



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale - DIMEAS

Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

**Analisi di un pendolo inverso ad attuazione
pneumatica con controllo tramite PLC ed HMI**

Relatore:

Prof. Luigi Mazza

Correlatori:

Prof. Terenziano Raparelli

Ing. Giuseppe Pepe

Candidato:

Gianluca Vuolo

Anno accademico 2020 / 2021

Abstract

Il presente elaborato di tesi è dedicato all'analisi e stabilizzazione di un pendolo inverso ad attuazione pneumatica con controllo tramite PLC ed HMI. L'attività consta di un lavoro iniziale di rinnovamento di un banco di prova presente nel Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale (DIMEAS) tramite un cablaggio elettrico e pneumatico e l'aggiunta di nuove valvole per ampliare le configurazioni di funzionamento. Lo studio del banco prosegue con la realizzazione del modello non lineare tramite il software *Simcenter Amesim*®, con il quale è stato possibile effettuare sia una prima analisi parametrica del PID per il controllo della sola posizione del carrello e una sua stabilizzazione, sia un'analisi del sistema completo per ottenere la stabilizzazione del pendolo inverso. A seguire è stato programmato il PLC S7-1200 della Siemens per il controllo dell'azionamento del banco di prova e la realizzazione delle prove sperimentali. Successivamente sono state confrontate le prestazioni del sistema utilizzando le diverse tipologie di valvole (proporzionali, digitali) in differenti situazioni di funzionamento, effettuando un confronto fra le varie tecnologie di controllo (modulazione PWM, controllore PID) con lo scopo di ottenere le migliori condizioni di lavoro e i parametri di risposta ottimizzati per ciascuna configurazione. Infine è stata programmata e installata una HMI (interfaccia uomo-macchina) per garantire una comunicazione intuitiva per il controllo del banco e l'acquisizione dei dati.

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Rassegna della letteratura scientifica	2
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 carrello.....	5
2.2	Caratteristiche dei componenti	7
2.2.1	Cilindro pneumatico	7
2.2.2	Valvole	7
2.2.3	Driver.....	10
2.2.4	Trasduttore angolare	12
2.2.5	Trasduttore di posizione LVDT.....	13
2.2.6	Guida lineare	13
2.2.7	PLC Siemens S7-1200.....	13
2.2.8	HMI Comfort TP700	15
2.3	La struttura del banco di prova	15
2.3.1	Circuito pneumatico	16
2.3.2	Circuito elettrico	17
2.3.3	Sistema meccanico	18
3	Costruzione del banco di prova.....	20
3.1	Azionamento del banco di prova	24
4	Modulazione PWM e controllore PID	26
4.1	Modulazione PWM.....	26
4.1.1	Scelta del periodo di modulazione T	28

4.1.2	Scelta dell'intervallo di regolazione	30
4.1.3	Modulazione PWM tramite il blocco CTRL_PWM	31
4.2	Controllore PID.....	35
4.2.1	Contributo dell'azione proporzionale.....	36
4.2.2	Contributo dell'azione integrale	37
4.2.3	Contributo dell'azione derivativa	37
4.2.4	Wind-up dell'integratore	37
4.2.5	PID in cascata	38
4.2.6	Controllore PID tramite il blocco PID_Compact	40
5	Programmazione del PLC	47
5.1	Blocchi organizzativi	48
5.1.1	Blocco organizzativo OB1 Main.....	48
5.1.2	Blocco Cycle Interrupt OB30 PID Posizione	48
5.1.3	Blocco Cycle Interrupt OB31 PID Completo.....	52
5.2	Blocchi funzione	58
5.2.1	Blocco funzione FC1 "CTRL_PWM".....	58
5.2.2	Blocco funzione FC3 "Acquisizione dati"	61
5.2.3	Blocco funzione FC4 "PID_automatico"	64
5.2.4	Blocco funzione FC5 "Controllo manuale"	64
5.3	Blocchi dati	66
5.3.1	Blocco dati DB1 "Dati input".....	66
5.3.2	Blocco dati DB3 "PID"	67
5.3.3	Blocco dati DB4 "PWM"	68
6	Programmazione dell'HMI	69
6.1	Schermata principale e schermata delle informazioni	69
6.2	Pagina per la scelta delle valvole	70

6.3	Scelta del metodo di controllo	72
6.4	Pagine di azionamento e simulazione	73
6.5	Pagina di acquisizione dei risultati ottenuti	75
6.6	Controllo manuale.....	76
7	Modello teorico realizzato su <i>Amesim</i> ®	78
7.1	Introduzione ad <i>Amesim</i> ®.....	78
7.2	Componenti utilizzati.....	79
7.2.1	Componenti libreria dei segnali.....	79
7.2.2	Componenti libreria pneumatica	80
7.2.3	Componenti meccanici	81
7.3	Controllo posizione del carrello.....	82
7.3.1	Analisi parametrica e risultati ottenuti	84
7.4	Controllo posizione e angolo del pendolo	89
7.4.1	Risultati ottenuti	90
8	Risultati sperimentali per il controllo posizione	92
8.1	Requisiti di un sistema di controllo	92
8.2	Controllo posizione tramite il blocco CTRL_PWM.....	93
8.3	Controllo posizione tramite controllore PID	99
9	Risultati sperimentali del banco completo	108
9.1	Architettura di controllo del sistema.....	108
9.2	Tuning manuale del sistema	109
9.3	Risultati delle prove sperimentali	111
10	Conclusioni e prospettive di sviluppo	113
	Indice delle figure	115
	Indice dei grafici	119
	Indice delle tabelle	121

Bibliografia	122
Appendice 1	124
Appendice 1-A	124
Appendice 1-B	125
Appendice 1-C	127
Appendice 1-D	129
Appendice 2	130

1 Introduzione

Lo studio del controllo e della stabilizzazione dei sistemi a pendolo inverso è tra i sistemi più analizzati nell'ambito della teoria dei controlli grazie alla facile comprensione e formalizzazione matematica.

Esso è costituito da un'asta, o un pendolo, collegata ad un carrello tramite una cerniera. Il tutto è movimentato su di una guida per mezzo di un'attuazione meccanica o pneumatica. Il sistema è facilmente complicabile utilizzando masse o lunghezze diverse oppure aggiungendo un doppio pendolo o un triplo pendolo. Si può, inoltre, utilizzare un coppia sferica per collegare il pendolo alla base e permettere, quindi, un'oscillazione nello spazio. In tutte le configurazioni, l'obiettivo è quello di mantenere il pendolo in verticale con il baricentro al di sopra della cerniera, in equilibrio instabile. È necessario garantire, inoltre, una buona sensibilità a disturbi esterni di diversa natura.

Negli ultimi anni il sistema del pendolo inverso sta riscontrando un notevole successo nelle applicazioni pratiche. Tra queste troviamo: il controllo di mezzi di trasporto quali overboard o Segway, la stabilizzazione di razzi vettori durante la fase di partenza e il mantenimento in posizione eretta di robot.

Il banco di prova, utilizzato per il presente elaborato di tesi, è costituito da un carrello a ricircolo di sfere che scorre su di una guida prismatica e da un pendolo collegato con una cerniera ed è formato da un'asta di peso ed inerzia trascurabili e da una massa posta nell'estremità superiore. L'attuazione è di tipo pneumatica per mezzo di un cilindro a doppio effetto comandato tramite valvole di diversa natura. Si può movimentare, infatti, sia tramite quattro valvole proporzionali 2/2 della Camozzi, sia con quattro valvole digitali 2/2 della Matrix oppure, in alternativa, tramite due valvole digitali 3/2 della Matrix.

Il banco di prova presenta, pertanto, una serie di caratteristiche che aumentano la complessità del problema. Innanzitutto l'attuazione pneumatica, a causa della comprimibilità dell'aria, fa sì che il sistema abbia una banda passante molto ridotta.

In secondo luogo, la corsa disponibile è limitata a quella del cilindro pneumatico. Questo comporta l'impossibilità di utilizzare lo swing up del pendolo e la necessità di mantenere il carrello a metà corsa per evitare che impatti alle estremità della guida. In tal caso si potrebbero verificare delle vibrazioni indesiderate che farebbero oscillare il sistema più del dovuto.

L'elaborato, dopo una breve rassegna della letteratura scientifica, analizza tutte le componenti pneumatiche, meccaniche ed elettriche utilizzate, ed il montaggio degli stessi sul banco di prova (Capitolo 2 e 3).

Successivamente, si presenta una trattazione teorica sui metodi di controllo utilizzati: modulazione PWM e controllore PID (Capitolo 4). Alla quale segue una parte centrale in cui si analizza la programmazione del PLC e dell'HMI (Capitolo 5 e 6).

Nel capitolo successivo si realizza e commenta il modello teorico realizzato su Amesim®, evidenziando le differenze tra un controllo di sola posizione ed un controllo completo del sistema (Capitolo 7).

A seguire, si effettuano le prove sperimentali per il controllo della posizione del carrello. Si evidenziano le differenze tra un controllo tramite modulazione PWM e il controllore PID, a cui segue un confronto tra il tuning manuale e il metodo di Ziegler Nichols. (Capitolo 8).

Inoltre, si effettuano le prove sperimentali sul banco di prova completo, effettuando una taratura del doppio controllore PID e analizzando il contributo di ciascun parametro. (Capitolo 9)

In conclusione, si propongono alcuni spunti per futuri sviluppi ed alcune migliorie che possono essere effettuate sul banco di prova. (Capitolo 10).

1.1 Rassegna della letteratura scientifica

La letteratura scientifica presenta diversi studi e documentazioni riguardo l'analisi del pendolo inverso. Primo tra questi, l'articolo intitolato "Inverted Pendulum Driven by Pneumatics" di Pretic et al. [8] nel quali si studia

un'apparecchiatura sperimentale molto simile a quella utilizzata per il presente elaborato di tesi. Essa, infatti, è costituita da un cilindro privo di stelo, una valvola proporzionale 3/2 ed un pendolo lungo 400 mm . All'estremità dell'asta è posta una massa di 0.06 kg , il carrello ha una massa di 1.5 kg e si utilizza una pressione di alimentazione di 6 bar . Per il controllo si fa ricorso al metodo LQR.

Nel lavoro "Modeling and control of a pneumatically actuated inverted pendulum" di Zilic et al. [17] si utilizza un sistema costituito da una valvola proporzionale 3/2 a centri chiusi con una banda passante di 100 Hz ed un cilindro pneumatico senza stelo avente una corsa di 500 mm ed un alesaggio di 15 mm . Si effettuano due tipologie di controlli: in prima analisi si utilizza un controllore lineare del tipo state feedback ed uno non lineare per compensare gli effetti dell'attrito, successivamente si adottano soluzioni basate su procedure di ottimizzazione LQ e LQG.

Infine, nell'articolo di C. Krupke e J. Wang, intitolata: "Modelling and control of a pneumatically actuated inverted pendulum" [7] si analizza, dal punto di vista teorico, il controllo di un sistema a pendolo inverso ad attuazione pneumatica. L'architettura di controllo prevede l'utilizzo di un anello di controllo interno, per la forza applicata all'attuatore con un controllore PI ed un anello di controllo esterno per la stabilizzazione del carrello e del pendolo, utilizzando un controllore di tipo full-state feedback.

In tutti i casi tuttavia, sono presenti delle differenze con il banco presente nell'elaborato di tesi. Prima tra queste la presenza del cilindro con lo stelo che rende le due superfici delle camere differenti, in secondo luogo si utilizza un controllore PID in cascata per il controllo completo del sistema.

2 Il banco di prova

Il banco di prova permette di studiare un sistema costituito da un pendolo inverso ad attuazione pneumatica comandato da un PLC della Siemens. Lo scopo è migliorare e ampliare un banco di prova realizzato da due colleghi, concentrandosi sulle diverse possibilità di configurazione, intervenendo su tutti i parametri di funzionamento, valutandone gli effetti e le prestazioni. Gli elementi caratterizzanti il banco si possono dividere in tre famiglie: meccanici, pneumatici ed elettrici. Fanno parte degli elementi meccanici la struttura portante in legno, il carrello, il pendolo e la guida a ricircolo di sfere. Tutti questi elementi sono stati riutilizzati poichè perfettamente funzionanti. Per quanto riguarda gli elementi pneumatici troviamo i tubi di connessione, l'attuatore pneumatico e le valvole di controllo. In particolare sono state aggiunte tre diverse configurazioni di valvole Matrix. Infine, fanno parte del gruppo elettrico: il trasduttore di posizione e quello angolare, due relè, l'alimentatore a $24 V$, un trasformatore a $5 V$ e i driver per comandare le valvole. È stato utilizzato, inoltre, un PLC della Siemens S7-1200 con due moduli per l'uscita e l'ingresso del segnale analogico.

2.1 Progettazione dei componenti

2.1.1 Progettazione del pendolo

Il pendolo si compone di un'asta e di una massa collegata all'estremità superiore. E' stato progettato per poterne variare la lunghezza da $400 mm$ fino ad un massimo di $700 mm$. Inoltre, inserendo degli opportuni dischi nella parte superiore, è possibile incrementarne anche la massa. In Figura 2.1 è riportata la messa in tavola dell'assieme del pendolo.

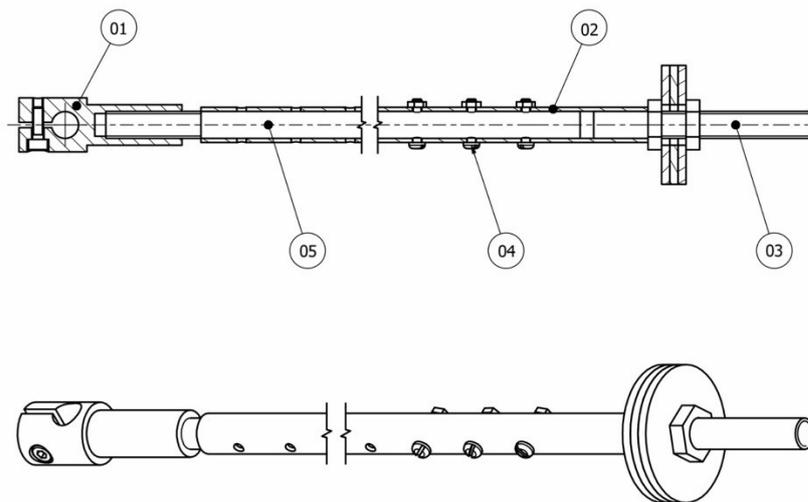


Figura 2.1 Messa in tavola dell'asta

Con il numero “1” è indicato il foro con il quale si effettua l'accoppiamento con il carrello, descritto nel Capitolo 2.1.2, l'elemento “2” e “5” permettono di rendere l'asta allungabile, tenute insieme con le viti “4”. L'asta è realizzata in alluminio, la massa è di circa 200 g e in fase di modellazione è possibile assimilarla ad una massa concentrata. In Figura 2.2 è riportata la foto dell'asta del pendolo con la massa collegata. A differenza della messa in tavola manca la parte finale che è stata collegata direttamente al carrello per facilitarne il montaggio e lo smontaggio.



