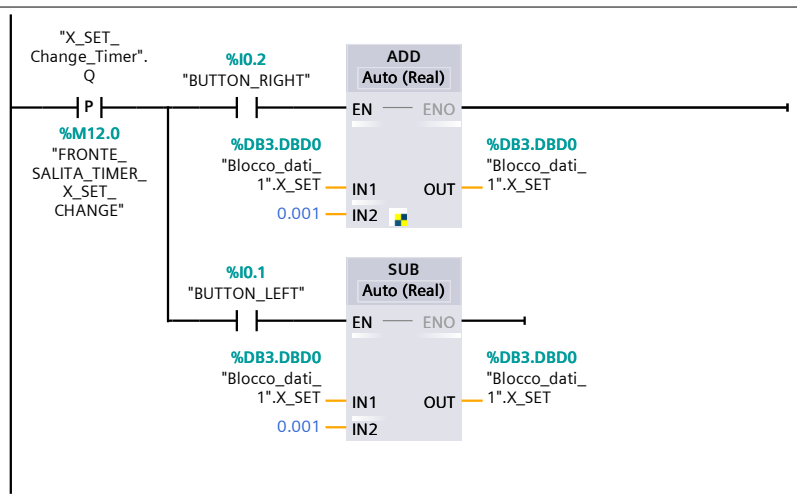


Cambiamento manuale X_SET [FC8]

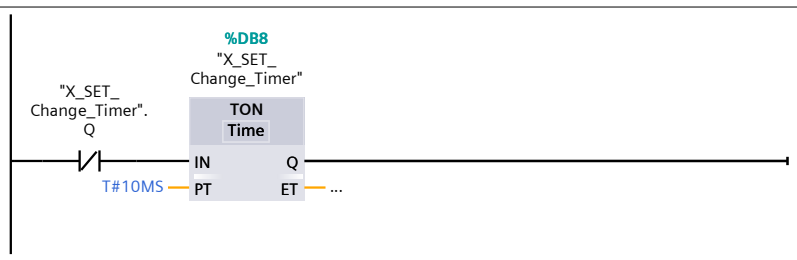
Cambiamento manuale X_SET Proprietà							
Generale							
Nome	Cambiamento manuale X_SET	**Numero**	8	**Tipo**	FC	**Linguaggio**	KOP
Numerazione	Automatico						
Informazioni							
Titolo		**Autore**		**Commento**		**Famiglia**	
Versione	0.1	**ID definito dall'utente**					

Nome	Tipo di dati	Valore di default	Controllo	Commento
Input				
Output				
InOut				
Temp				
Constant				
▼ Return				
Cambiamento manuale X_SET	Void			

Segmento 1:



Segmento 2:

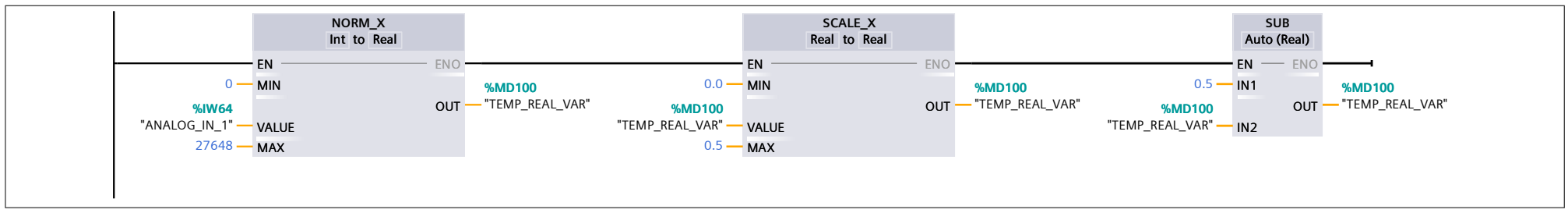


Inizializzazione Sistema [FC2]

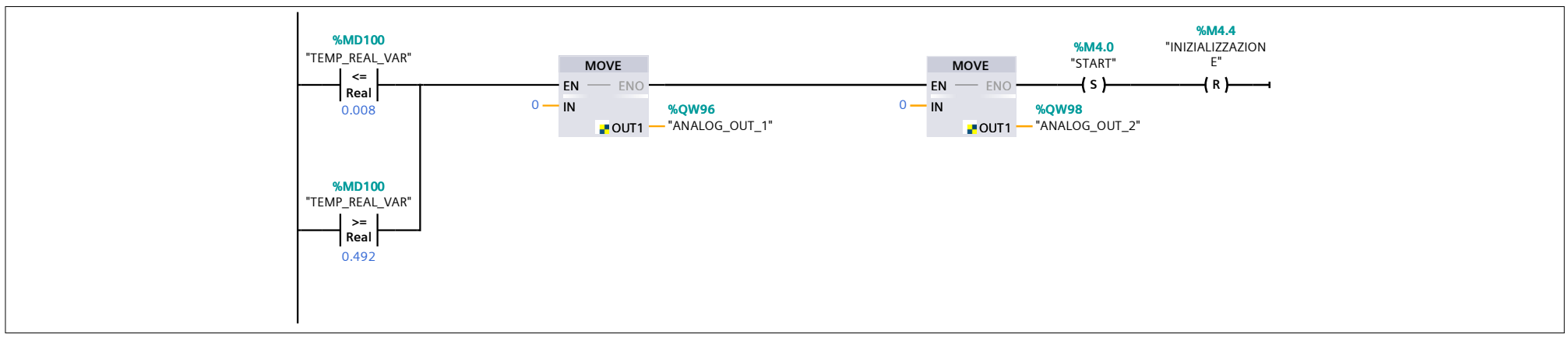
Inizializzazione Sistema Proprietà							
Generale							
Nome	Inizializzazione Sistema	**Numero**	2	**Tipo**	FC	**Linguaggio**	KOP
Numerazione	Automatico						
Informazioni							
Titolo		**Autore**		**Commento**		**Famiglia**	
Versione	0.1	**ID definito dall'utente**					

Nome	Tipo di dati	Valore di default	Controllo	Commento
Input				
Output				
InOut				
Temp				
Constant				
▼ Return				
Inizializzazione Sistema	Void			

Segmento 1:

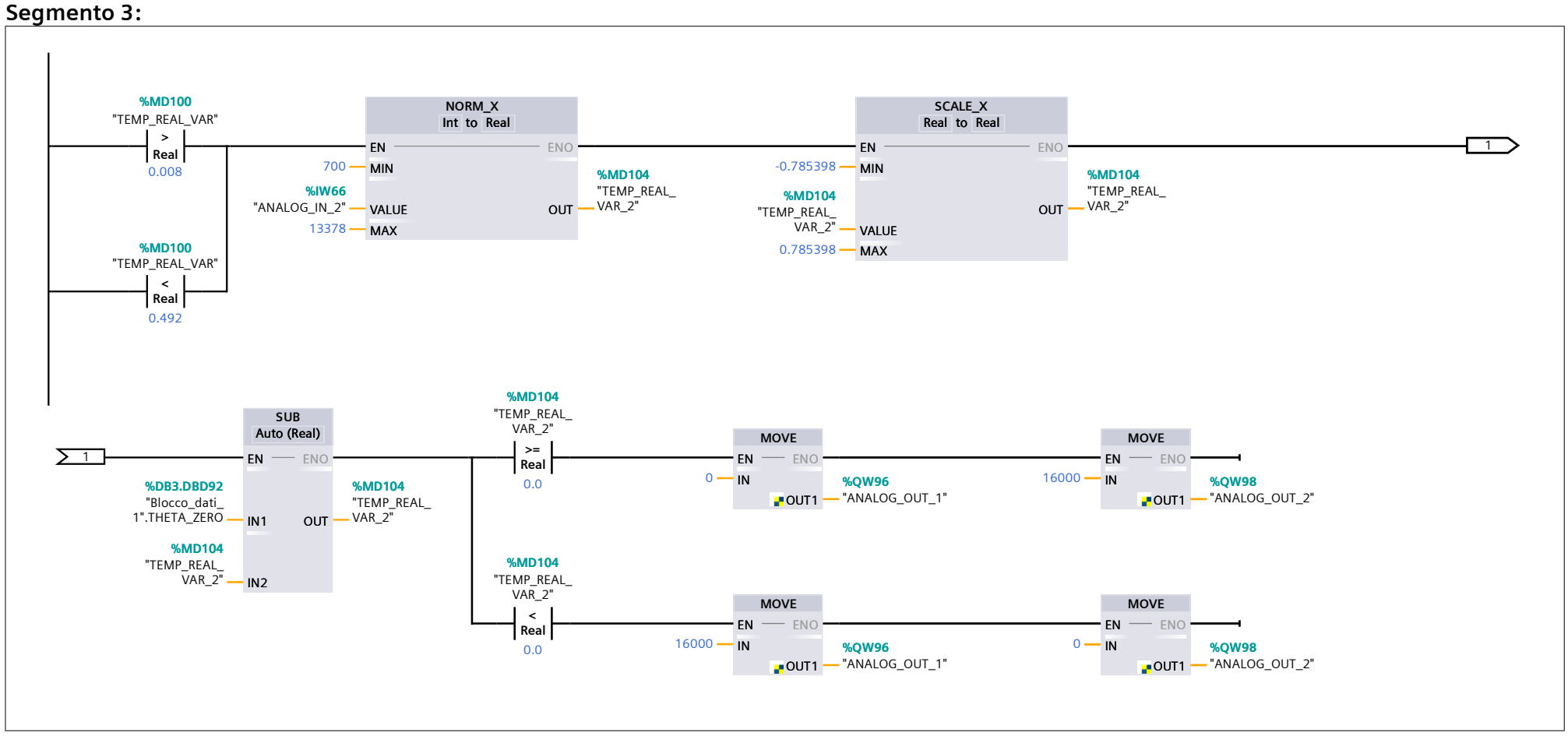


Segmento 2: Bit di start del controllo PID



Segmento 3:

Segmento 3:

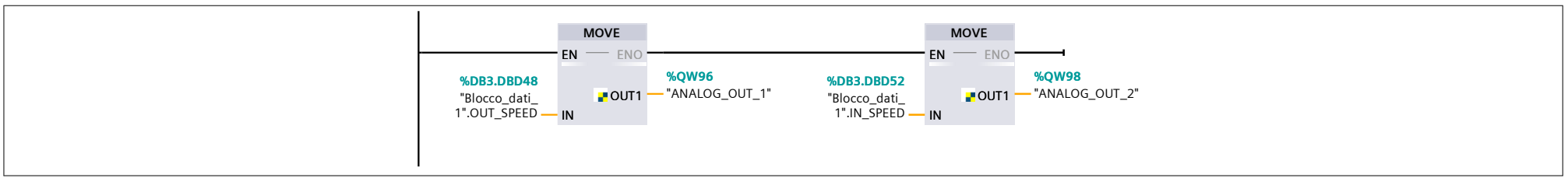


Manual Override [FC1]

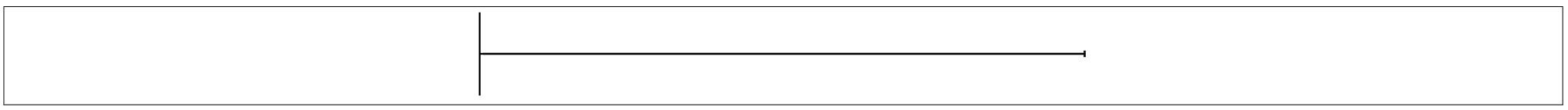
Manual Override Proprietà							
Generale							
Nome	Manual Override	**Numero**	1	**Tipo**	FC	**Linguaggio**	KOP
Numerazione	Automatico						
Informazioni							
Titolo		**Autore**		**Commento**		**Famiglia**	
Versione	0.1	**ID definito dall'utente**					

Nome	Tipo di dati	Valore di default	Controllo	Commento
Input				
Output				
InOut				
Temp				
Constant				
▼ Return				
Manual Override	Void			

Segmento 1:



Segmento 2:

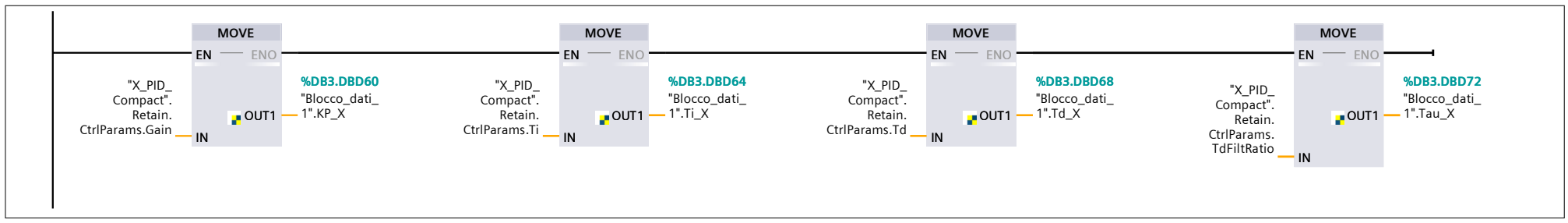


Reset PID First Scan [FC7]

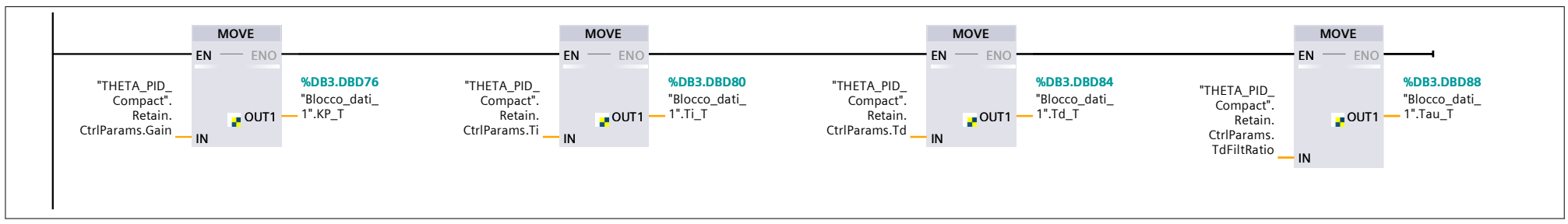
Reset PID First Scan Proprietà							
Generale							
Nome	Reset PID First Scan	**Numero**	7	**Tipo**	FC	**Linguaggio**	KOP
Numerazione	Automatico						
Informazioni							
Titolo		**Autore**		**Commento**		**Famiglia**	
Versione	0.1	**ID definito dall'utente**					

Nome	Tipo di dati	Valore di default	Controllo	Commento
Input				
Output				
InOut				
Temp				
Constant				
▼ Return				
Reset PID First Scan	Void			

Segmento 1:



Segmento 2:

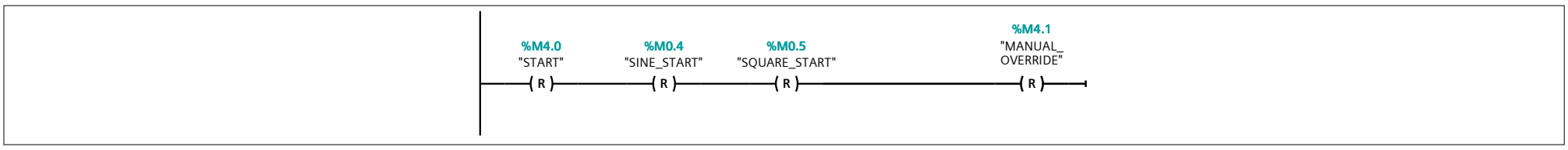


Stop Sistema [FC6]

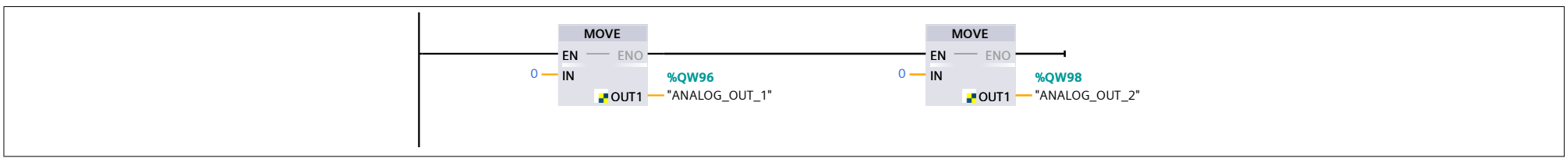
Stop Sistema Proprietà							
Generale							
Nome	Stop Sistema	**Numero**	6	**Tipo**	FC	**Linguaggio**	KOP
Numerazione	Automatico						
Informazioni							
Titolo		**Autore**		**Commento**		**Famiglia**	
Versione	0.1	**ID definito dall'utente**					

Nome	Tipo di dati	Valore di default	Controllo	Commento
Input				
Output				
InOut				
Temp				
Constant				
▼ Return				
Stop Sistema	Void			

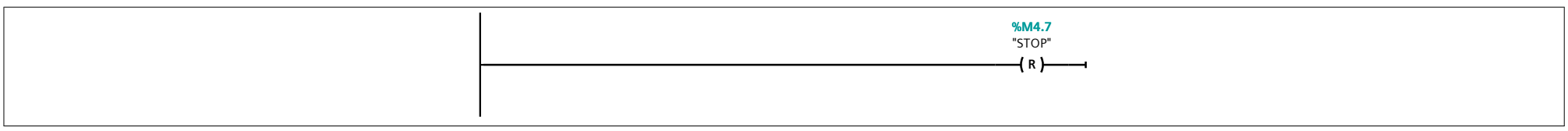
Segmento 1: Bit di start del controllo PID



Segmento 2:



Segmento 3:



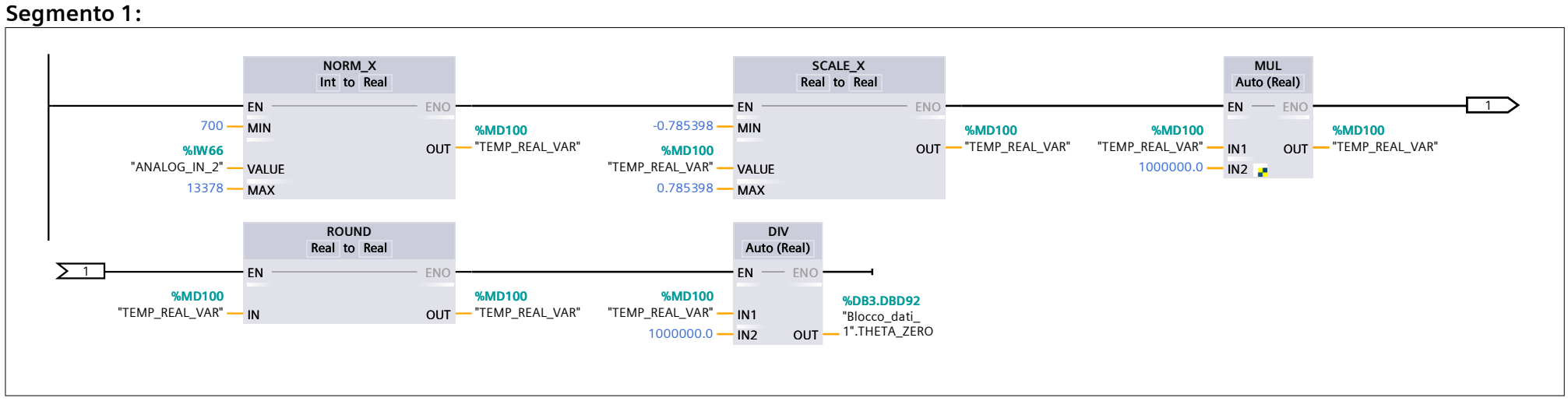
Taratura zero angolo theta [FC5]

Taratura zero angolo theta Proprietà							
Generale							
Nome	Taratura zero angolo theta	**Numero**	5	**Tipo**	FC	**Linguaggio**	KOP
Numerazione	Automatico						
Informazioni							
Titolo		**Autore**		**Commento**		**Famiglia**	
Versione	0.1	**ID definito dall'utente**					