Figura 2.2 Asta del pendolo

2.1.2 Progettazione del gruppo carrello

Il carrello è la parte che si muove sulla guida e permette di mettere in collegamento l'asta con l'attuatore pneumatico. In Figura 2.3 è possibile studiarne la struttura: con il numero “7” è indicato il binario su cui scorre il minipattino a ricircolo di sfere “6” della Bosch. Su di esso, tramite quattro viti, è accoppiata la piastra “1”. Il supporto “2” permette il collegamento tra il trasduttore angolare e l'albero “3” tramite un accoppiatore Hengstler, non riportato in figura. I supporti “5” sono le sedi del cuscinetto, tenuti assieme tramite due staffe “4” che hanno il

compito di limitare il movimento della staffa. Il trasduttore di posizione LVDT, invece, è legato direttamente alla piastra “1” tramite un giunto sferico.

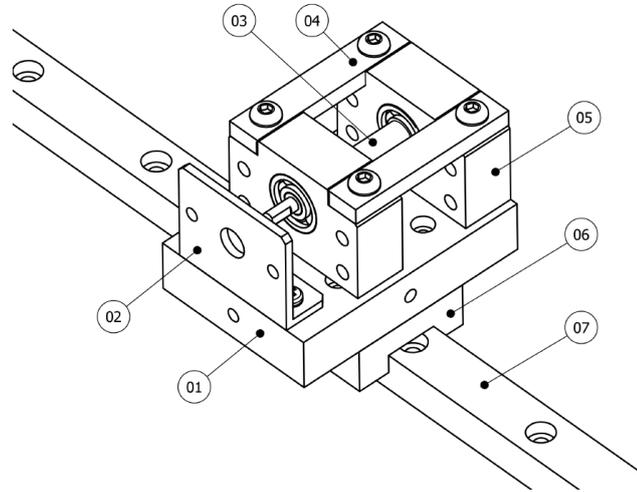


Figura 2.3 Gruppo carrello

In Figura 2.4 è possibile osservare i due pezzi descritti montati assieme al banco di prova. Notiamo come, per limitare gli urti e le vibrazioni di sistema, si sono rivestite le due staffe con del panno morbido e rivestite con dell’alluminio adesivo. In alternativa, si potrebbe utilizzare un collarino in gomma direttamente intorno all’asta del pendolo.

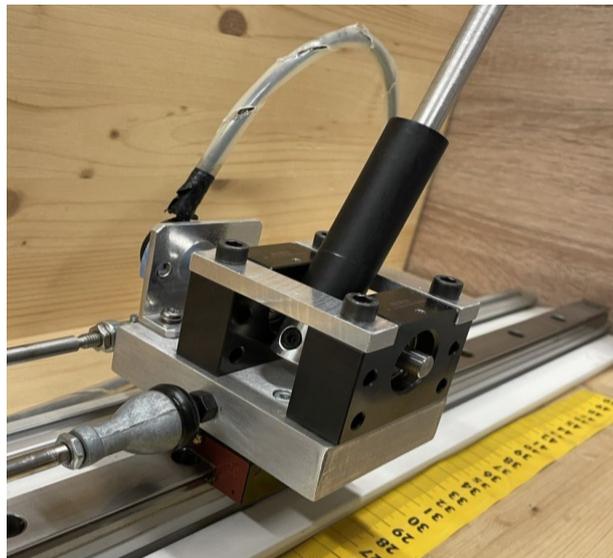


Figura 2.4 Assieme pendolo e carrello

2.2 Caratteristiche dei componenti

2.2.1 Cilindro pneumatico

L'attuatore utilizzato è quello riportato in Figura 2.5, si tratta di un minicilindro a doppio effetto della Camozzi della serie 24 magnetico non ammortizzato, il cui codice di riferimento è "24N2A16A500".



Figura 2.5 Cilindro pneumatico Camozzi

Esso è fissato al banco con due cerniere e al carrello con un giunto sferico. Le due camere sono collegate alle valvole pneumaticamente con due tubi avente diametro di 4 mm. E' possibile cambiare le valvole da utilizzare semplicemente collegando i due tubi nelle apposite sezioni. Nella Tabella 2.1 sono riportate le caratteristiche tecniche dell'attuatore.

Caratteristiche del cilindro	
Alesaggio	16 mm
Corsa	500 mm
Ø Stelo	6 mm
T di esercizio	20 – 80 °C

Tabella 2.1 Caratteristiche del cilindro

2.2.2 Valvole

Nel banco di prova sono presenti due famiglie di valvole, quelle della Camozzi e quelle della Matrix.

2.2.2.1 Valvole Camozzi

Le valvole della Camozzi sono delle elettrovalvole 2/2 NC. Esse possono essere controllate in due metodi differenti: il primo tramite appositi driver, descritti nel Capitolo 2.2.3.2, il secondo collegandole direttamente alle uscite veloci del PLC

che permettono un controllo PWM della valvola. Per garantire il corretto movimento del pistone dell'attuatore è necessario utilizzare quattro valvole 2/2 che lavorano in coppia. Il codice identificativo della valvola è "AP-7211-LR2-U7" e nella Figura 2.6 è possibile osservarne la foto e il relativo simbolo ISO.

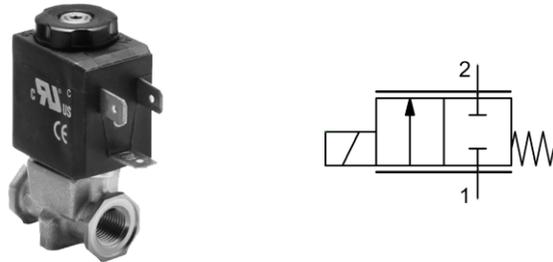


Figura 2.6 Valvola 2/2 Camozzi con relativo simbolo ISO

2.2.2.2 Valvole Matrix

In Figura 2.7 è riportata la configurazione delle valvole della Matrix utilizzate. Possiamo distinguere due gruppi: le due valvole indicate con il numero "1" sono valvole Matrix della serie 720 mentre quelle indicate con i numeri "2" e "3" sono della serie 820.

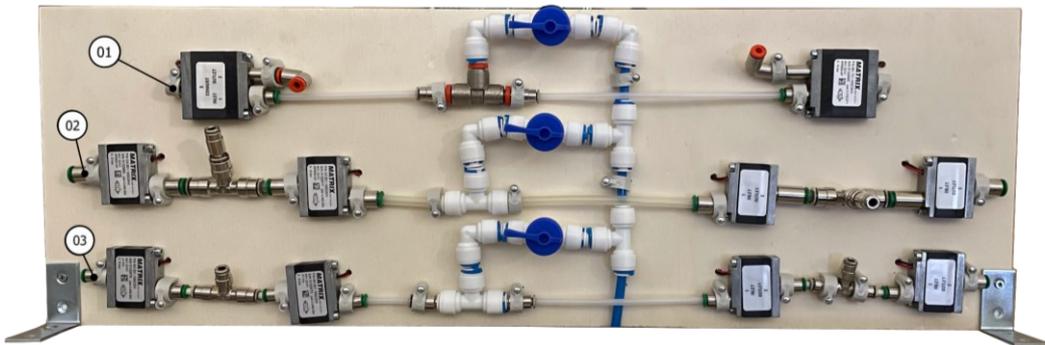


Figura 2.7 Configurazione valvole Matrix

Le valvole Matrix della serie MX720, la cui sezione e simbolo ISO sono riportati nella Figura 2.8, sono delle valvole monostabili 3/2 a comando elettrico NC. Esse sono state collegate al driver della Matrix. Il driver riceve il segnale dal PLC, lo converte in un segnale speed up e lo invia alla valvola, la quale commuta

il proprio stato, mettendo in comunicazione l'ingresso 1 con l'uscita 2. Cessato il comando, la valvola ritorna in posizione grazie alla molla presente al suo interno.

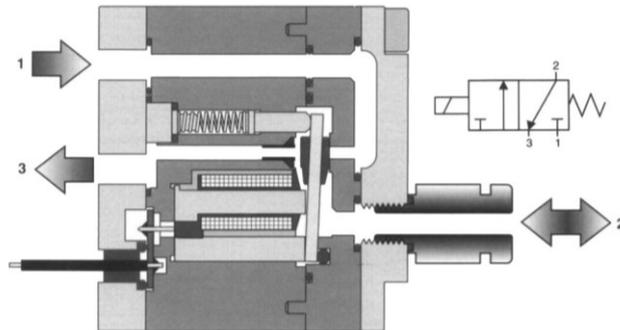


Figura 2.8 Valvola Matrix MX720 3/2

Nella Tabella 2.2 sono presenti le caratteristiche tecniche della valvola MX720.

Caratteristiche tecniche valvole Matrix MX720	
Codice identificativo	MX721103C3KK
Portata	100 NI/min
Funzione	NC
Controllo elettronico	Si
Pressione di esercizio	0 – 8 bar
Tipo	3/2
Controllo in tensione	Speed-up in tensione

Tabella 2.2 Caratteristiche valvola MX720

Delle valvole della serie 820 sono presenti due tipologie differenti, sono entrambe elettrovalvole 2/2 NC. In assenza di comando la comunicazione tra l'ingresso 1 e l'uscita 2 è interrotta dalla linguetta riportata in Figura 2.9. Non appena arriva il segnale, la linguetta si apre mettendo in comunicazione le due porte, anche in questo caso una molla riporta in posizione la linguetta. La differenza tra le due tipologie è che la prima, il cui codice termina con “2KK”, è dotata di un controllo in tensione speed-up, analogo a quello descritto sopra. La seconda tipologia, invece, avente il codice che termina con “224” hanno un controllo in tensione a 24 V e sono comandate direttamente dal PLC.

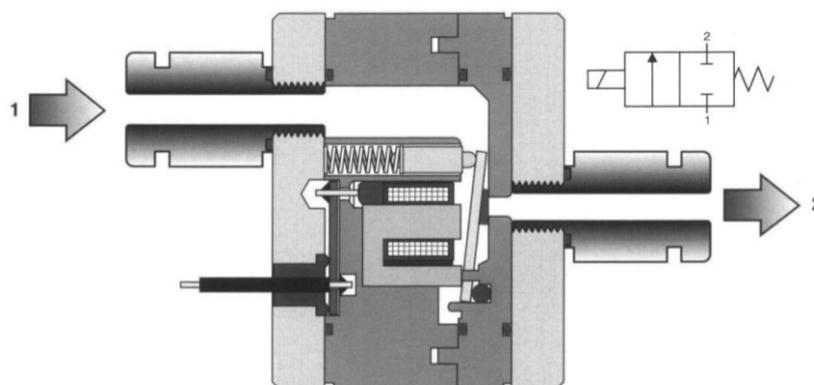


Figura 2.9 Schema valvola Matrix 820 2/2

In Tabella 2.3 è riportato un confronto tra le caratteristiche tecniche delle due valvole utilizzate.

Caratteristiche tecniche valvole Matrix MX820		
Codice identificativo	OX821103C2KK	MX821100C224
Portata	180 NI/min	100 NI/min
Funzione	NC	NC
Controllo elettronico	Si	Si
Pressione di esercizio	0 – 8 bar	0 – 8 bar
Tipo	2/2	2/2
Controllo in tensione	Speed-up in tensione	24 VDC \pm 10%

Tabella 2.3 Caratteristiche valvole 820

2.2.3 Driver

In questa breve sezione sono analizzati i driver utilizzati nel banco di prova, necessari al funzionamento delle valvole.

2.2.3.1 Driver Speed – Up

Le valvole della Matrix, avente codice KK, vengono comandate direttamente da un driver Speed Up. Quest'ultimo migliora la risposta dinamica delle valvole al fine di accelerare la reazione rispetto al comando direttamente dal PLC. In modalità speed-up la cura e la precisione del comando elettrico assicurano le migliori condizioni di lavoro all'elettrovalvola e ne ottimizzano le prestazioni. Nel presente elaborato di tesi è stato utilizzato un driver della Matrix avente codice "P/N HSDB

990.012". Il driver Speed Up, riportato in Figura 2.10, si compone di venticinque collegamenti suddivisi in tre blocchi che permettono il controllo di nove valvole contemporaneamente. Il primo blocco, indicato con il nome JP1, si compone di dodici connettori, a nove dei quali si collegano le uscite digitali del PLC. Ai restanti tre, indicati con il nome CH, GND e VPOW, si collegano rispettivamente il neutro del PLC e l'alimentazione a 24 V. Al secondo gruppo, indicato con il nome JP2, si collegano i neutri delle valvole utilizzate. Infine, nel terzo ed ultimo gruppo, rispettando la numerazione del primo blocco, si collegano l'alimentazione delle valvole.

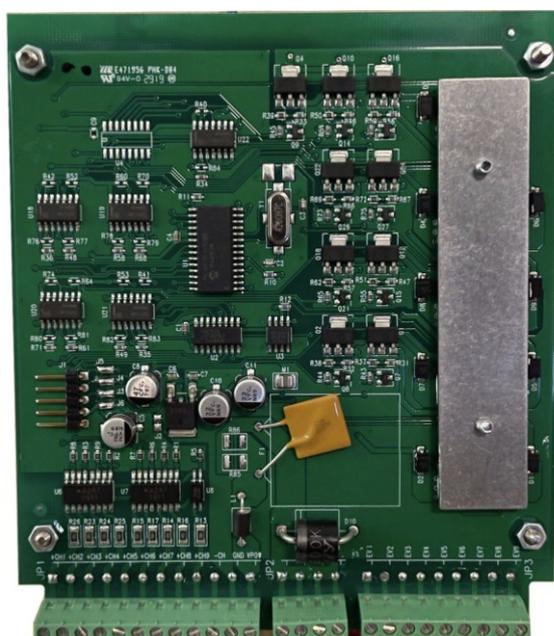


Figura 2.10 Driver Speed Up

2.2.3.2 Driver Camozzi

Il dispositivo di controllo elettronico Serie 130 permette il controllo di una valvola proporzionale. Converte il segnale di ingresso ($0 - 10 V$) in un segnale PWM al fine di ottenere, in uscita al solenoide, una corrente proporzionale al segnale di ingresso. Inoltre, è possibile regolare la corrente in uscita impostando un valore massimo e un valore minimo. Il segnale di uscita può avere un andamento a rampa regolabile tra 0 e 5 secondi. In Figura 2.11 è riportata la foto del driver della Camozzi.