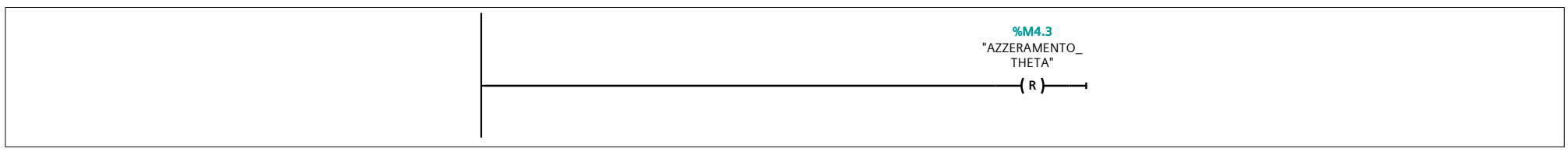
Nome	Tipo di dati	Valore di default	Controllo	Commento
Input				
Output				
InOut				
Temp				
Constant				
▼ Return				
Taratura zero angolo theta	Void			

Segmento 1:

Segmento 1:



Segmento 2: Bit di start procedura azzeramento angolo



Appendice D

D.1 Codice sorgente dell'applicazione P.I.P Control

Si riporta il codice sorgente dell'applicazione P.I.P. Control. La libreria Libnodave impiegata per la gestione della comunicazione con il controllore è distribuita sotto licenza LGPLv2 e liberamente scaricabile alla pagina `http://libnodave.sourceforge.net`.

```
Imports libnodave
Imports Microsoft.VisualBasic

Public Class Form1

    Public IP As String = "192.168.0.1"
    Dim ManOverride As Boolean
    Dim MoveLeft As Boolean
    Dim MoveRight As Boolean
    Dim LastState As Integer
    Dim VelChanged As Boolean

    Public fds As libnodave.daveOSserialType
    Public di As libnodave.daveInterface
    Public dc As libnodave.daveConnection
    Public res As Integer
    Public buf(100) As Byte
    Public localMPI As Integer = 0
    Public rack As Integer = 0
    Public slot As Integer = 1
    Public plcMPI As Integer = 2
    Public Connection As Boolean = False

    Dim Kp_x As Double
    Dim Ti_x As Double
    Dim Td_x As Double
    Dim Tau_x As Double
    Dim Kp_t As Double
    Dim Ti_t As Double
    Dim Td_t As Double
    Dim Tau_t As Double

    Dim StartUp As Boolean

    'M0.0 PC CONNECTION Bit
    'M4.0 PID Control Start Bit
    'M4.1 Manual Override Bit
    'M4.3 Theta Zeroing Procedure Start Bit
    'M4.7 Stop System Bit
    'M4.4 System Initialization
    'M0.4 Sine Wave Signal Start Bit
    'M0.5 Square Wave Signal Staet Bit

    'SETS ACTIVE PAGES AND VARIABLES INITIAL VALUES WHEN FORM LOADS
    Private Sub Form1_Load(sender As Object, e As EventArgs) Handles MyBase.Load
        StartUp = 1
        IPTextBox.Text = IP

        ConnectPage.Enabled = True
        RestartButton.Enabled = False
        PIDPage.Enabled = False
        SquareWavePage.Enabled = False
        SinWavePage.Enabled = False
        StepPage.Enabled = False
        ManOverridePage.Enabled = False
        ManOverride = False
        LastState = 0
        VelChanged = 0
        PIDFormComboBox.Items.AddRange({"Forma Standard", "Forma a costanti di tempo"})
        PIDFormComboBox.SelectedIndex = 1
        Reset_X_PIDParam(0)
        Reset_T_PIDParam(0)
```

```
        ActivatePIDCheckBox.Checked = False
    End Sub

    'STOPS THE CONTROL WHEN FORM CLOSES
    Private Sub Form1_Close(sender As Object, e As EventArgs) Handles MyBase.Closing
        If ConnectButton.Text Is "DISCONNETTI PLC" Then
            Dim Remote_Active As Boolean = ReadBit(-1, "I0.0")
            If Remote_Active Then
                MessageBox.Show("        IL TELECOMANDO E' ATTIVO!" + vbNewLine + "IL BANCO CONTINUERA'...
                        A FUNZIONARE!", "Attenzione!", MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Exclamation)
            End If
            WriteMerker("M0.0", 0)
            WriteMerker("M4.7", 1)
            Reset_X_PIDParam(1)
            Reset_T_PIDParam(1)
            dc.disconnectPLC()
        End If
    End Sub

    'HANDLES PLC CONNECTION PROCEDURE
    Private Sub ConnectButton_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles ConnectButton.Click
        fds.rfd = libnodave.openSocket(102, IP)
        fds.wfd = fds.rfd
        If ConnectButton.Text = "CONNETTI PLC" Then
            If fds.rfd > 0 Then         ' if step 1 is ok
                di = New libnodave.daveInterface(fds, "IF1",
                    0, libnodave.daveProtoISOTCP,
                    libnodave.daveSpeed187k)

                di.setTimeout(1000000)
                res = di.initAdapter
                If res = 0 Then         ' init Adapter is ok
                    ' rack amd slot don't matter in case of MPI
                    dc = New libnodave.daveConnection(di, 0,
                                            rack, slot)
                    res = dc.connectPLC()
                    If res = 0 Then
                        Connection = True
                    End If
                End If
            End If
            If Connection Then
                'dc.start()
                WriteMerker("M0.0", 1)
                RestartButton.Enabled = True
                PIDPage.Enabled = True
                SquareWavePage.Enabled = True
                SinWavePage.Enabled = True
                StepPage.Enabled = True
                ManOverridePage.Enabled = True
                MoveRightButton.Enabled = False
                MoveLeftButton.Enabled = False
                MoveStopButton.Enabled = False
                RightTrackBar.Enabled = False
                LeftTrackBar.Enabled = False
                ThetaZeroingButton.Enabled = False
                ActivatePIDCheckBox.Enabled = False
                IPTextBox.Enabled = False
                ConnectButton.Text = "DISCONNETTI PLC"
            Else
                MsgBox("PLC non trovato all'indirizzo IP selezionato", ...
                     MsgBoxStyle.OkOnly, "Error")
            End If
        Else
            Dim Remote_Active As Boolean = ReadBit(-1, "I0.0")
            If Remote_Active Then
                MessageBox.Show("        IL TELECOMANDO E' ATTIVO!" + vbNewLine + "IL BANCO CONTINUERA'...
                        A FUNZIONARE!", "Attenzione!", MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Exclamation)
            End If
            WriteMerker("M0.0", 0) 'PC DISCONNECTED Bit
            WriteMerker("M4.7", 1) 'Stop System
            WriteFloat(3, 0, CDbl(0.25)) 'Resets x SetPoint
            Reset_X_PIDParam(1)
            Reset_T_PIDParam(1)
            dc.disconnectPLC()
            RestartButton.Enabled = False
            PIDPage.Enabled = False
            SquareWavePage.Enabled = False
            SinWavePage.Enabled = False
            StepPage.Enabled = False
            ManOverridePage.Enabled = False
            IPTextBox.Enabled = True
            ConnectButton.Text = "CONNETTI PLC"
        End If
    End Sub

    'REINITIALISES THE SYSTEM
    Private Sub RestartButton_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles RestartButton.Click
        WriteMerker("M0.4", 0)
        WriteMerker("M0.5", 0)
        WriteMerker("M4.0", 0)
        WriteMerker("M4.1", 0)
        WriteMerker("M4.4", 1)
```

```
End Sub

'HANDLES PID FORM SELECTION
Private Sub PIDFormComboBox_SelectedIndexChanged(sender As Object, e As EventArgs) Handles...
        PIDFormComboBox.SelectedIndexChanged()

    If StartUp Then
        Label24.Text = "Kp:"
        Label25.Text = "Ti:"
        Label26.Text = "Td:"
        Label27.Text = "Tau:"
        Label30.Text = "Kp:"
        Label31.Text = "Ti:"
        Label32.Text = "Td:"
        Label33.Text = "Tau:"
        StartUp = 0
        Return
    End If
    If PIDFormComboBox.SelectedIndex = 1 Then
        Label24.Text = "Kp:"
        Label25.Text = "Ti:"
        Label26.Text = "Td:"
        Label27.Text = "Tau:"
        Label30.Text = "Kp:"
        Label31.Text = "Ti:"
        Label32.Text = "Td:"
        Label33.Text = "Tau:"
        Dim Kp_temp As Double = Convert.ToDouble(KpX.Text.Replace("."c, ","c))
        Dim Ti_temp As Double = Kp_temp / Convert.ToDouble(TiX.Text.Replace("."c, ","c))
        Dim Td_temp As Double = Convert.ToDouble(TdX.Text.Replace("."c, ","c)) / Kp_temp
        Dim Tau_temp As Double = Convert.ToDouble(TauX.Text.Replace("."c, ","c)) / Td_temp
        KpX.Text = Kp_temp.ToString
        TiX.Text = Ti_temp.ToString
        TdX.Text = Td_temp.ToString
        TauX.Text = Tau_temp.ToString

        Kp_temp = Convert.ToDouble(KpT.Text.Replace("."c, ","c))
        Ti_temp = Kp_temp / Convert.ToDouble(TiT.Text.Replace("."c, ","c))
        Td_temp = Convert.ToDouble(TdT.Text.Replace("."c, ","c)) / Kp_temp
        Tau_temp = Convert.ToDouble(TauT.Text.Replace("."c, ","c)) / Td_temp
        KpT.Text = Kp_temp.ToString
        TiT.Text = Ti_temp.ToString
        TdT.Text = Td_temp.ToString
        TauT.Text = Tau_temp.ToString

    Else
        Label24.Text = "Kp:"
        Label25.Text = "Ki:"
        Label26.Text = "Kd:"
        Label27.Text = "Tf:"
        Label30.Text = "Kp:"
        Label31.Text = "Ki:"
        Label32.Text = "Kd:"
        Label33.Text = "Tf:"
        Dim Kp_temp As Double = Convert.ToDouble(KpT.Text.Replace("."c, ","c))
        Dim Ki_temp As Double = Kp_temp / Convert.ToDouble(TiT.Text.Replace("."c, ","c))
        Dim Kd_temp As Double = Convert.ToDouble(TdT.Text.Replace("."c, ","c)) * Kp_temp
        Dim Tf_temp As Double = Convert.ToDouble(TauT.Text.Replace("."c, ","c)) * Kd_temp / Kp_temp
        KpT.Text = Kp_temp.ToString
        TiT.Text = Ki_temp.ToString
        TdT.Text = Kd_temp.ToString
        TauT.Text = Tf_temp.ToString

        Kp_temp = Convert.ToDouble(KpX.Text.Replace("."c, ","c))
        Ki_temp = Kp_temp / Convert.ToDouble(TiX.Text.Replace("."c, ","c))
        Kd_temp = Convert.ToDouble(TdX.Text.Replace("."c, ","c)) * Kp_temp
        Tf_temp = Convert.ToDouble(TauX.Text.Replace("."c, ","c)) * Kd_temp / Kp_temp
        KpX.Text = Kp_temp.ToString
        TiX.Text = Ki_temp.ToString
        TdX.Text = Kd_temp.ToString
        TauX.Text = Tf_temp.ToString
    End If
End Sub

'SENDS NEW PID PARAMETERS TO PLC
Private Sub SendXPIDButton_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles SendXPIDButton.Click
    If PIDFormComboBox.SelectedIndex = 1 Then

        Kp_x = Convert.ToDouble(KpX.Text.Replace("."c, ","c))
        WriteFloat(3, 60, Kp_x)

        Ti_x = Convert.ToDouble(TiX.Text.Replace("."c, ","c))
        WriteFloat(3, 64, Ti_x)

        Td_x = Convert.ToDouble(TdX.Text.Replace("."c, ","c))
        WriteFloat(3, 68, Td_x)

        Tau_x = Convert.ToDouble(TauX.Text.Replace("."c, ","c))
        WriteFloat(3, 72, Tau_x)
    Else
        Dim Kp_temp As Double = Convert.ToDouble(KpX.Text.Replace("."c, ","c))
        Dim Ti_temp As Double = Kp_temp / Convert.ToDouble(TiX.Text.Replace("."c, ","c))
        Dim Td_temp As Double = Convert.ToDouble(TdX.Text.Replace("."c, ","c)) / Kp_temp
```

```
        Dim Tau_temp As Double = Convert.ToDouble(TauX.Text.Replace("."c, ","c)) / Td_temp

        Kp_x = Kp_temp
        WriteFloat(3, 60, Kp_x)

        Ti_x = Ti_temp
        WriteFloat(3, 64, Ti_x)

        Td_x = Td_temp
        WriteFloat(3, 68, Td_x)

        Tau_x = Tau_temp
        WriteFloat(3, 72, Tau_x)
    End If
    WriteMerker("M4.5", 1)
End Sub

Private Sub SendTPIDButton_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles SendTPIDButton.Click

    If PIDFormComboBox.SelectedIndex = 1 Then
        Kp_t = Convert.ToDouble(KpT.Text.Replace("."c, ","c))
        WriteFloat(3, 76, Kp_t)

        Ti_t = Convert.ToDouble(TiT.Text.Replace("."c, ","c))
        WriteFloat(3, 80, Ti_t)

        Td_t = Convert.ToDouble(TdT.Text.Replace("."c, ","c))
        WriteFloat(3, 84, Td_t)

        Tau_t = Convert.ToDouble(TauT.Text.Replace("."c, ","c))
        WriteFloat(3, 88, Tau_t)

    Else
        Dim Kp_temp As Double = Convert.ToDouble(KpT.Text.Replace("."c, ","c))
        Dim Ti_temp As Double = Kp_temp / Convert.ToDouble(TiT.Text.Replace("."c, ","c))
        Dim Td_temp As Double = Convert.ToDouble(TdT.Text.Replace("."c, ","c)) / Kp_temp
        Dim Tau_temp As Double = Convert.ToDouble(TauT.Text.Replace("."c, ","c)) / Td_temp

        Kp_t = Kp_temp
        WriteFloat(3, 76, Kp_t)

        Ti_t = Ti_temp
        WriteFloat(3, 80, Ti_t)

        Td_t = Td_temp
        WriteFloat(3, 84, Td_t)

        Tau_t = Tau_temp
        WriteFloat(3, 88, Tau_t)
    End If
    WriteMerker("M4.6", 1)

End Sub

'RESET X PID PARAMETERS
Private Sub ResetXPIDButton_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles ResetXPIDButton.Click
    Reset_X_PIDParam(1)
End Sub

'RESET THETA PID PARAMETERS
Private Sub ResetTPIDButton_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles ResetTPIDButton.Click
    Reset_T_PIDParam(1)
End Sub

'ACTIVATES SQUARE WAVE GENERATOR IN PLC
Private Sub SquareButton_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles SquareButton.Click
    If SquareButton.Text Is "START" Then
        SquareButton.Text = "STOP"
        SquareAmpNumericUpDown.Enabled = False
        SquareFreqNumericUpDown.Enabled = False
        WriteFloat(3, 8, CDbl(0.25 + SquareAmpNumericUpDown.Value / 1000))
        WriteFloat(3, 12, CDbl(0.25 - SquareAmpNumericUpDown.Value / 1000))
        WriteDInt(3, 16, CShort(SquareFreqNumericUpDown.Value / 2))
        ConnectPage.Enabled = False
        SinWavePage.Enabled = False
        StepPage.Enabled = False
        ManOverridePage.Enabled = False
        WriteMerker("M0.5", 1)
    Else
        WriteMerker("M0.5", 0)
        WriteFloat(3, 0, 0.25) 'RESETS X SET POSITION
        SquareButton.Text = "START"
        SquareAmpNumericUpDown.Enabled = True
        SquareFreqNumericUpDown.Enabled = True
        ConnectPage.Enabled = True
        SinWavePage.Enabled = True
        StepPage.Enabled = True
        ManOverridePage.Enabled = True
    End If
End Sub

'ACTIVATES SINE WAVE GENERTOR IN PLC
Private Sub SinButton_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles SinButton.Click
```

```
    If SinButton.Text Is "START" Then
        SinButton.Text = "STOP"
        SinAmpNumericUpDown.Enabled = False
        SinFreqNumericUpDown.Enabled = False
        WriteFloat(3, 20, CDbl(SinAmpNumericUpDown.Value / 1000))
        WriteDInt(3, 24, CInt(SinFreqNumericUpDown.Value))
        WriteDInt(3, 28, CShort(SinFreqNumericUpDown.Value / 1000))
        WriteFloat(3, 32, CDbl(6.28 / (SinFreqNumericUpDown.Value / 1000)))
        ConnectPage.Enabled = False
        SquareWavePage.Enabled = False
        StepPage.Enabled = False
        ManOverridePage.Enabled = False
        WriteMerker("M0.4", 1)
    Else
        WriteMerker("M0.4", 0)
        WriteFloat(3, 0, 0.25) 'RESETS X SET POSITION
        SinButton.Text = "START"
        SinAmpNumericUpDown.Enabled = True
        SinFreqNumericUpDown.Enabled = True
        ConnectPage.Enabled = True
        SquareWavePage.Enabled = True
        StepPage.Enabled = True
        ManOverridePage.Enabled = True
    End If
End Sub

'SENDS NEW X SETPOINT TO PLC
Private Sub StepButton_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles StepButton.Click
    WriteFloat(3, 0, CDbl(StepAmpNumericUpDown.Value / 1000))
End Sub

'ACTIVATES MANUAL CONTROL OF PENDULUM POSITION
Private Sub ManOverrideButton_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles ManOverrideButton.Click
    If ManOverrideButton.Text Is "START" Then
        ManOverrideButton.Text = "STOP"
        ManOverride = True
        WriteMerker("M4.0", 0)
        WriteMerker("M4.1", 1)
        Timer1.Enabled = True
        ConnectPage.Enabled = False
        SquareWavePage.Enabled = False
        SinWavePage.Enabled = False
        StepPage.Enabled = False
        MoveRightButton.Enabled = True
        MoveLeftButton.Enabled = True
        MoveStopButton.Enabled = True
        LeftTrackBar.Enabled = True
        RightTrackBar.Enabled = True
        ThetaZeroingButton.Enabled = True
        ActivatePIDCheckBox.Enabled = True
    Else
        Timer1.Enabled = False
        ManOverride = False
        WriteDInt(3, 48, CShort(0))