Figura 2.11 Driver Camozzi della Serie 130-222

Inoltre, nella Tabella 2.4 sono riportate le caratteristiche tecniche del prodotto.

Caratteristiche tecniche driver Camozzi	
Codice identificativo	130-222
Alimentazione elettrica	6 V – 24 V DC
Input analogico	0 – 10 V
Corrente massima	1 A

Tabella 2.4 Caratteristiche tecniche driver Camozzi

2.2.4 Trasduttore angolare

Per determinare la posizione angolare dell'asta del pendolo si utilizza un trasduttore angolare. Nel caso in studio è un modello della Penny Giles avente codice "SRH280-DP /090/180/A1/3/D/68/P5". L'ampiezza di misura è pari a 90° e come output ha un tensione che varia da 0 a 5 V. Questa tensione viene mandata in input all'ingresso analogico del PLC e poi elaborata su TIA Portal. Inoltre, è stata eseguita la taratura dello strumento, facendo coincidere lo posizione verticale dell'asta con un segnale in tensione di circa 2.5 V. In Figura 2.12 è riportata la foto del trasduttore angolare.



Figura 2.12 Trasduttore angolare Penny Giles

2.2.5 Trasduttore di posizione LVDT

Il trasduttore di posizione LVDT si basa sulla variazione di mutua induttanza. E' costituito da una struttura cilindrica la quale si suddivide in tre avvolgimenti: uno centrale primario e due estremi secondari. Nella parte centrale è presente un core ferromagnetico di lunghezza superiore a quella del primario in modo da occupare tutte le tre parti quando è in posizione centrale. Se il nucleo ferromagnetico è in posizione centrale, il sistema è magneticamente e geometricamente simmetrico, pertanto le due mutue induttanze sono uguali, l'ampiezza della tensione indotta è la stessa e la tensione di uscita è nulla. Se il sistema non è simmetrico si ha una tensione in uscita data dalla differenza delle due tensioni indotte che ha ampiezza proporzionale allo spostamento. Durante il funzionamento si è notata una flessione nella parte centrale quando il trasduttore era completamente esteso. Il problema è stato risolto stampando in 3D un supporto realizzato tramite il software *Solidworks*®. In Figura 2.13 è riportata la foto del trasduttore lineare utilizzato.



Figura 2.13 Trasduttore lineare LVDT

2.2.6 Guida lineare

Per garantire il movimento della piastra, essa è montata su una guida lineare a ricircolo di sfere, dell'azienda Bosc-Rexroth AG, avente codice "R044209401", essa è dotata di quattro fori filettati che permettono di collegarla al gruppo carrello. La guida scorre sulla relativa slitta, la quale è fissata al banco tramite collegamento bullonato.

2.2.7 PLC Siemens S7-1200

Il banco di prova è comandato dal PLC prodotto dalla Siemens AG. In particolare si tratta del modello S7-1200 avente CPU "1214 DC/DC/DC". In

aggiunta ad esso, per ampliare il numero di uscite e ingressi analogici, si sono utilizzati due moduli. In Figura 2.14 è riportata la foto del PLC utilizzato, affiancato ai due moduli precedentemente citati.



Figura 2.14 PLC S7 -1200 con due moduli OUT/IN analogici

Nella Tabella 2.5 sono riportate le caratteristiche tecniche del controllore.

Caratteristiche PLC S7-1200	
Codice CPU	CPU 1214 DC/DC/DC
Ingrssi digitali	14
Ingressi digitali veloci	6 dei 14
Uscite digitali	10
Uscite PWM	4 dei 10
Ingressi nalogici	2 (0-10Vcc)
Alimentazione	24 Vcc

Tabella 2.5 Caratteristiche tecniche PLC S7-1200

I moduli utilizzati, invece, sono un “Analog Output” avente codice “6ES7232-4HB32-0XB0” ed è dotato di due uscite analogiche, e un “Analog Input” con codice “6ES7231-4HD32-0XB0” dotato di quattro ingressi analogici. Il primo è stato utilizzato per controllare i driver della Camozzi, mentre il secondo per ottenere le informazioni dai due trasduttori presenti nel banco di prova.

2.2.8 HMI Comfort TP700

Al banco di prova è stato aggiunto un pannello HMI della Siemens, in particolare un *Comfort TP700*. L'aggiunta dello schermo ha permesso quindi la programmazione delle schermate di comando descritte nel Capitolo 6. In Figura 2.15 è riportata l'immagine rappresentativa del pannello.



Figura 2.15 Pannello HMI Comfort TP700

Nella Tabella 2.6 è possibile leggere le caratteristiche tecniche del dispositivo.

Caratteristiche tecniche TP700 Comfort	
Alimentazione	24 Vdc
Diagonale schermo	7''
Risoluzione	800x480p
Processore	X86

Tabella 2.6 Caratteristiche tecniche HMI

2.3 La struttura del banco di prova

Il banco si compone di tre macro parti: quella pneumatica, quella elettrica e quella meccanica. In Figura 2.16 è possibile analizzare lo schema sinottico del banco prova, con diversi colori che evidenziano le parti citate in precedenza. Per comodità è stata riportata una sola serie di valvole, il cui impianto è stato dettagliatamente descritto nel Capitolo 2.3.1, così come gli altri due gruppi.

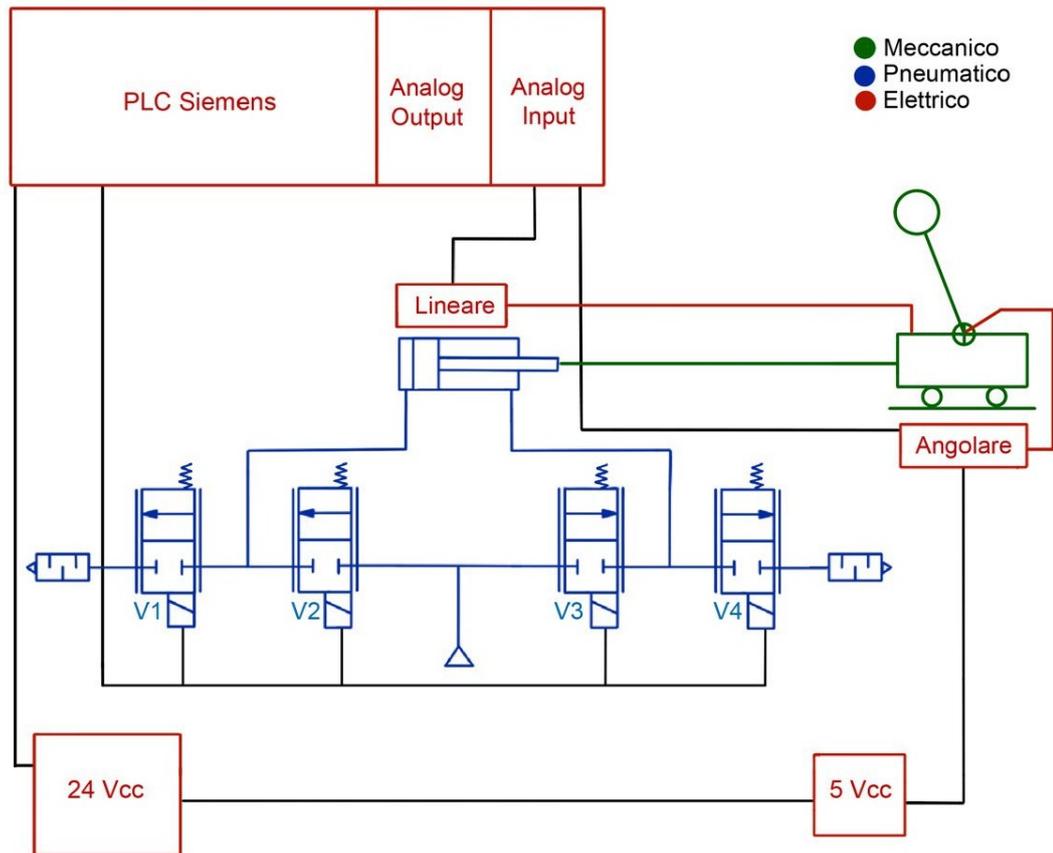


Figura 2.16 Schema sinottico del banco di prova

2.3.1 Circuito pneumatico

Lo schema del circuito pneumatico, riportato nella Figura 2.17, permette di analizzare la disposizione delle valvole presenti nel banco di prova. Come anticipato nel Capitolo 2.2.2, sono state utilizzate quattro tipologie differenti di valvole, collegate ad un'unica alimentazione che può essere interrotta grazie alla presenza di un rubinetto su ciascun ramo. In alto è riportato il simbolo dell'attuatore, con A e B i fori per l'alimentazione delle due camere. È compito dell'operatore collegare i tubi dell'attuatore alle valvole che si intendono utilizzare, indicate in figura con la lettera A e B. Con riferimento alla Figura 2.17, le valvole rappresentate di colore rosso, sono le Matrix MX720, essendo delle valvole 3/2, sono sufficienti due sole valvole per alimentare il sistema. Le altre sono invece delle valvole 2/2, lavorano in coppia V1 e V3 alimentano la camera posteriore, mentre V2 e V4 la camera anteriore. Le valvole di colore viola sono le Matrix OX821103C2KK, quelle di colore verde MX821100C224 e infine le valvole blu

sono le valvole della Camozzi. Tutta la simbologia utilizzata rispetta la normativa ISO 1219-1.

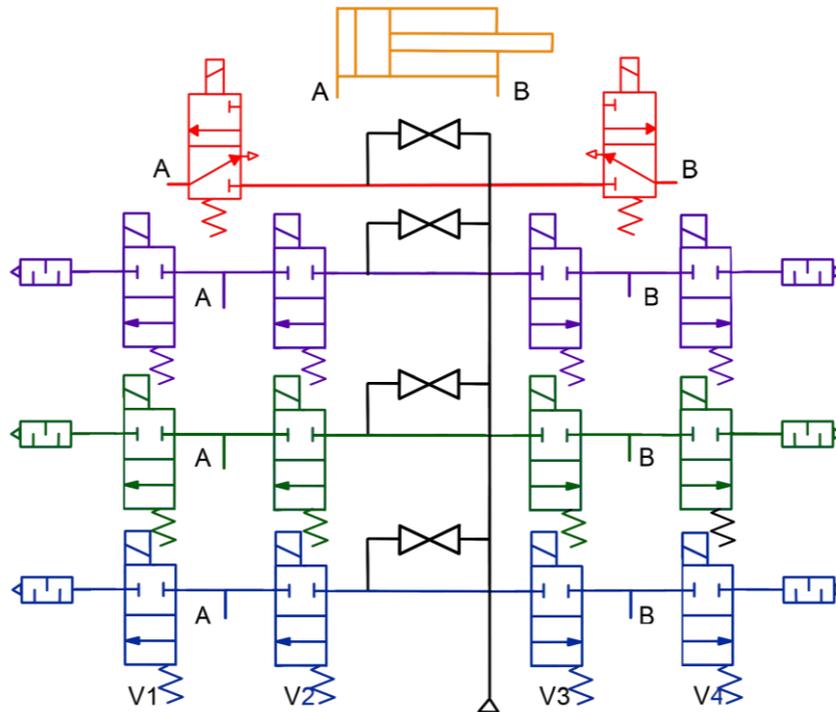


Figura 2.17 Schema del circuito pneumatico

2.3.2 Circuito elettrico

Il circuito elettrico si compone di diversi elementi: alimentatore, trasduttore angolare, trasduttore LVDT, i driver della Camozzi, quello della Matrix e il PLC. L'alimentazione all'intero banco di prova del sistema è fornita dall'alimentatore da 24 V collocato nella parte bassa del banco di prova. Esso alimenta direttamente l'HMI e i connettori collocati sullo sportello i quali hanno il compito di distribuire la corrente su tutto il banco. Essi, infatti, alimentano i relè, il PLC e i due driver. Inoltre l'alimentazione a 24 V arriva anche nel trasformatore posto sulla destra che lo conferterte in una tensione a 5 V per alimentare il trasduttore angolare. Il PLC, quindi, alimenta i connettori presenti sulla sinistra ed i moduli di input ed output analogici. Le uscite digitali del PLC sono collegate direttamente alle valvole per le Camozzi e le Matrix 224, mentre ai driver per le Matrix 2KK e 3KK. Le uscite

analogiche sono collegate ai driver della Camozzi mentre gli ingressi analogici ricevono il segnale dal trasduttore angolare e da quello LVDT.

2.3.3 Sistema meccanico

La parte meccanica è costituita dal carrello e dal pendolo. La guida a ricircolo di sfere scorre su di una slitta, essa è attaccata all'estremità del pistone dell'attuatore così da eseguire la traslazione sul suo stesso asse. Sulla guida è attaccato il carrello che permette l'attacco del pendolo tramite apposito perno. Con il movimento del carrello ne segue l'oscillazione del pendolo che avviene sul piano passante dalla retta della traslazione del carrello e l'asse del pendolo. In Figura 2.18 è riportato lo schema del sistema meccanico realizzato sul software *Solidworks*®.