        WriteDInt(3, 52, CShort(0))
        WriteMerker("M4.1", 0)
        If ActivatePIDCheckBox.Checked Then
            WriteMerker("M4.0", 1)
        End If
        ManOverrideButton.Text = "START"
        ConnectPage.Enabled = True
        SquareWavePage.Enabled = True
        SinWavePage.Enabled = True
        StepPage.Enabled = True
        MoveRightButton.Enabled = False
        MoveLeftButton.Enabled = False
        MoveStopButton.Enabled = False
        LeftTrackBar.Enabled = False
        RightTrackBar.Enabled = False
        ThetaZeroingButton.Enabled = False
        ActivatePIDCheckBox.Enabled = False
        MoveRight = False
        MoveLeft = False
    End If
End Sub

Private Sub Timer1_Tick(sender As Object, e As EventArgs) Handles Timer1.Tick
    If ManOverride Then
        If (LastState <> (((-1) * Convert.ToInt16(MoveLeft)) + Convert.ToInt16(MoveRight)))...
                Or VelChanged Then
            If MoveRight Then
                WriteDInt(3, 48, CInt(27648 * RightTrackBar.Value / 12))
                WriteDInt(3, 52, CInt(0))
                LastState = 1
                VelChanged = 0
            ElseIf MoveLeft Then
                WriteDInt(3, 48, CInt(0))
                WriteDInt(3, 52, CInt(27648 * LeftTrackBar.Value / 12))
                LastState = -1
                VelChanged = 0
            Else
                WriteDInt(3, 48, CInt(0))
                WriteDInt(3, 52, CInt(0))
```

```
                LastState = 0
                VelChanged = 0
            End If
        End If
    End If
End Sub

Private Sub MoveRightButton_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles MoveRightButton.Click
    MoveRight = True
    MoveLeft = False
End Sub

Private Sub MoveLeftButton_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles MoveLeftButton.Click
    MoveLeft = True
    MoveRight = False
End Sub

Private Sub MoveStopButton_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles MoveStopButton.Click
    MoveLeft = False
    MoveRight = False
End Sub

'SETS THE ZERO ON THE THETA AXIS
Private Sub ThetaZeroingButton_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles ThetaZeroingButton.Click
    WriteMerker("M4.3", 1)
End Sub

Private Sub RightTrackBar_Scroll(sender As Object, e As EventArgs) Handles RightTrackBar.Scroll
    VelChanged = 1
End Sub

Private Sub LeftTrackBar_Scroll(sender As Object, e As EventArgs) Handles LeftTrackBar.Scroll
    VelChanged = 1
End Sub

'RESET x PID PARAMETERS
Private Sub Reset_X_PIDParam(Send As Boolean)
    Kp_x = 0.045
    Ti_x = 5.0
    Td_x = 2.0
    Tau_x = 0.045
    If PIDFormComboBox.SelectedIndex = 1 Then
        KpX.Text = Kp_x.ToString("R")
        TiX.Text = Ti_x.ToString("R")
        TdX.Text = Td_x.ToString("R")
        TauX.Text = Tau_x.ToString("R")
    Else
        KpX.Text = Kp_x.ToString("R")
        TiX.Text = (Kp_x / Ti_x).ToString("R")
        TdX.Text = (Kp_x * Td_x).ToString("R")
        TauX.Text = (Tau_x * Td_x).ToString("R")
    End If
    If Send Then
        WriteFloat(3, 60, Kp_x)
        WriteFloat(3, 64, Ti_x)
        WriteFloat(3, 68, Td_x)
        WriteFloat(3, 72, Tau_x)
        WriteMerker("M4.5", 1)
    End If
End Sub

'RESET Theta PID PARAMETERS
Private Sub Reset_T_PIDParam(Send As Boolean)
    Kp_t = 7.735
    Ti_t = 0.319
    Td_t = 0.0646
    Tau_t = 0.0141
    If PIDFormComboBox.SelectedIndex = 1 Then
        KpT.Text = Kp_t.ToString("R")
        TiT.Text = Ti_t.ToString("R")
        TdT.Text = Td_t.ToString("R")
        TauT.Text = Tau_t.ToString("R")
    Else
        KpT.Text = Kp_t.ToString("R")
        TiT.Text = (Kp_t / Ti_t).ToString("R")
        TdT.Text = (Kp_t * Td_t).ToString("R")
        TauT.Text = (Tau_t * Td_t).ToString("R")
    End If
    If Send Then
        WriteFloat(3, 76, Kp_t)
        WriteFloat(3, 80, Ti_t)
        WriteFloat(3, 84, Td_t)
        WriteFloat(3, 88, Tau_t)
        WriteMerker("M4.6", 1)
    End If

End Sub

'HANDLES MERKER WRITING TO PLC
Private Sub WriteMerker(Merker As String, Par As Boolean)
    'Suppose we want to set M20.3
    Dim Adr As Integer
```

```
        'Transform M20.3 -> 20.3
        If Merker <> String.Empty Then
            Merker = Merker.Remove(0, 1)
        Else
            Return
        End If
        Dim SubStrings() As String = Split(Merker, ".")
        Dim InputNum As Integer = Convert.ToInt32(SubStrings(0)) '20
        Dim BitNum As Integer = Convert.ToInt32(SubStrings(1))    '3

        If Par Then
            buf(0) = 255 'write 1
        Else
            buf(0) = 0 'write 0
        End If
        Adr = InputNum * 8 + BitNum

        'write Merke M20.3
        res = dc.writeBits(libnodave.daveFlags, 0, Adr, 1, buf)

    End Sub

    'HANDLES INT WRITING TO PLC
    Private Sub WriteInt(DB As Integer, Mem As Integer, Var As Short)
        If DB = 0 Then
            buf = BitConverter.GetBytes(libnodave.daveSwapIed_16(Var))
            res = dc.writeBytes(libnodave.daveFlags, DB, Mem, 2, buf)
        Else
            buf = BitConverter.GetBytes(libnodave.daveSwapIed_16(Var))
            res = dc.writeBytes(libnodave.daveDB, DB, Mem, 2, buf)
        End If

    End Sub

    'HANDLES DINT WRITING TO PLC
    Private Sub WriteDInt(DB As Integer, Mem As Integer, Var As Int32)
        If DB = 0 Then
            buf = BitConverter.GetBytes(libnodave.daveSwapIed_32(Var))
            res = dc.writeBytes(libnodave.daveFlags, DB, Mem, 4, buf)
        Else
            buf = BitConverter.GetBytes(libnodave.daveSwapIed_32(Var))
            res = dc.writeBytes(libnodave.daveDB, DB, Mem, 4, buf)
        End If
    End Sub

    'HANDLES FLOAT WRITING TO PLC
    Private Sub WriteFloat(DB As Integer, Mem As Integer, Var As Double)
        If DB = 0 Then
            buf = BitConverter.GetBytes(libnodave.daveToPLCfloat(Var))
            res = dc.writeBytes(libnodave.daveFlags, DB, Mem, 4, buf)
        Else
            buf = BitConverter.GetBytes(libnodave.daveToPLCfloat(Var))
            res = dc.writeBytes(libnodave.daveDB, DB, Mem, 4, buf)
        End If
    End Sub

    'HANDLES BYTE WRITING TO PLC
    Private Sub WriteByte(DB As Integer, Mem As Integer, Var As Byte)
        If DB = 0 Then
            buf(0) = Var
            res = dc.writeBytes(libnodave.daveFlags, DB, Mem, 1, buf)
        Else
            buf(0) = Var
            res = dc.writeBytes(libnodave.daveDB, DB, Mem, 1, buf)
        End If
    End Sub

    'HANDLES READING BYTE FROM PLC
    Private Function ReadBit(DB As Integer, Mem As String) As Integer
        'Suppose we want to read M20.3
        Dim Adr As Integer

        'Transform M20.3 -> 20.3
        If Mem <> String.Empty Then
            Mem = Mem.Remove(0, 1)
        Else
            Return -1
        End If
        Dim SubStrings() As String = Split(Mem, ".")
        Dim InputNum As Integer = Convert.ToInt32(SubStrings(0)) '20
        Dim BitNum As Integer = Convert.ToInt32(SubStrings(1))    '3
        Adr = InputNum * 8

        If DB = 0 Then
            res = dc.readBytes(libnodave.daveFlags, 0, Adr, 1, buf)
        ElseIf DB = -1 Then
            res = dc.readBytes(libnodave.daveInputs, 0, Adr, 1, buf)
        Else
            res = dc.readBytes(libnodave.daveDB, DB, Adr, 1, buf)
        End If

        If res = 0 Then
            Dim ans As Byte = dc.getU8()  'Reads 1 byte
```

```
            Return CheckBit(ans, BitNum)
        Else
            Return -1
        End If
    End Function

    'HANDLES READING BIT FROM PLC
    Private Function CheckBit(InByte As Byte, Bit As Integer) As Integer
        'Is a n'th bit in InByte 1 of not?
        Return ((InByte And (2 ^ Bit)) > 0)
    End Function
End Class
```

Appendice E

E.1 Listati Matlab

Si riportano di seguito i listati Matlab scritti dal candidato ed utilizzati durante la fase di analisi del problema linearizzato come presentato nel Capitolo 3.

E.1.1 Main:

```
%clear all
%close all

%% Dati
m=0.4;
Mc=1.8;
Mp=0.4;
b=22;
%lmim=0.4, lmax=0.8
l=0.5;
p_supply=6*10^5;
p_a=10^5;
A=pi*0.016^2/4;
a=A-pi*0.006^2/4;
VA0=A*0.25;
VB0=a*0.25;
CA=p_supply*A/(2*VA0);
CB=p_supply*a/(2*VB0);
kv=1;
C=14.3*kv;
C=C/(1000*60*10^5);
K=C*1.29/(1-0.3);
KA=K*p_a*p_supply/(2*1.204*VA0);
KB=K*p_a*p_supply/(2*1.204*VB0);
g=9.81;
%Calcolo Conduttnza della valvola
kv=1.0; %fornita da catalogo
Kv=kv/16.66; %m^3/h ANR

C_valve=16.66*(14.3*Kv);

%Theta PID controller
Kp_theta = 2.09;
Ki_theta = 6.31;
Kd_theta = 0.103;
Tf_theta = 0.000875;

%x PID controller
Kp_x=-0.000802;
Ki_x=-4.68e-06;
Kd_x=-0.0306;
Tf_x= 0.00875;

%% Calcolo State Space e Transfer Func
%v=[x, x_d, t, t_d, p_A, p_B]
s=tf('s');
SM=[0,1,0,0,0,0;...
0,-b/(Mc+Mp),m*g/(Mc+Mp),0,A/(Mc+Mp), -a/(Mc+Mp);...
0,0,0,1,0,0;...
0,-b/(l*(Mc+Mp)),g*(Mc+m+Mp)/(l*(Mc+Mp)),0,A/(l*(Mc+Mp)), -a/(l*(Mc+Mp));...
0,-CA,0,0,0,0;...
0,CB,0,0,0,0];
B=[0;0;0;KA;-KB];
C=[1,0,0,0,0,0;...
      0,0,1,0,0,0;...
      0,0,0,0,1,0;...
      0,0,0,0,0,1];
D=[0;0;0;0];
[NUM,DEN]=ss2tf(SM,B,C,D);
```

```
Gux=minreal(tf(NUM(1,:),DEN), 1e-8);
Gut=minreal(tf(NUM(2,:),DEN), 1e-12);
Gtx=minreal(Gux/Gut, 1e-5);
GupA=minreal(tf(NUM(3,:),DEN), 1e-8);
GupB=minreal(tf(NUM(4,:),DEN), 1e-8);

QA=A*CA+a*CB;
TT=(KA*A+KB*a)*s/((Mc+Mp)*l*s^4+b*l*s^3-(m+Mc+Mp)*g*s^2+QA*l*s^2-b*g*s-QA*g);
Gtx_easy=(l*s^2-g)/s^2;

%% Controllore
Ct=pid(Kp_theta, Ki_theta, Kd_theta, Tf_theta);
Cx=pid(Kp_x, Ki_x, Kd_x, Tf_x);
%%
Gutcl=feedback(Ct*TT,1);
Guxol=Gutcl*Gtx_easy;
%Guxcl=feedback(Cx*Guxol, Gain_x);

%% Plotting Results
figure
plot(eigs(SM),'xb')
grid minor
hold on
plot(linspace(-8,8,100),zeros(1,100),'--k')
plot(zeros(1,100),linspace(-15,15,100),'--k')
xlabel('Re')
ylabel('Im')
title('Autovalori della matrice di transizione degli stati A',...
    'interpreter','latex', 'FontSize', 14)
%%
figure()
bode(TT)
grid minor
title('Diagramma di Bode della funzione $G{u\theta}$', 'interpreter',...
    'latex', 'FontSize', 14)
%%
figure()
margin(Ct*TT)
grid on
title('Diagramma di Bode della funzione $C_{\theta} G_{u \theta}$',...
    'interpreter', 'latex', 'FontSize', 14)
%%
figure()
nyquist(TT)
title('Diagramma di Nyquist della funzione $G_{u \theta}$', 'interpreter',...
    'latex', 'FontSize', 14)
%%
figure()
nyquist(Ct*TT)
title('Diagramma di Nyquist in anello aperto della funzione $C_{\theta}G_{u \theta}$',...
    'interpreter', 'latex', 'FontSize', 14)
print -depsc Nyquist_PID.eps
%%
figure
bode(TT*Gtx_easy)
grid on
grid minor
title('Diagramma di Bode della funzione $G_{u x}$','interpreter','latex')
%%
figure
bode(Gtx_easy)
grid minor
title('Diagramma di Bode della funzione $G_{t x}$','interpreter','latex')
%%
figure()
bode(Guxol)
grid minor
title('Diagramma di bode dell''anello esterno non controllato',...
    'interpreter','latex')
%%
figure
margin(Cx*Guxol)
grid on
title('Diagramma di Bode della funzione $C_{x} G_{u x}$', 'interpreter',...
    'latex', 'FontSize', 14)
%%
figure()
nyquist(Guxol)
title('Diagramma di Nyquist della funzione $G_{ux}$', 'interpreter',...
    'latex', 'FontSize', 14)
print -depsc Nyquist_Gux.eps
%%
figure
nyquist(Cx*Guxol)
title('Diagramma di Nyquist in anello aperto della funzione $C_{x} G_{u x}$',...
    'interpreter', 'latex', 'FontSize', 14)
print -depsc Nyquist_PIDx.eps
%% PLOT CONTROLLORI
%KP ONLY
figure
nyquist(TT)
hold on
%nyquist(1.5*TT)
```

```
nyquist(2.0*TT)
%nyquist(2.5*TT)
nyquist(3*TT)
legend({'$k_{p}=1.0$', '$k_{p}=2$', '$k_{p}=3$'}, 'Interpreter', 'latex')
title('Diagrammi di Nyquist della funzione $k_p G_{u \theta}$',...
    'interpreter', 'latex', 'FontSize', 14)

%% PD ONLY
Ct_pd=pid(1.5, 0.0, 0.8, 0.05);
nyquist(Ct_pd*TT)
title('Diagramma di Nyquist della funzione $C_{PD} G_{u \theta}$',...
    'interpreter', 'latex', 'FontSize', 12)
%% PI ONLY
figure()
Ct_pi=pid(1.0, 6.5, 0.0, 0.0);
nyquist(Ct_pi*TT)
title('Diagramma di Nyquist della funzione $C_{PI} G_{u \theta}$',...
    'interpreter', 'latex', 'FontSize', 14)

figure()
Ct_pi=pid(1.0, 6.5, 0.0, 0.0);
nyquist(Ct_pi*TT)
hold on
Ct_pi=pid(1.0, 5.0, 0.0, 0.0);
nyquist(Ct_pi*TT)
Ct_pi=pid(1.0, 3.0, 0.0, 0.0);
nyquist(Ct_pi*TT)
Ct_pi=pid(3.0, 1.5, 0.0, 0.0);
nyquist(Ct_pi*TT, '--k')
title('Diagrammi di Nyquist della funzione $C_{PI} G_{u \theta}$',...
    'interpreter', 'latex', 'FontSize', 14)
%%
figure()
Ct_pi=pid(1.0, 6.5, 0.0, 0.0);
margin(Ct_pi*TT)
grid on
title('Diagramma di Bode con controllore PI, $k_p=1.0$ $k_i=6.5$',...
    'interpreter', 'latex', 'FontSize', 14)
```

E.1.2 Calcolo sfasamento:

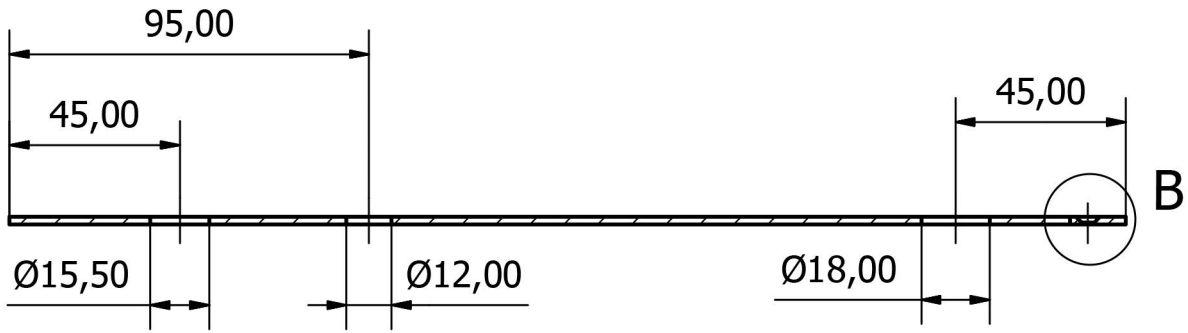
```
function [ sfasamento ] = Calcolo_Sfasamento( A, T, X_SET, X_FB, t)
f=@(x) 0.25+A*sin(2*pi*1/T*t+x);
err_SET=@(x) sum((X_SET-f(x)).^2);
err_FB=@(x)  sum((X_FB-f(x)).^2);

phi_SET=fminsearch(@(x) err_SET(x), 0);
phi_FB=fminsearch(@(x) err_FB(x), phi_SET);
sfasamento=(phi_SET-phi_FB)*180/pi
figure
subplot(2,1,1)
plot(t, X_SET)
hold on
plot(t, f(phi_SET))
subplot(2,1,2)
plot(t, X_FB)
hold on
plot(t, f(phi_FB))
end
```

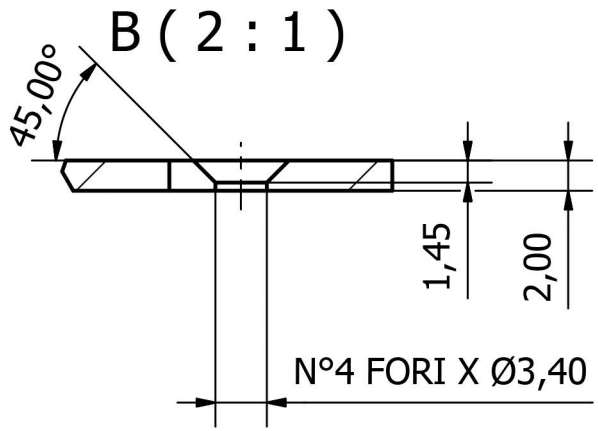
Appendice F

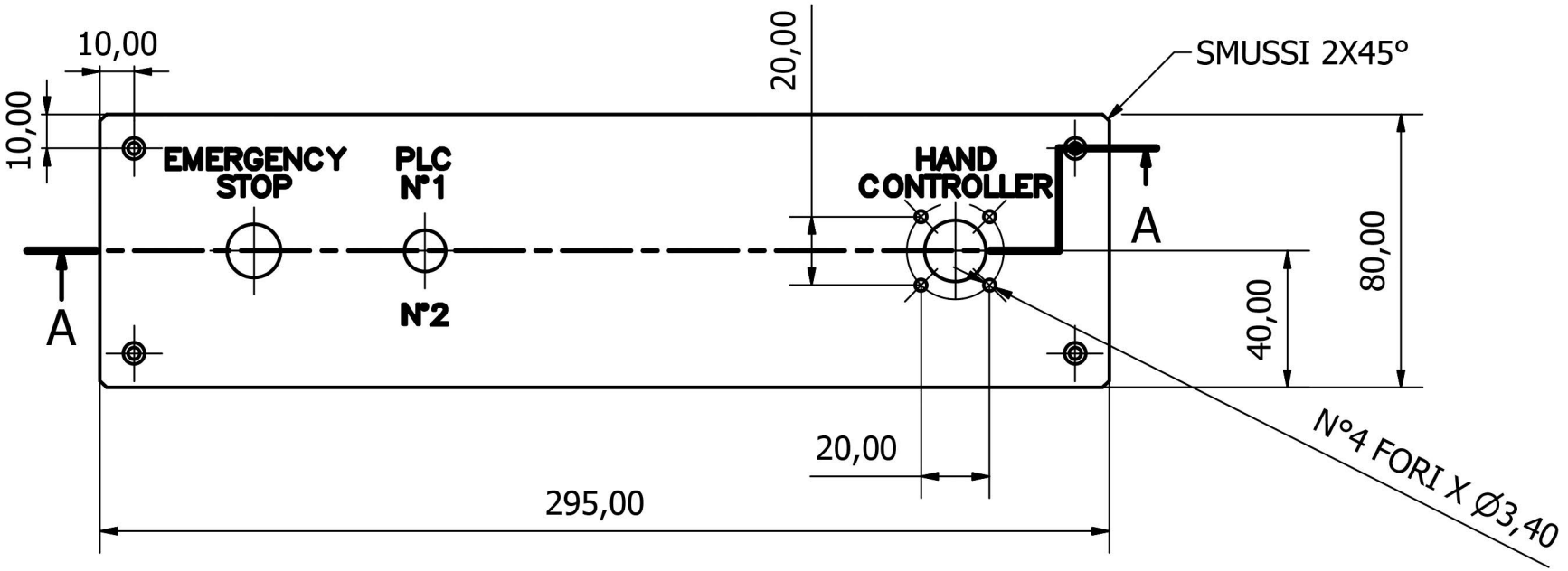
F.1 Disegni Tecnici

Nelle pagine seguenti vengono allegati i disegni tecnici utilizzati per la produzione dei componenti progettati dal candidato.