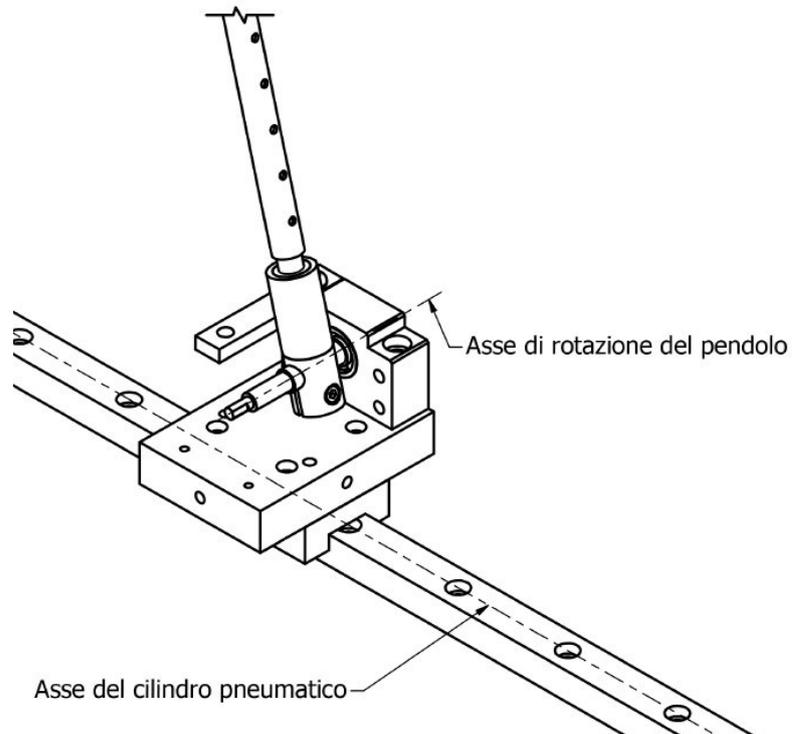


Figura 2.18 Schema del sistema meccanico

Il sistema è dotato di due gradi di libertà, come si può verificare dalla Figura 2.19, nella quale è riportato il modello realizzato sul software *GIM*®

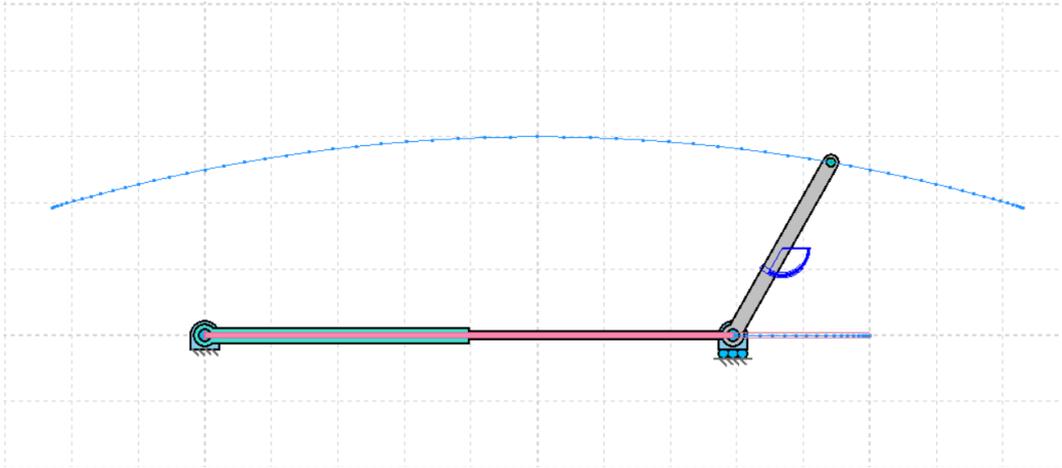


Figura 2.19 Modello del sistema meccanico realizzato sul software *GIM*®

Applicando la formula di Grubler, invece, otteniamo un'ulteriore conferma dei gradi di libertà del sistema:

$$dof = 3(m - 1) - \sum_{j=1}^n l_j = 3(3 - 1) - 2 - 2 = 2$$

Dove:

- m : il numero di elementi che compongono in pezzo, nel nostro caso sono il telaio, il pendolo e il carrello
- l_j : il numero di gdl sottratti dalla j -esima coppia cinematica

3 Costruzione del banco di prova

La costruzione del banco di prova è iniziata riutilizzando un banco già presente in laboratorio realizzato da due colleghi: Alessandro Marino e Marco Pontin. Lo stato iniziale del banco è riportato in Figura 3.1.

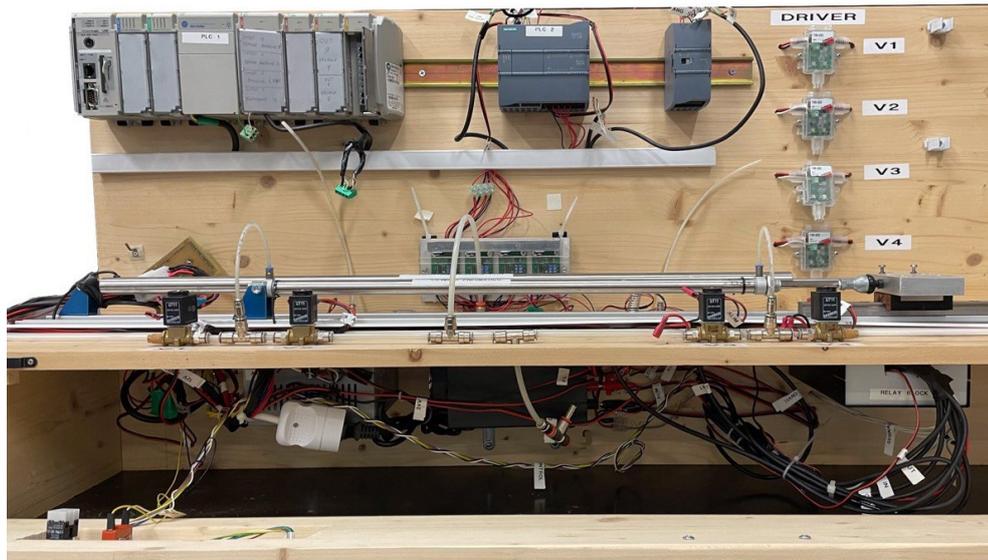


Figura 3.1 Banco di prova allo stadio iniziale

Il lavoro preliminare consiste nel rimuovere tutti i componenti non necessari, come ad esempio il PLC 1 presente sulla sinistra, l'alimentatore da 12V e il Relay Block in basso a destra che permetteva di utilizzare entrambi i PLC tramite il pulsante presente all'esterno.

Tutta la restante componentistica è stata riutilizzata, come ad esempio il trasduttore angolare e quello lineare, il carello con i relativi cuscinetti, il pendolo e l'attuatore pneumatico. È stato riutilizzato il PLC della Siemens, al quale però sono state aggiunte le uscite analogiche, l'alimentatore da 24V, le valvole della Camozzi ed i rispettivi driver. Tutti i componenti riutilizzati sono riportati in Figura 3.2.

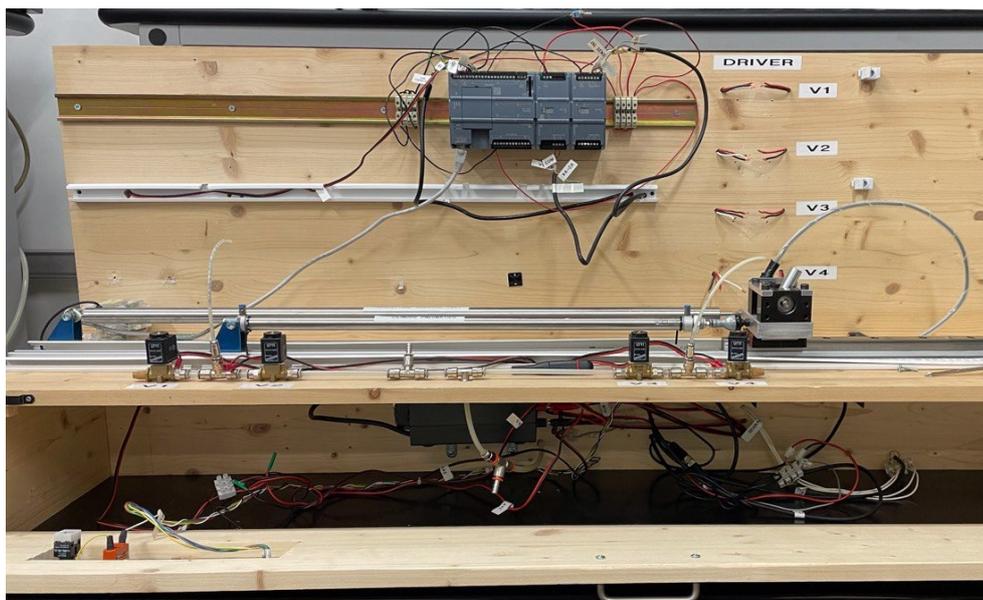


Figura 3.2 Componentistica riutilizzabile del banco di prova

Una volta analizzato lo spazio a disposizione, si è cercato di trovare un'alternativa che permettesse di agire facilmente e comodamente su tutta la parte elettrica. Inoltre, il controllo delle valvole Camozzi può essere effettuato sia direttamente da PLC che tramite i driver, l'unico inconveniente era la necessità di scollegare i morsetti e attaccare quelli nuovi.

La soluzione proposta, e poi adottata, è stata quella di riutilizzare il pulsante esterno che permetteva di passare da un PLC all'altro, per comandare le valvole della Camozzi sia con i driver che tramite il PLC senza staccare mai i morsetti. Per realizzarlo sono stati utilizzati i due relè, come descritto nel Capitolo 2.3.2, per alternare il segnale da mandare alle valvole.

Tutto l'impianto elettrico è stato distribuito sulla parte interna dello sportello in legno, questa soluzione è stata adottata per renderlo facilmente accessibile e modificabile, a differenza della versione iniziale.

Avendo rimosso l'alimentatore da 5V è sorta la necessità di convertire i 24V dell'alimentatore in 5V per alimentare il trasduttore angolare, si è utilizzato un trasformatore che è stato chiuso in una scatola elettrica, come si può vedere in Figura 3.3 in basso a destra.

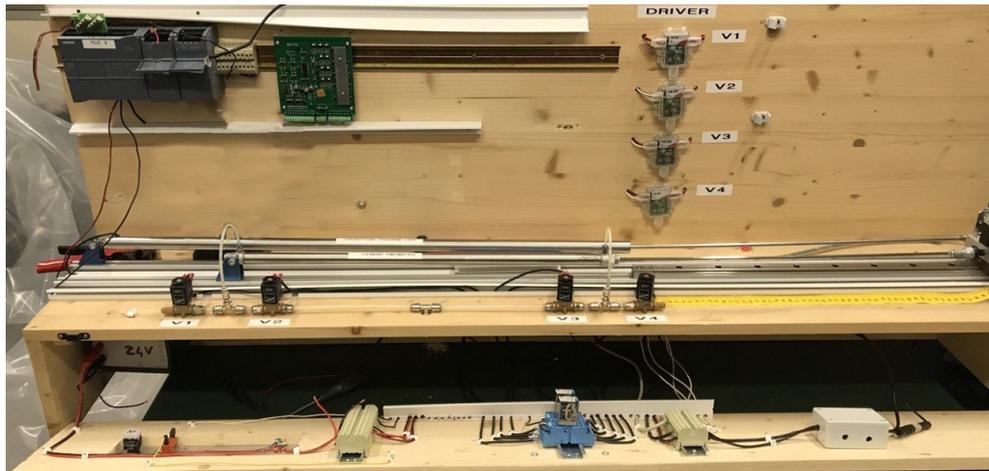


Figura 3.3 Banco prova stadio 3

Successivamente, si è studiato un metodo per implementare le valvole della Matrix. Anche in questo caso adottando una soluzione che potesse essere flessibile. Si è utilizzato un pannello di compensato su cui installare le dieci valvole e un tubo per l'aria compressa da infilare direttamente nel foro sul banco di prova, mentre il driver delle valvole è stato collocato immediatamente sopra. In questa configurazione è possibile scegliere quale valvole utilizzare, staccando i due tubi pneumatici e collegandoli alle valvole interessate e aprendo il corrispondente rubinetto.

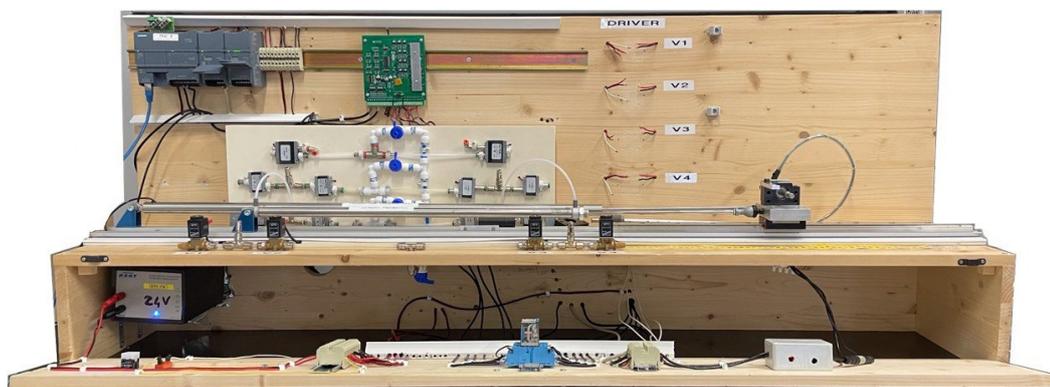


Figura 3.4 Banco di prova con valvole della Matrix

Una volta montato l'assieme carrello è stata fatta la taratura del trasduttore angolare: quindi con un goniometro si è posizionato il pendolo a 90° e si è annotato il valore dell'output analogico. È stata ripetuta la misurazione per dieci volte ed infine è stato calcolato il valore medio.



Figura 3.5 Taratura del trasduttore angolare

Inoltre, è stato collegando l'HMI. In una soluzione temporanea è stato collocato nello spazio affianco alle valvole della Camozzi, come è possibile vedere in Figura 3.6, si potrebbe pensare ad una configurazione più stabile nello spazio affianco ai driver della Matrix, utilizzando la maschera presente in dotazione, con i relativi supporti.

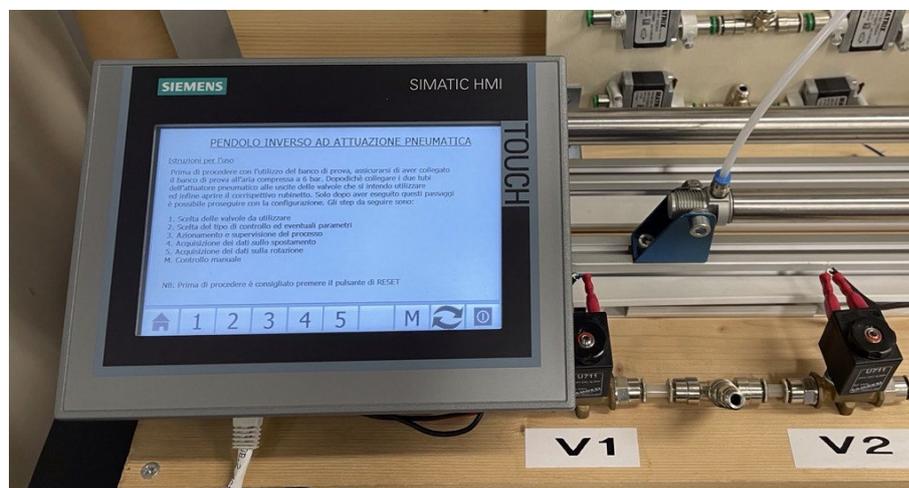


Figura 3.6 HMI sul banco di prova

L'HMI è collegato ad uno switch LAN Ethernet che è stato collocato all'interno del cassettoni, come mostrato in Figura 3.7, per poter permettere la connessione con il PLC ed eventuale computer dell'utilizzatore.