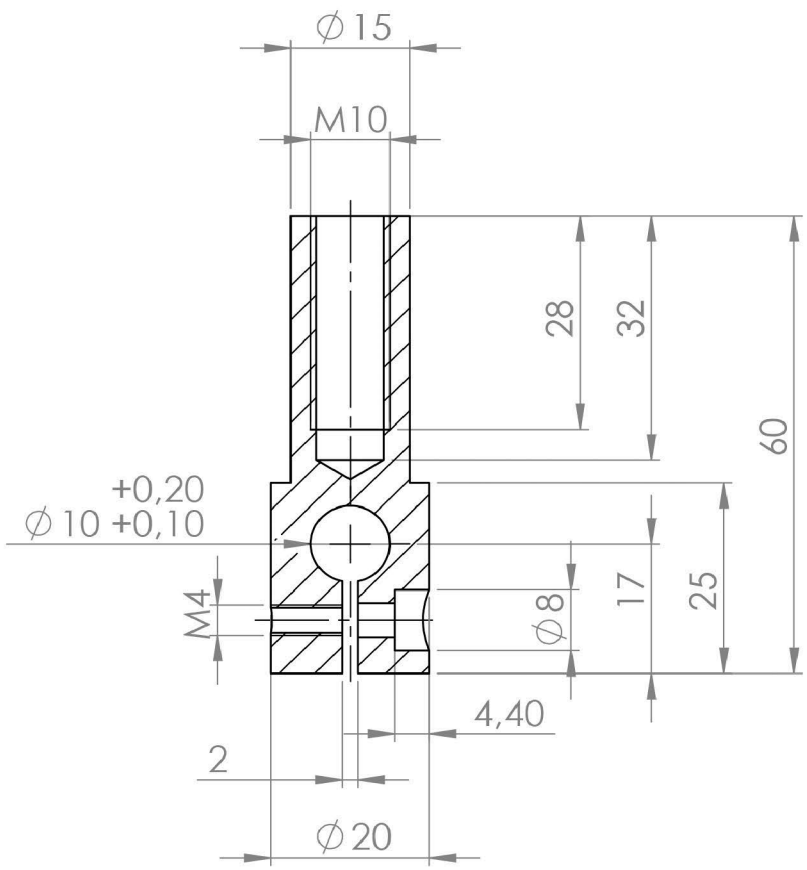
A-A



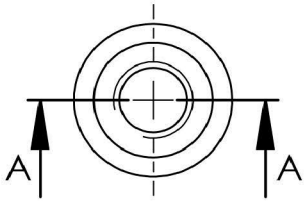


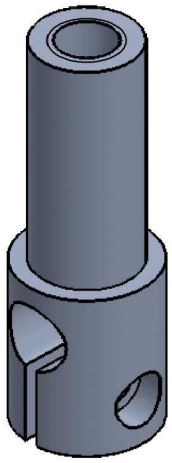
Designed by	Checked by	Approved by	Date		Date	Scale
Marco Pontin					29/03/2018	1:2

	Pannello di controllo		
Pannello di controllo		Edition	Sheet 1 / 1



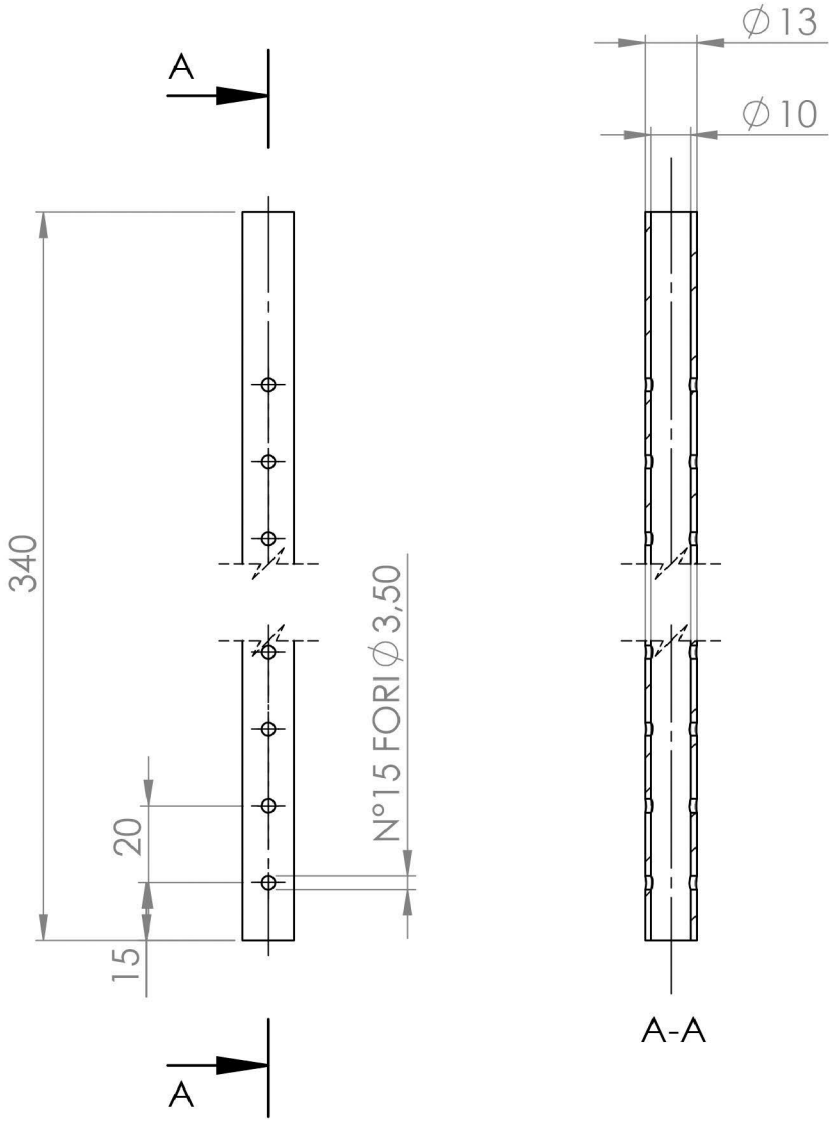
A-A





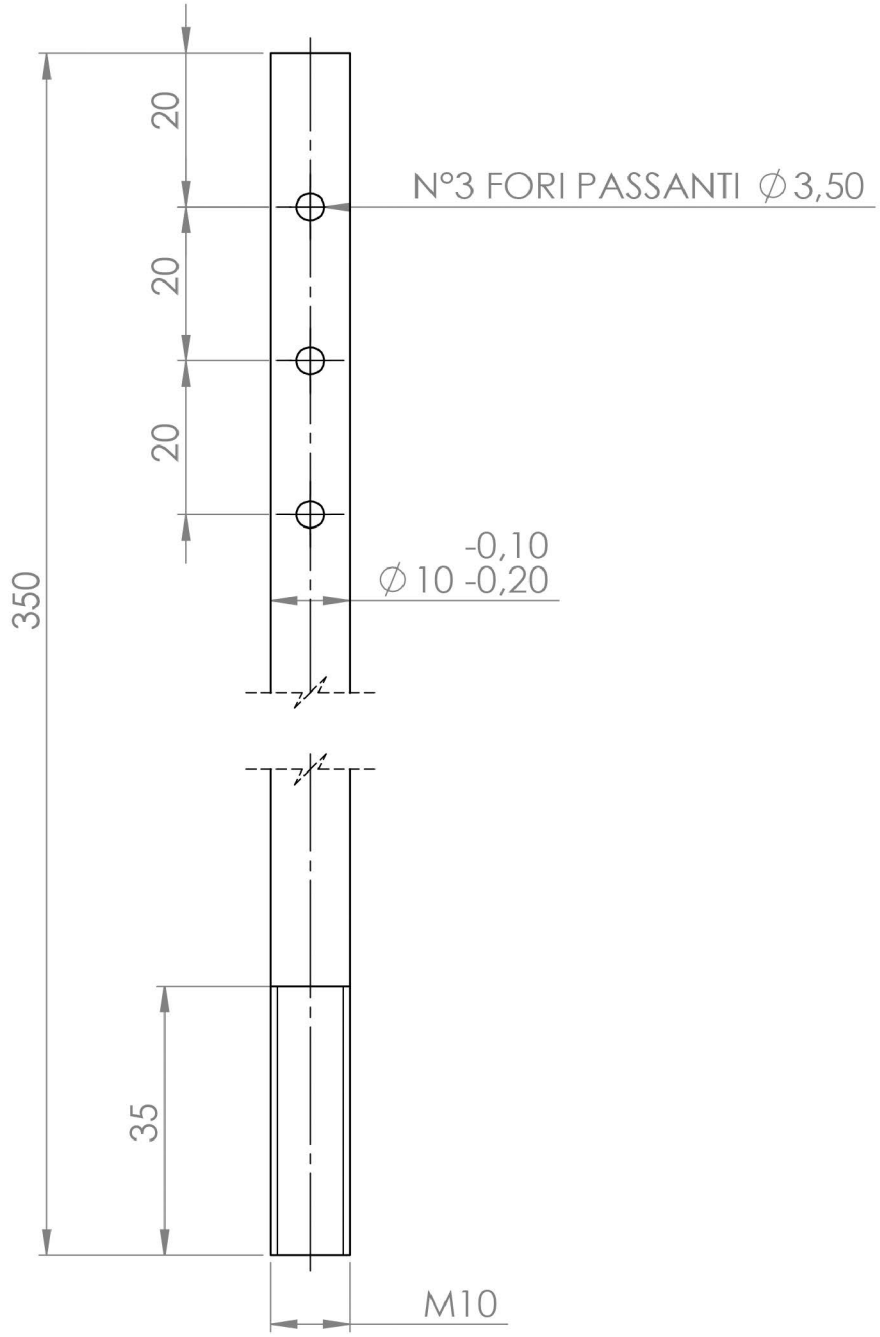
Designed by	Checked by	Approved by	Date		Date	Scale
Marco Pontin					29/03/2018	1:1