Figura 3.7 Switch LAN Ethernet

In Figura 3.8 è riportata la configurazione finale del banco di prova.

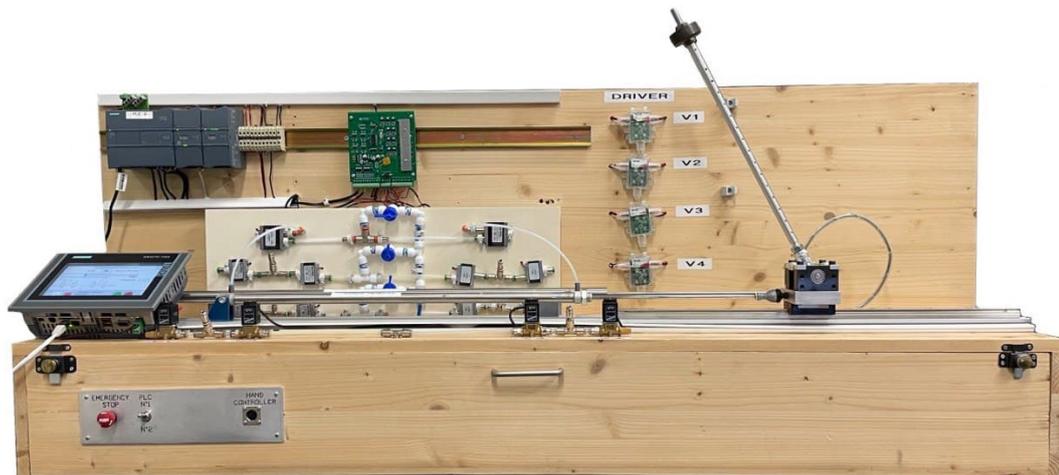


Figura 3.8 Configurazione finale del banco di prova

3.1 Azionamento del banco di prova

Per poter utilizzare il banco di prova è necessario collegare l'alimentatore alla presa e collegare il tubo dell'aria compressa. Il banco può essere utilizzato in due modi, o tramite i pulsanti riportati sul PLC o tramite l'HMI. Nel primo caso, facendo riferimento alla Figura 3.9, le possibilità di utilizzo sono ridotte, tuttavia, in funzione del tasto che si attiva è possibile utilizzare i seguenti controlli:

- I0.0 = per far variare il valore di x_{set}
- I0.1 = se si vuole utilizzare un controllo posizione tramite CTRL_PWM

- I0.2 = se si vuole effettuare un controllo posizione tramite PID
- I0.3 = se si vuole effettuare un controllo completo tramite PID
- I0.4 = per utilizzare le valvole della Camozzi
- I0.5 = per utilizzare le valvole della Matrix 224
- I0.6 = per utilizzare le valvole della Matrix 2KK
- I0.7 = per utilizzare le valvole della Matrix 3KK

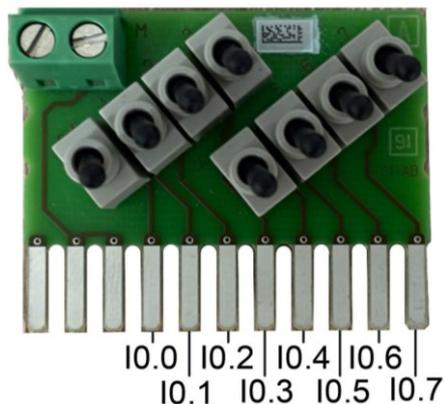


Figura 3.9 Pulsanti fisici del PLC

Si consiglia di effettuare prima la scelta del metodo di controllo, poi quella delle valvole ed infine far variare il valore di x_{set} . In particolare, si ricorda, che il CTRL_PWM è utilizzabile solo con le valvole della Camozzi e con le Matrix 224, ma sono se sono state attivate le uscite veloci del PLC. Inoltre il valore di x_{set} varia in funzione della prova che si esegue, infatti:

- controllo posizione: pulsante OFF $x_{set} = 0\text{mm}$; ON $x_{set}=250\text{mm}$
- controllo completo: pulsante OFF $x_{set} = 100\text{mm}$; ON $x_{set} =350\text{mm}$

Per utilizzare l'HMI, invece, è sufficiente collegare sia il cavo Ethernet che l'alimentazione. A quel punto è possibile seguire le istruzioni riportate sull'HMI. Maggiori informazioni sull'utilizzo e sulle possibilità di configurazione sono descritte nel Capitolo 6.

4 Modulazione PWM e controllore PID

In questo capitolo si espone una trattazione teorica sulla modulazione PWM e sul controllore PID e la loro implementazione su TIA Portal tramite il blocco funzionale CTRL_PWM e il blocco funzionale PID_Compact.

4.1 Modulazione PWM

È una tecnica molto utilizzata nel campo elettronico, elettropneumatico e nelle macchine elettriche. L'obiettivo è quello di riprodurre un controllo di tipo analogico con un segnale di comando di natura digitale. In Figura 4.1 è mostrato l'andamento della variabile di controllo (VC) prima e dopo l'integrazione.

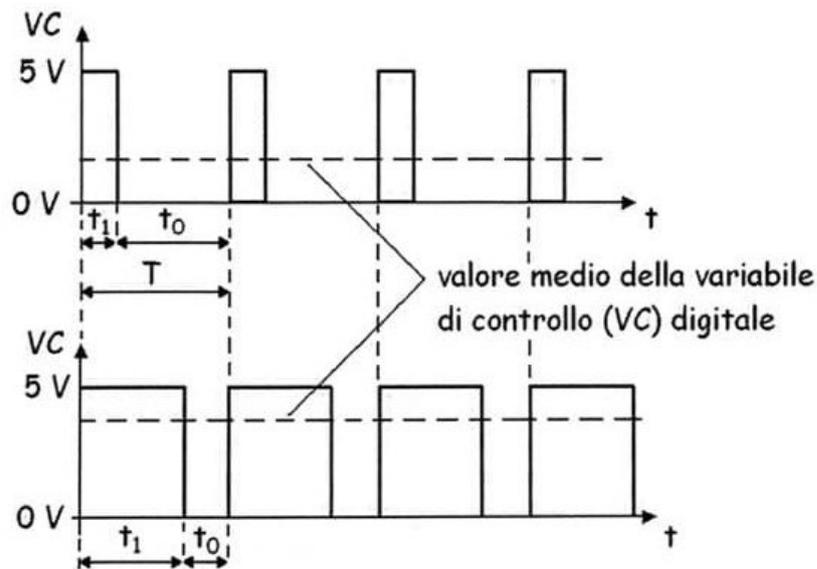


Figura 4.1 Andamento della variabile di controllo con tecnica PWM [16]

La modulazione PWM è caratterizzata dalle seguenti variabili:

- T = periodo dell'onda quadra
- t_1 = durata dell'impulso
- $t_0 = T - t_1$ = durata della pausa

Il rapporto t_1/T , espresso in percentuale, prende il nome di *duty cycle* (dc%) ed è definito secondo l'equazione 4.1.

$$DC\% = \frac{t_i}{T} * 100$$

4.1

L'inverso del periodo di modulazione prende il nome di *frequenza portante*. A seguito dell'integrazione del segnale VC digitale PWM, il segnale di controllo è proporzionale al duty cycle, come è possibile osservare in Figura 4.2.

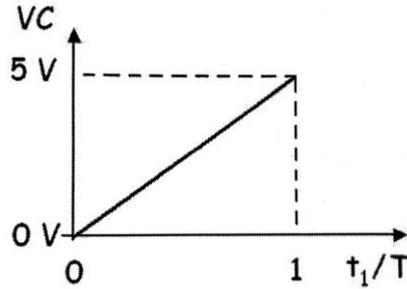


Figura 4.2 Valore medio della variabile dopo l'integrazione in funzione del DC [16]

In questo modo è possibile modulare la portata di una valvola digitale, infatti, il valore del duty cycle è proporzionale all'area media di apertura dell'otturatore in un periodo T di modulazione. In Figura 4.3 è riportato un esempio di comando di una valvola digitale tramite un driver PWM: al variare del segnale analogico V_{REF} corrisponde la portata che passa attraverso la valvola. In funzione del rapporto V_{REF}/V_{MAX} si determina il valore del duty cycle.

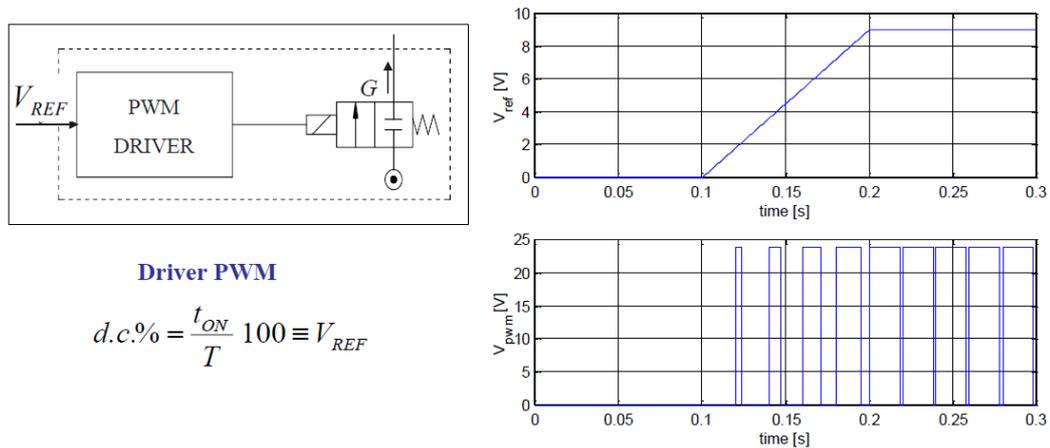


Figura 4.3 Procedura modulazione PWM [14]

Per comprendere il funzionamento della modulazione PWM si fa riferimento alla Figura 4.4.

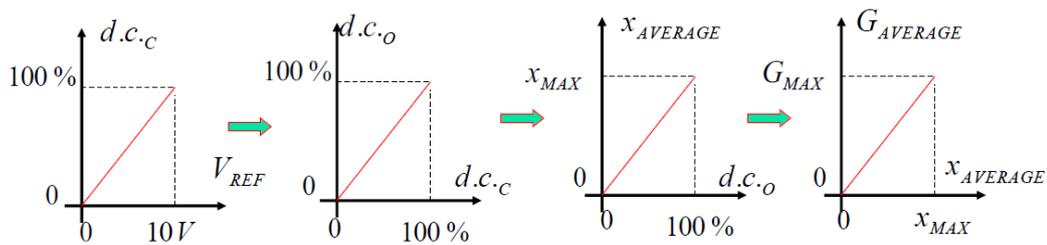


Figura 4.4 Flusso logico della modulazione PWM [14]

Definito il periodo T di modulazione, si nota come al variare della tensione di riferimento varia il duty cycle di comando ($d.c.c$), a cui è associato il duty cycle di output ($d.c.o$). A quest'ultimo valore corrisponde l'effettivo spostamento del cassetto, da cui dipende la portata media.

4.1.1 Scelta del periodo di modulazione T

Affinchè l'andamento della tensione e quello dello spostamento medio siano sovrapponibili è necessario scegliere in modo accurato il periodo della modulazione T in funzione delle prestazioni del componente. Con una frequenza elevata è possibile variare il segnale con intervalli più brevi e quindi più assimilabili ad un comportamento proporzionale, con una frequenza troppo grande si rischia, invece, di avere delle bande morte in apertura o in chiusura, rendendo il periodo T non completamente utilizzabile. Facendo riferimento alla

Figura 4.5 definiamo t_{Rr} il tempo di salita e t_{Rf} il tempo di discesa.

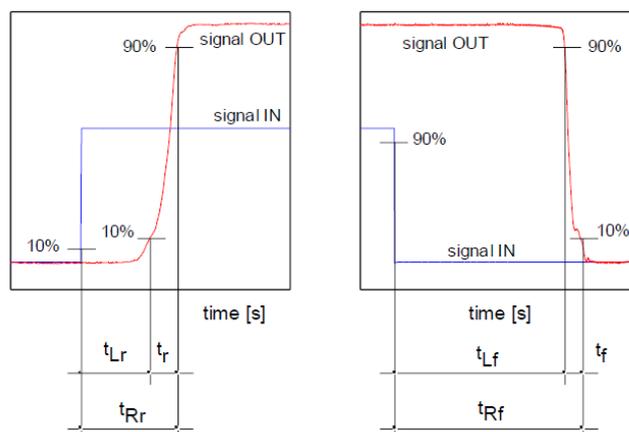


Figura 4.5 Risposta di un sistema ad un gradino [14]

Entrambi sono scomponibili in due contributi: una banda morta iniziale in cui l'otturatore è ancora fermo (t_{Lr} e t_{Lf}) ed il tempo di salita e discesa effettivo (t_r e t_f). Per scegliere il periodo di modulazione T , pertanto, è necessario confrontare il valore assoluto del tempo t_{ON} per cui si comanda l'apertura della valvola ed il tempo di risposta della valvola t_{Rr} . Quest'ultimo dipende dalle caratteristiche fisiche del componente e dalla differenza di pressione a monte e a valle dell'otturatore. Con riferimento alla Figura 4.6 e alla Figura 4.7, distinguiamo due casi, rispettivamente *full behavior* e *partial behavior*

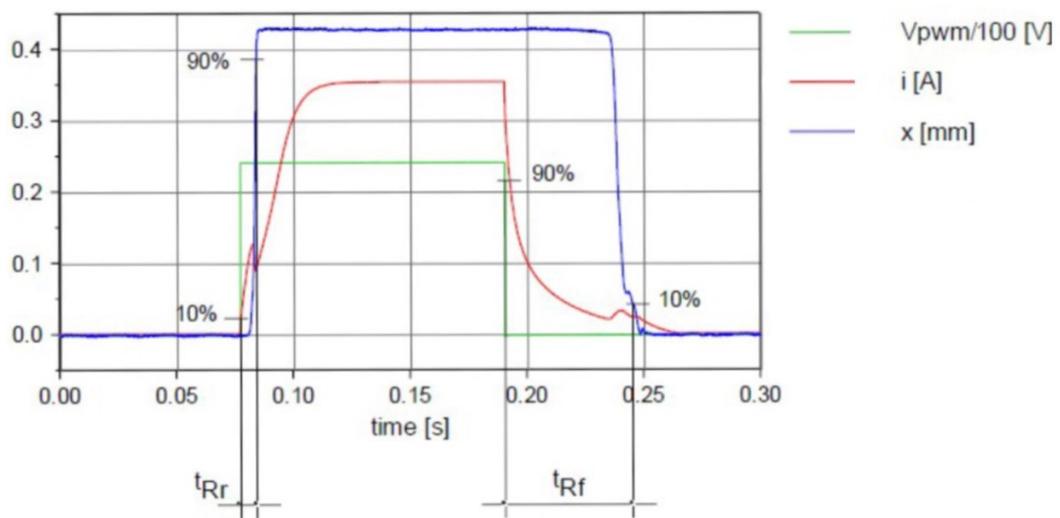


Figura 4.6 Comando PWM in caso di full behavior [14]

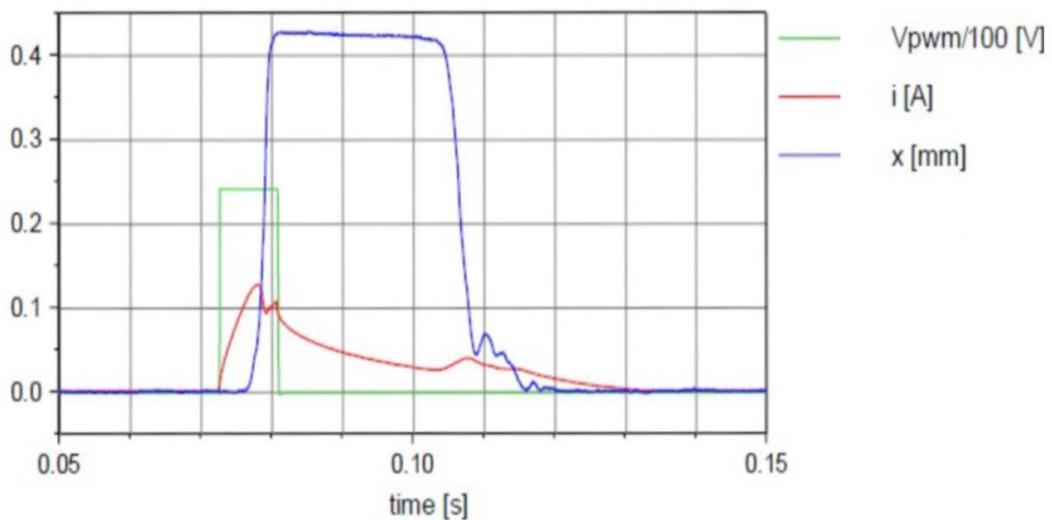


Figura 4.7 Comando PWM in caso di partial behavior [14]

Si può avere, dunque:

- full behavior: quando il periodo T è sufficientemente lungo e quindi t_{ON} è più grande di t_{RF} . Fornendo una tensione a gradino, la corrente e la forza magnetica corrispondente raggiungono il loro valore massimo e quindi l'otturatore raggiunge il finecorsa.
- partial behavior: quando il periodo T non è sufficientemente lungo e quindi t_{RF} è più grande di t_{ON} . Fornendo una tensione a gradino, la corrente inizia a diminuire senza aver raggiunto il suo massimo valore, la forza ha superato il valore di soglia, pertanto l'otturatore si apre ma inizia a chiudersi non appena la corrente scende sotto una certa soglia.

Nel caso ci si trovi nella seconda situazione, si ottiene un errore di non linearità nella regolazione del PWM: il duty cycle di comando non corrisponde al duty cycle di output, come è possibile osservare in Figura 4.8.

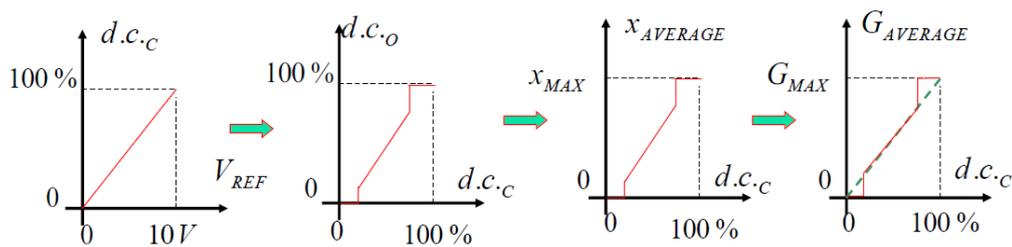


Figura 4.8 PWM non lineare [14]

4.1.2 Scelta dell'intervallo di regolazione

Un parametro importante nella modulazione PWM è l'intervallo di regolazione, vale a dire a quale distanza dal valore di set iniziare a regolare il valore del duty cycle. Si supponga di utilizzare la modulazione PWM per il controllo della posizione di un attuatore avente una corsa di 500 mm . Nel caso in cui non si imposti un range di regolazione, il valore del duty cycle inizierà a regolare sin da subito, rendendo il processo più lento. L'andamento del valore del duty cycle è riportato in Figura 4.9, come si può notare la portata è regolata immediatamente rendendo la fuoriuscita dell'attuatore più lenta.

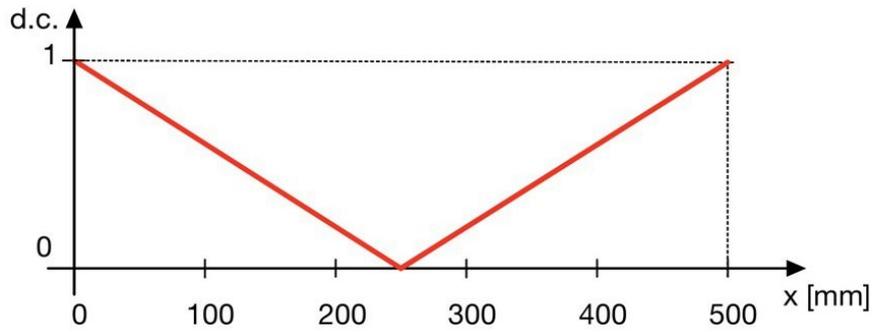


Figura 4.9 Andamento del dc in assenza dell'intervallo di regolazione

Qualora si decida di impostare un intervallo di regolazione, il valore del duty cycle è massimo ogni qualvolta la posizione dell'attuatore è al di fuori del range di regolazione. In Figura 4.10, pertanto, è riportato l'andamento del duty cycle nel caso in cui si utilizzi un range di regolazione pari a *100 mm*.

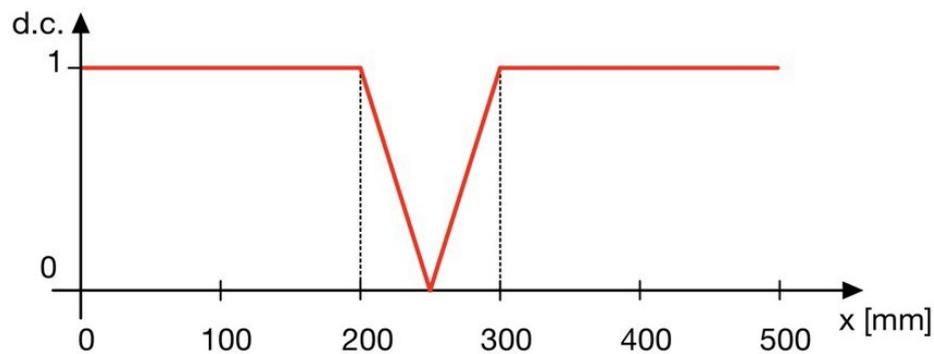


Figura 4.10 Andamento del dc con un intervallo di regolazione pari a 50mm

È fondamentale scegliere un opportuno intervallo: un range troppo grande, infatti, renderebbe il sistema lento e poco reattivo ai disturbi, uno troppo piccolo, però, renderebbe la regolazione inefficace ed il sistema instabile.

4.1.3 Modulazione PWM tramite il blocco CTRL_PWM

È possibile effettuare una modulazione PWM su TIA Portal tramite il blocco denominato CTRL_PWM. L'istruzione si interfaccia direttamente con il generatore di impulsi supportato dalla CPU, il quale si attiva nella sezione delle proprietà. Come mostrato in Figura 4.11, è necessario recarsi nella sezione Generale > Generatore di impulsi (PTO/PWM) > PTO1/PWM1 > Generale. La CPU 1214C

DC/DC/DC è dotata di quattro uscite veloci, ciascuna di esse può essere attivata e parametrizzata.

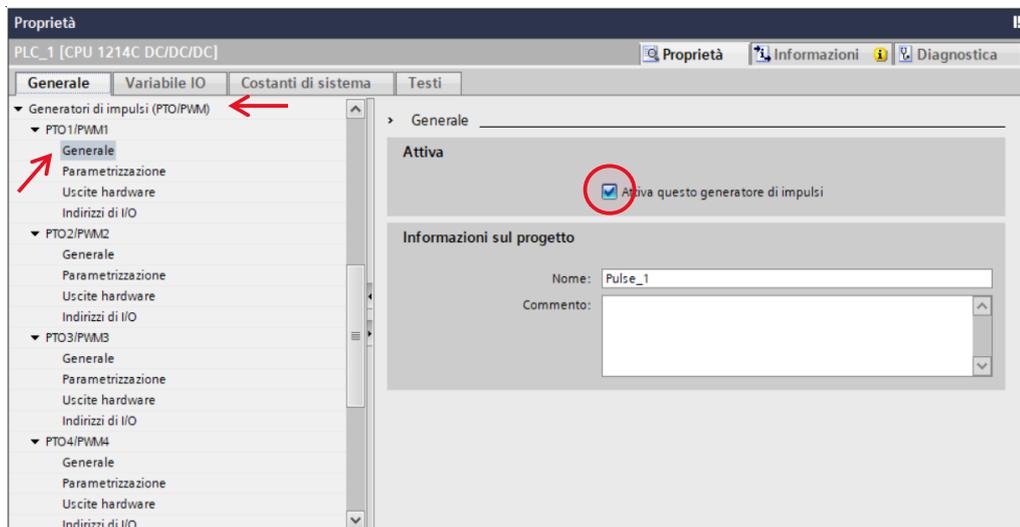


Figura 4.11 Generatore di impulsi della CPU 1214C DC/DC/DC

In Figura 4.12 è riportata la sezione “Parametrizzazione”.

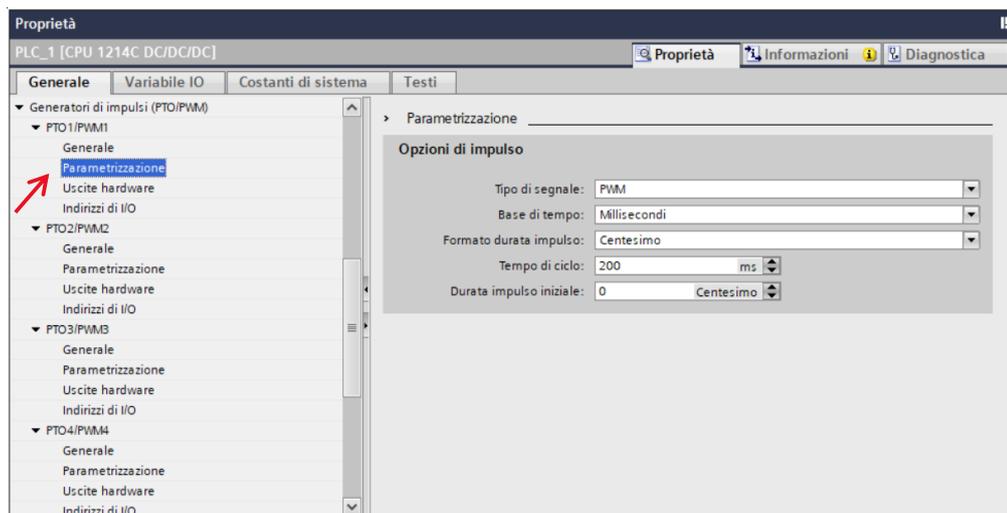


Figura 4.12 Parametrizzazione del generatore di impulsi

Come si può vedere è possibile caratterizzare il tipo di impulso di ciascun uscita, scegliendo la tipologia, la durata dell'impulso iniziale ed in particolare la durata del tempo di ciclo, necessaria per determinare la frequenza di funzionamento.

Nella sezione “Uscita hardware” è possibile selezionare l'uscita fisica del segnale dell'onda quadra modulata. Come è possibile osservare in Figura 4.12, si

può scegliere tra tutte le dieci uscite del PLC, fino ad un massimo di quattro uscite contemporaneamente.

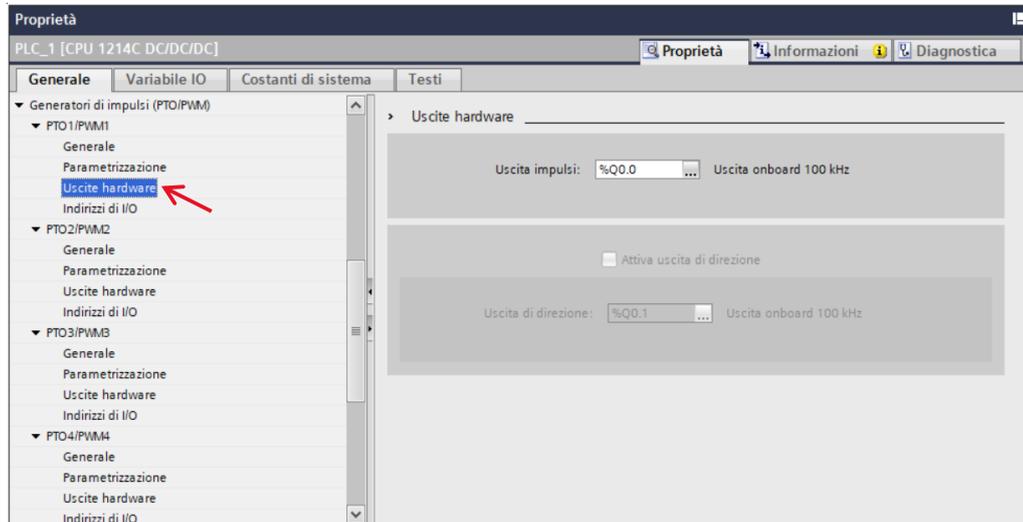


Figura 4.13 Uscite hardware del generatore di impulsi

Nell'ultima sezione è possibile selezionare l'indirizzo di uscita per modulare l'onda quadra, come si può osservare in Figura 4.14.