Montante	Montante		
		Edition	Sheet
			1 / 1



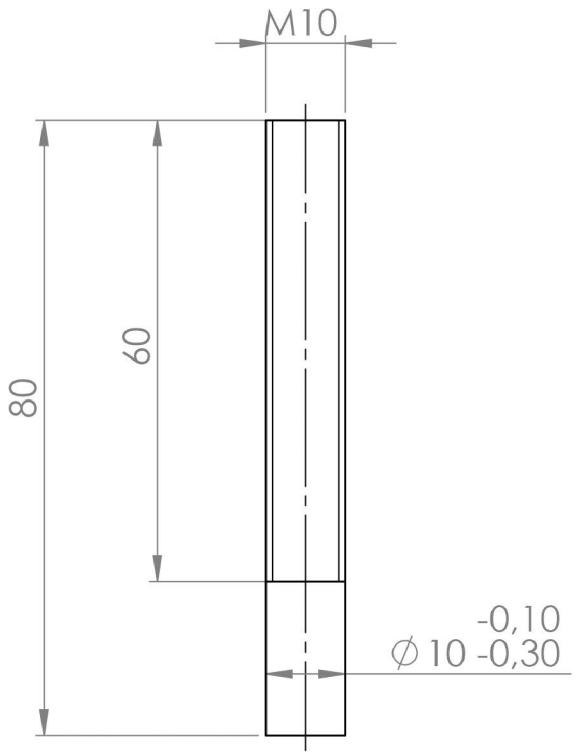
Designed by	Checked by	Approved by	Date		Date	Scale
Marco Pontin					29/03/2018	1:2

Asta esterna pendolo	Asta esterna pendolo		
		Edition	Sheet
			1 / 1



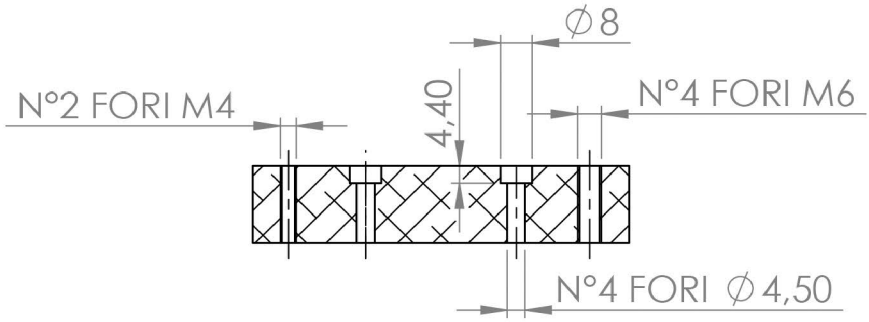
Designed by	Checked by	Approved by	Date		Date	Scale
Marco Pontin					29/03/2018	1:1

Asta interna pendolo	Asta interna pendolo		
		Edition	Sheet
			1 / 1

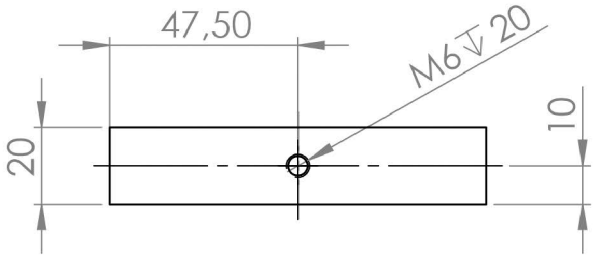


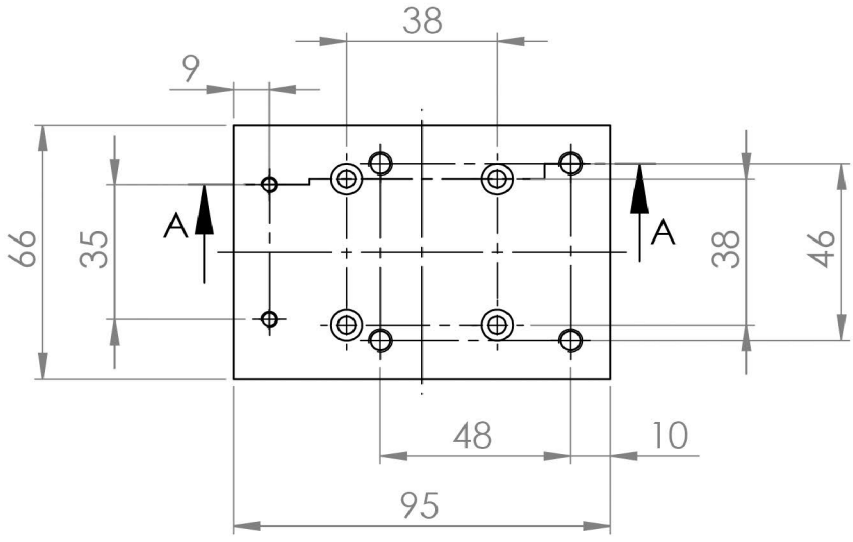
Designed by	Checked by	Approved by	Date		Date	Scale
Marco Pontin					29/03/2018	1:1

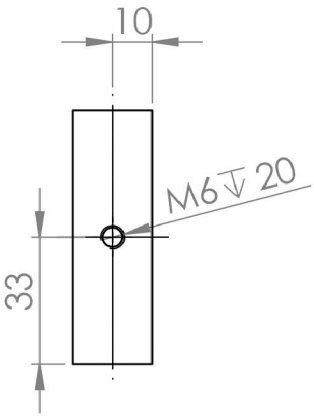
Perno Pendolo	Perno Pendolo		
		Edition	Sheet
			1 / 1



A-A



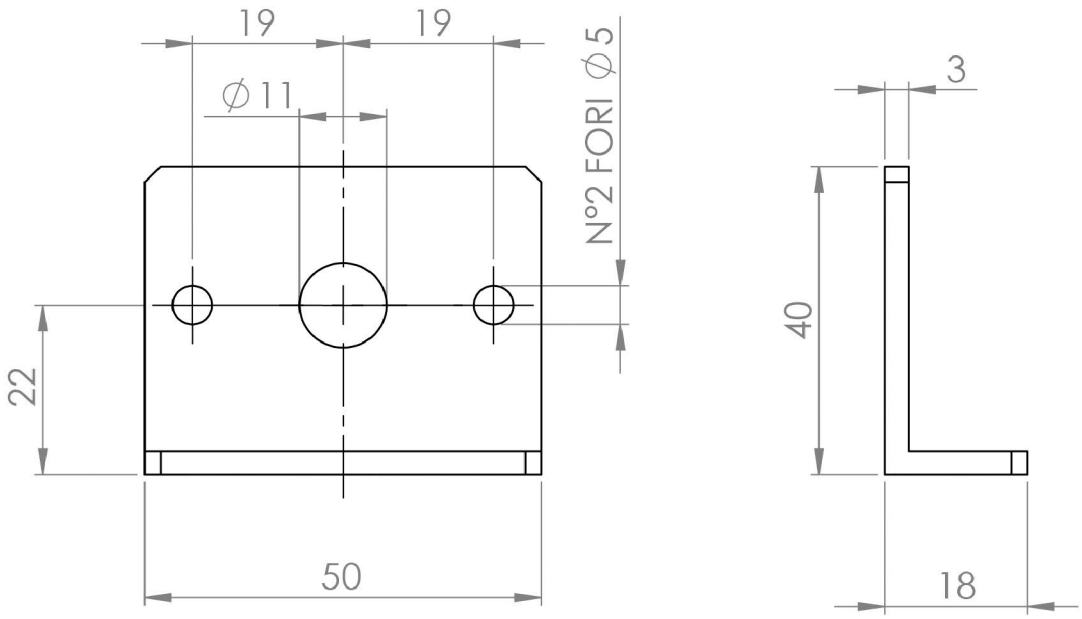


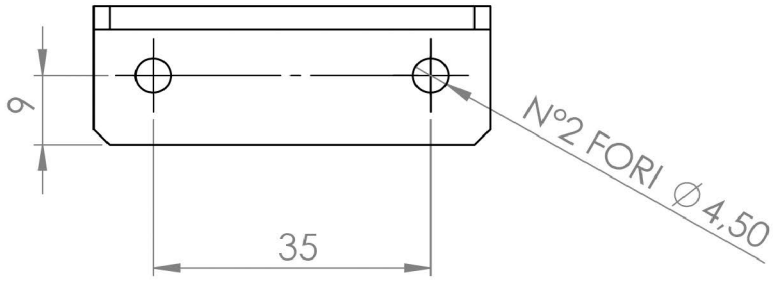


DOVE NON INDICATO SI SUPPONGANO I FORI POSIZIONATI SIMMETRICAMENTE RISPETTO AL CENTRO DEL PEZZO

Designed by	Checked by	Approved by	Date		Date	Scale
Marco Pontin					29/03/2018	1:2

Piastra di collegamento	Piastra di collegamento	Edition	Sheet
			1 / 1





TUTTI GLI SMUSSI 2X45°

Designed by	Checked by	Approved by	Date		Date	Scale
Marco Pontin					29/03/2018	1:1

Staffa sensore angolare	Staffa sensore angolare		
		Edition	Sheet
			1 / 1

Bibliografia

[1] Zilic, Tihomir & Pavkovic, Danijel & Zorc, Davor. (2009). Modeling and control of a pneumatically actuated inverted pendulum. ISA transactions. 48. 327-35. 10.1016/j.isatra.2009.03.004.

[2] C. Krupke and J. Wang, "Modelling and robust control of an inverted pendulum driven by a pneumatic cylinder," 2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Busan, 2015, pp. 812-817. doi: 10.1109/AIM.2015.7222638

[3] Petric, Josko & Situm, Zeljko. (2003). Inverted Pendulum Driven by Pneumatics. 19.

[4] Peter Beater, *Pneumatic Drives, 2007*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 247-256.

[5] Massimo Sorli, Stefano Pastorelli, *Hydraulic and Pneumatic Actuation Systems in:* Robert H. Bishop *The Mechatronics Handbook, Second Edition - 2 Volume Set, December 14, 2007*, CRC Press.