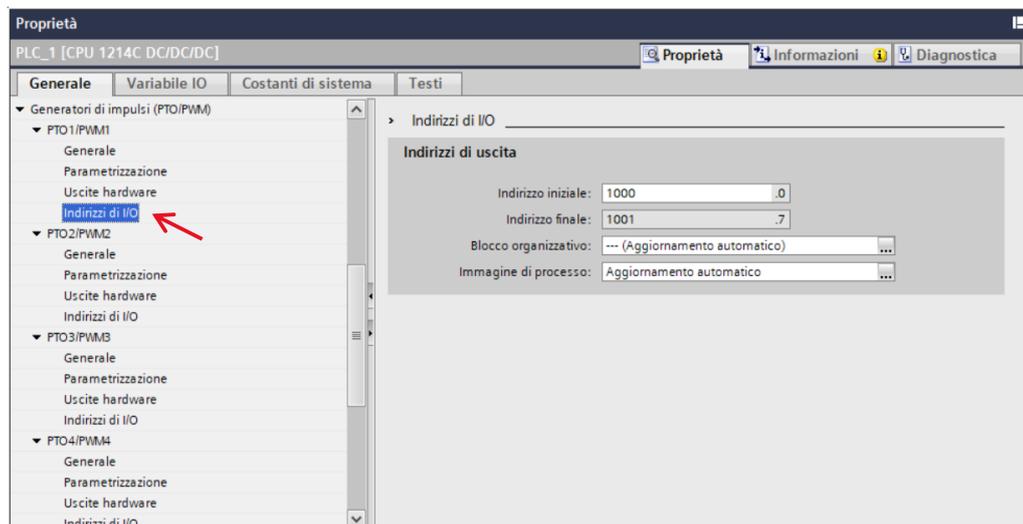


Figura 4.14 Indirizzi I/O del generatore di impulsi

Ciascuna uscita utilizza 16 spazi, nella quale l'indirizzo iniziale è QW1000.0 mentre quello finale è stato automaticamente impostato a QW1001.7.

Una volta configurate le impostazioni del generatore di impulsi è possibile programmare il codice nel linguaggio Ladder, come si può notare in Figura 4.15.

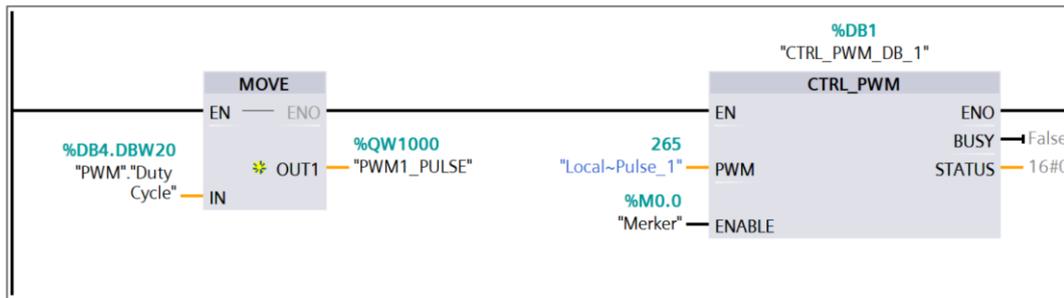


Figura 4.15 Codice Ladder per l'utilizzo del blocco CTRL_PWM

Per utilizzare la modulazione PWM sono necessari due blocchi: un blocco MOVE e un blocco CTRL_PWM. Con il primo si importa il valore del duty cycle nel primo indirizzo indicato nelle impostazioni del generatore di impulsi, il valore del Duty Cycle è un intero e deve essere calcolato in precedenza in funzione del sistema che si vuole controllare. Il secondo blocco, invece, è quello che consente di attivare e disattivare tramite il software il generatore di impulsi. Esso è attivo quando l'input ENABLE presenta il valore TRUE, in caso contrario viene disattivato e non vengono più generati impulsi. L'onda quadra viene quindi mandata sul canale "Local-Pulse_1" o "265".

Per quanto riguarda gli output del blocco CTRL_PWM, il parametro BUSY indica lo stato di elaborazione ma poiché l'S7-1200 attiva il generatore di impulsi quando viene eseguita l'istruzione CTRL_PWM, il parametro ha sempre il valore FALSE. Il parametro STATUS, invece, indica stato dell'istruzione e può assumere il valore pari a:

- 0 quando non ci sono errori
- 80A1 quando il generatore di impulsi non è valido
- 80D0 quando il generatore di impulsi non è stato attivato nelle impostazioni della CPU

4.2 Controllore PID

Il controllore PID è un algoritmo di controllo che permette di regolare un parametro fisico di un impianto o di un processo. È dotato di una struttura predefinita, che viene regolata modificando il valore di alcuni parametri. Grazie alla sua semplicità di utilizzo, precisione e accuratezza, combinata ad una discreta efficacia in diversi campi di utilizzo, è l'algoritmo di controllo di gran lunga più usato nelle applicazioni industriali. Dal punto di vista matematico, il regolatore PID è un sistema dinamico che riceve in ingresso un segnale di errore dato dalla differenza tra il riferimento $r(t)$ e la variabile controllata $y(t)$ e fornisce in output il segnale di controllo $u(t)$. In Figura 4.16 è riportato lo schema a blocchi del controllore PID.

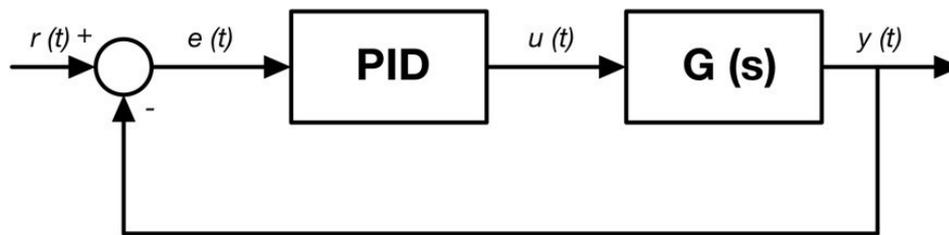


Figura 4.16 Schema a blocchi di controllore PID

L'equazione 4.2 riporta la legge di controllo, ossia il legame tra $e(t)$ e $u(t)$:

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_{t_0}^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad 4.2$$

In questa equazione si evidenziano i tre termini di controllo, rispettivamente chiamati termine proporzionale P, termine integrale I e termine derivativo D, dipendenti dai parametri K_P , K_I e K_D , rispettivamente guadagno proporzionale, guadagno integrativo e guadagno derivativo. Raccogliendo a fattor comune, tra i tre addendi, il coefficiente K_P , otteniamo l'equazione 4.3:

$$u(t) = K_P \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_{t_0}^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right) \quad 4.3$$

Nella quale è possibile notare le costanti di tempo T_I e T_D , legati ai rispettivi guadagni tramite le equazioni 4.4 e 4.5.

$$T_I = K_P / K_D \quad 4.4$$

$$T_D = K_I / K_P \quad 4.5$$

I parametri che definiscono il PID sono chiamati gradi di libertà del controllore e per comprendere il significato delle costanti di tempo si confrontano i valori dell'azione proporzionale con quella derivativa e quella integrativa nella Figura 4.17, rispettivamente nel caso di errore costante nel tempo.

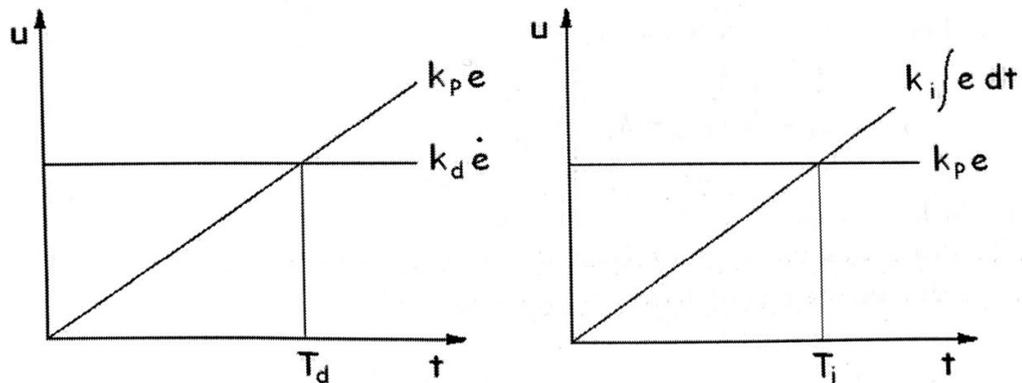


Figura 4.17 Azione proporzionale, derivativa e integrativa [16]

Il particolare, nella Figura 4.17 di destra, si nota come il valore di T_D è pari al tempo necessario affinché l'azione proporzionale eguagli quella derivativa, nel caso in cui l'errore aumenti nel tempo in modo lineare. Allo stesso modo, nella Figura 4.17 di sinistra, è possibile vedere come il valore di T_I è pari al tempo necessario affinché l'azione integrale eguagli quella proporzionale.

4.2.1 Contributo dell'azione proporzionale

La componente proporzionale dipende dalla differenza tra il segnale di setpoint e la variabile di processo, la cui differenza prende il nome di errore. Il segnale di output altro non è che il prodotto tra l'errore ed il guadagno proporzionale K_P . Un aumento del guadagno comporta un aumento della velocità di risposta del sistema di controllo, ossia una riduzione del tempo di salita ed un aumento della banda passante. Diminuisce, inoltre, l'effetto delle variazioni parametriche del sistema. Di contro riduce il margine di stabilità del sistema, pertanto, se il guadagno proporzionale è troppo elevato, la variabile di processo inizia ad oscillare fino a rendere il sistema instabile facendolo oscillare senza controllo.

4.2.2 Contributo dell'azione integrale

La componente integrale somma l'errore nel tempo, ciò comporta che anche un errore minimo fa aumentare lentamente la componente integrale. Tale termine integra l'errore nel tempo, provocando un incremento dell'azione di controllo fino a quando l'errore non è stato completamente annullato. Il contributo principale dell'azione integrale è quella di eliminare l'errore a regime, tanto più K_I è grande tanto più si azzerava velocemente. Tuttavia, un eccessivo incremento di K_I comporta una riduzione del margine di stabilità e una riduzione della banda passante (il sistema è più lento).

4.2.3 Contributo dell'azione derivativa

La componente derivativa fa diminuire il valore dell'output quando la variabile di processo aumenta rapidamente, infatti la risposta derivativa è proporzionale alla velocità di variazione dell'input. La funzione principale del termine derivativo è quella di aumentare i margini di stabilità e la banda passante fornendo un anticipo di fase. Inoltre diminuisce la sovraelongazione e la durata del transitorio. Di contro, amplifica i rumori alle alte frequenze, infatti, la maggior parte dei sistemi di controllo pratici utilizza un tempo derivativo (T_D) molto piccolo. Se il segnale di retroazione del sensore è rumoroso o se la velocità dell'anello di controllo è troppo lenta, la risposta derivativa può rendere instabile il sistema di controllo.

4.2.4 Wind-up dell'integratore

La variabile di controllo di un sistema è limitata sia inferiormente che superiormente. È presente, infatti, una saturazione spesso dovuta ai limiti fisici del sistema, come ad esempio la corsa di un attuatore. Tuttavia, se un sistema è ben progettato, la variabile di controllo assume valori ben lontani dai limiti di saturazione. Al contrario si incorre nel fenomeno del *wind-up* dell'integratore qualora ci siano rilevanti variazioni del setpoint o del disturbo di carico. In Figura 4.19 è riportato lo schema del sistema controllato in presenza di una saturazione sull'uscita del controllo. Uno schema analogo può essere considerato nel caso in cui si consideri la saturazione sull'attuatore.

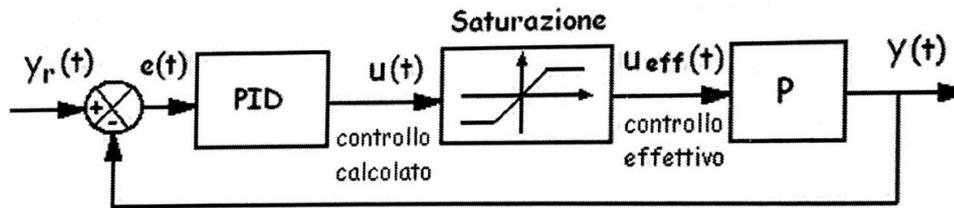


Figura 4.18 Schema di un sistema con saturazione sull'uscita del regolatore [16]

Con riferimento alla Figura 4.19, in caso di errore positivo la parte integrativa del controllore aumenta al passare del tempo e se l'errore $e(t)$ non si annulla o diventa negativo, la variabile di controllo u_{eff} viene saturata e rimane costante. In questo caso, la variabile u cresce ma il processo evolve come se fosse in anello aperto, ossia che ad una variazione di y non corrisponde una variazione di u_{eff} . Il termine integrativo diminuisce solo quando l'errore inverte di segno. Per ovviare a questo fenomeno si può interrompere il contributo del termine integrale non appena l'uscita del controllore satura.

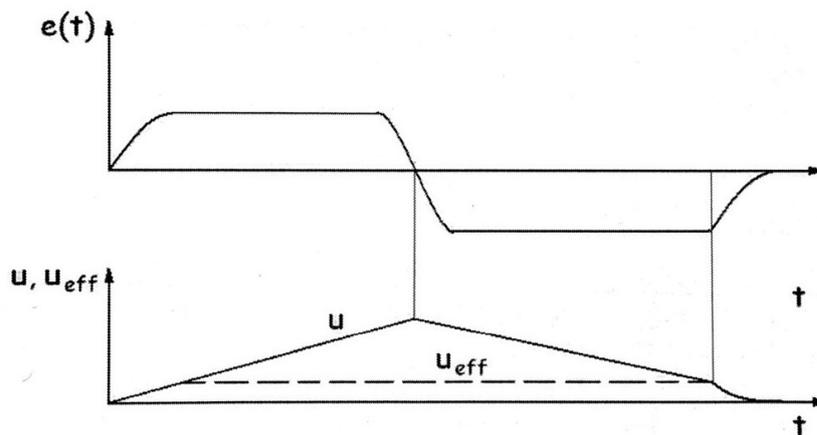


Figura 4.19 Andamento nel tempo dell'errore, del controllo calcolato e del controllo effettivo [16]

4.2.5 PID in cascata

Nello schema classico di controllo a controreazione l'azione correttiva incomincia solo dopo che l'effetto di disturbi esterni si manifesta sulla variabile controllata. Tuttavia, nel caso in cui si verificano disturbi ampi e frequenti, il comportamento del sistema di controllo non è soddisfacente. Pertanto, in alcuni casi, è possibile misurare l'effetto dei disturbi indirettamente su una variabile intermedia. Si ipotizzi, ad esempio, che il processo sia costituito da due sottosistemi

in serie descritti dalle funzioni di trasferimento $P_1(s)$ e $P_2(s)$ e che sull'uscita di $P_1(s)$ agisca un disturbo d , come mostrato in Figura 4.20.

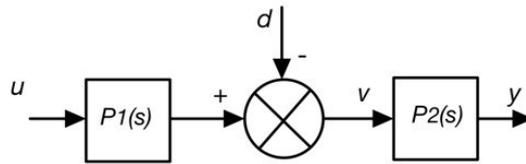


Figura 4.20 Schema di controllo classico divisibile in due processi

Ipotizzando che la variabile v sia accessibile, si può usare per chiudere un ulteriore anello di controreazione come illustrato in Figura 4.21.

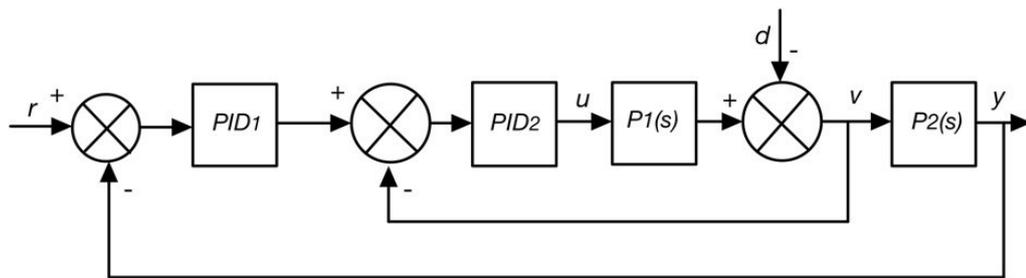


Figura 4.21 Schema di un controllore PID in cascata

In altri termini un anello interno ad elevate prestazioni rende l'effetto del disturbo d sull'ingresso v (e quindi sull'intero sistema di controllo) trascurabile. Questo metodo si può utilizzare anche nel caso in cui il sistema abbia due o più parametri da regolare. In generale si possono fare le seguenti considerazioni:

- l'anello interno in uno schema di controllo in cascata ha una scala dei tempi di almeno un ordine di grandezza inferiore (è più veloce) rispetto all'anello esterno;
- si può usare un semplice controllo di tipo proporzionale per l'anello interno in quanto eventuali errori di regime verranno compensati da un'azione integrale nell'anello esterno;
- lo stesso principio può essere esteso a più anelli. Il controllore dell'anello interno viene spesso chiamato controllore secondario mentre il controllore dell'anello esterno controllore primario.

4.2.6 Controllore PID tramite il blocco PID_Compact

L'istruzione PID_Compact su TIA Portal permette di utilizzare un regolatore PID con ottimizzazione integrata. Esso è un regolatore PIDT1 con anti-windup e ponderazione del componente P e D, il cui schema a blocchi è riportato in Figura 4.22.

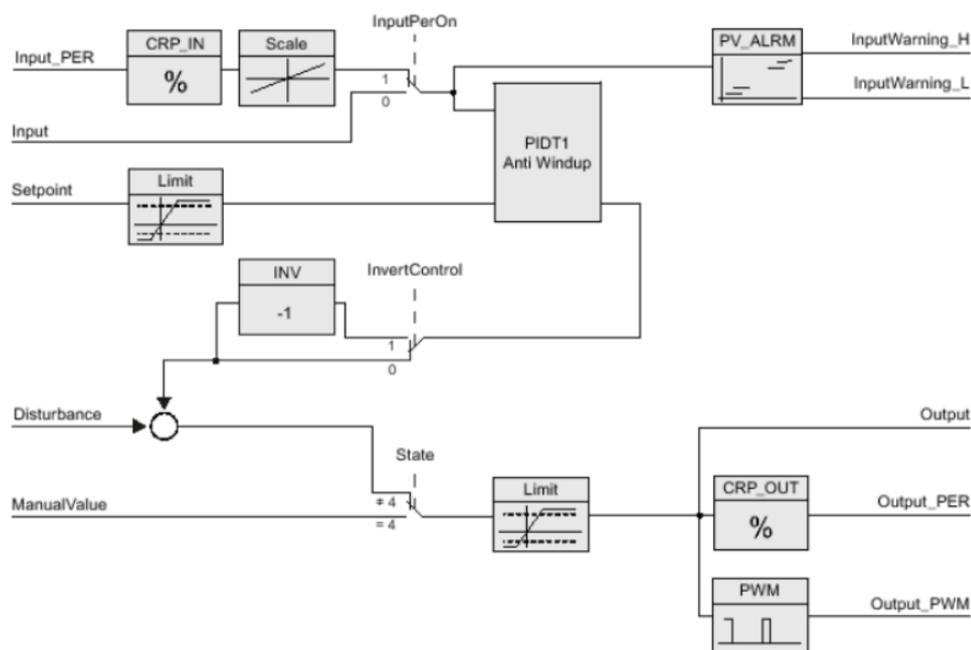


Figura 4.22 Schema a blocchi del PID_Compact

Per utilizzarlo è necessario richiamarlo a intervalli costanti nel ciclo di un OB di schedulazione orologio, il quale lo richiama per ogni intervallo definito nelle impostazioni dell'OB. Una volta inserito il blocco funzionale, è possibile configurarlo cliccando sul pulsante indicato in Figura 4.23

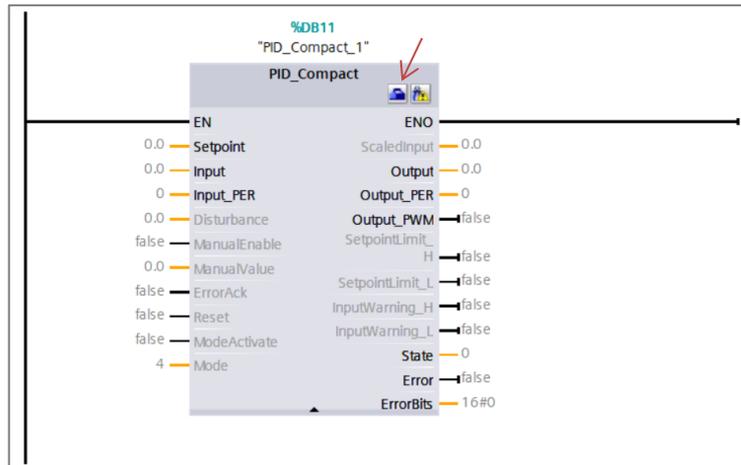


Figura 4.23 Blocco PID_Compact su TIA Portal

Si aprirà una schermata per impostare le caratteristiche per il corretto funzionamento del controllore PID. Fanno parte delle “Impostazioni di base” il “Modo di regolazione” ed i “Parametri di IN/OUT”, come nota in Figura 4.24

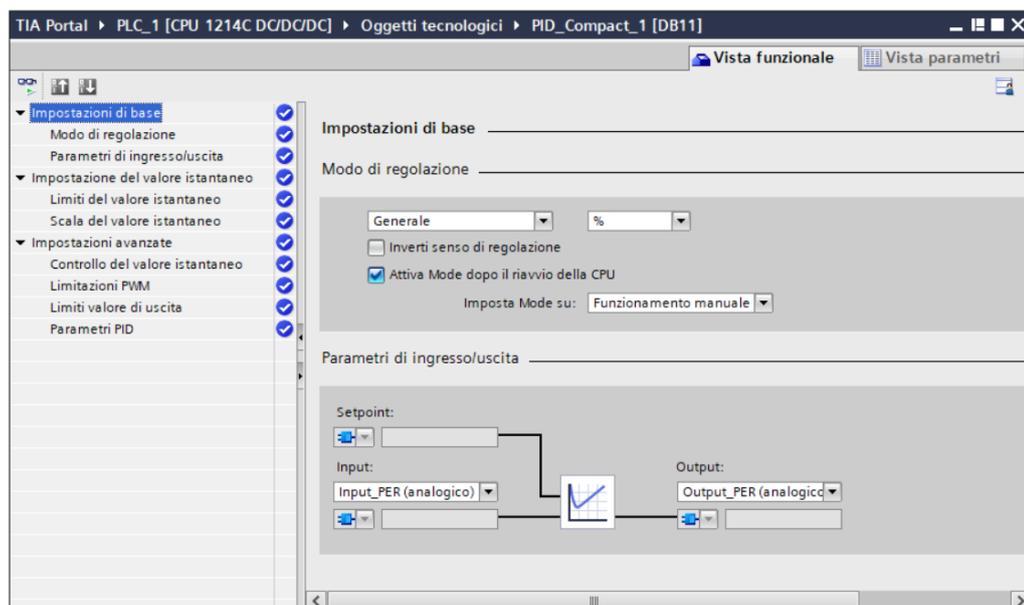


Figura 4.24 Impostazioni di base del blocco PID_Compact

Nel primo campo si sceglie il tipo di grandezza da regolare (pressione, lunghezza, angolo, ecc.) con relativa unità di misura. Dopodichè se la spunta su “Inverti senso di regolazione” è presente, un aumento della differenza di regolazione determina una riduzione del valore di uscita. Si imposta anche il modo di funzionamento e si può scegliere tra:

- Ottimizzazione iniziale
- Ottimizzazione fine
- Funzionamento automatico
- Funzionamento manuale

Infine, in questa schermata è possibile scegliere la tipologia dei parametri di input e di output. In particolare, si sceglie il valore

- Input/Output: quando la variabile è un numero reale
- Input PER/Output PER: quando si utilizza un segnale analogico
- Output PWM: quando si utilizza la tecnica PWM direttamente col PID

Successivamente, si scelgono i limiti fisici della grandezza come mostrato in Figura 4.25

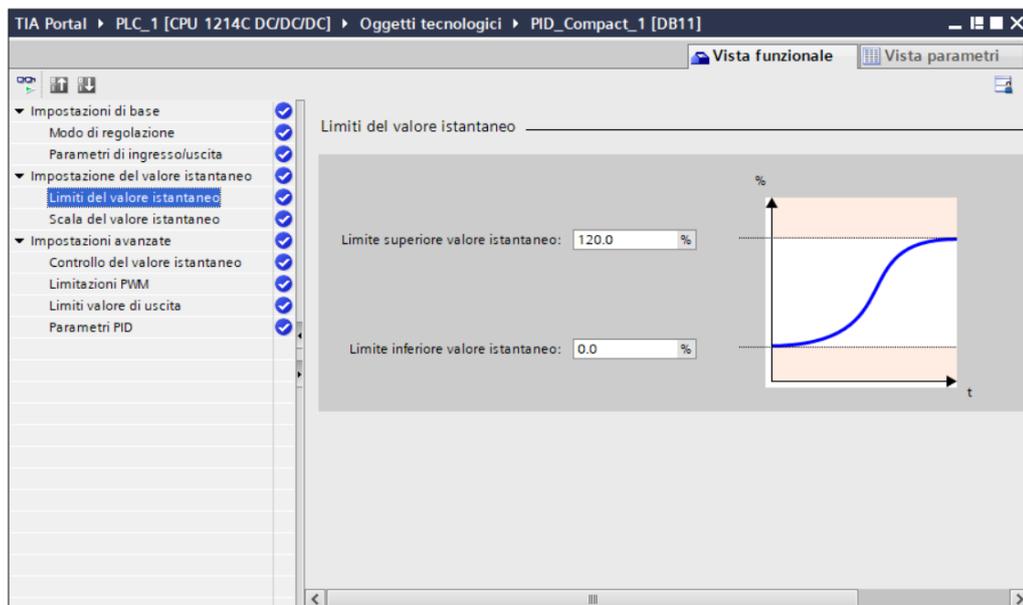


Figura 4.25 Limiti del valore istantaneo PID_Compact

Nelle impostazioni della scala del valore istantaneo è possibile scegliere il limite inferiore e superiore dell'Input_PER, come si può notare in Figura 4.26.

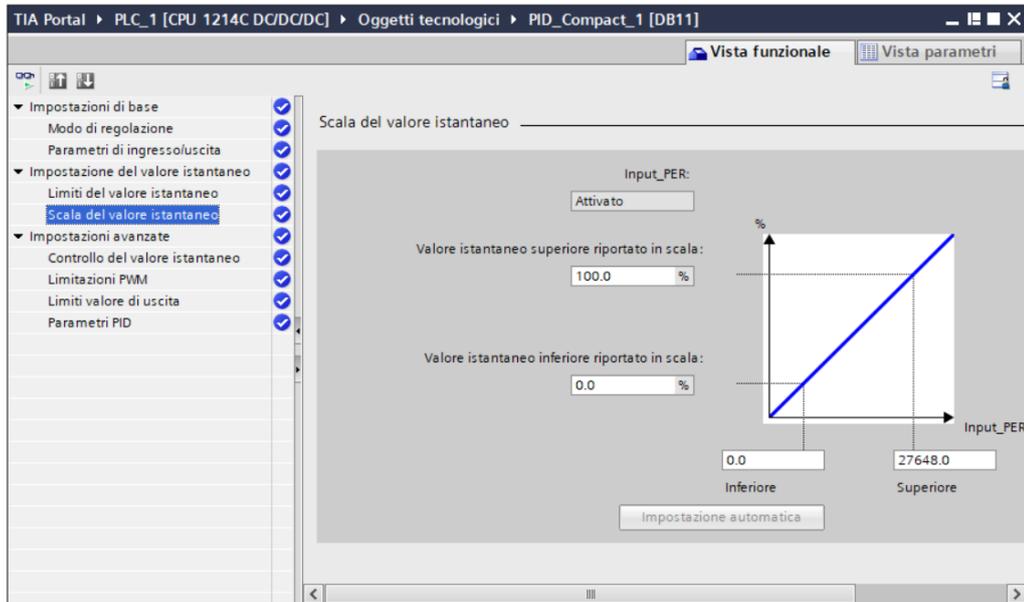


Figura 4.26 Scala del valore istantaneo dell'Input_PER

Nelle impostazioni avanzate, invece, è possibile impostare la percentuale di limite del segnale di input, come riportato in Figura 4.27.

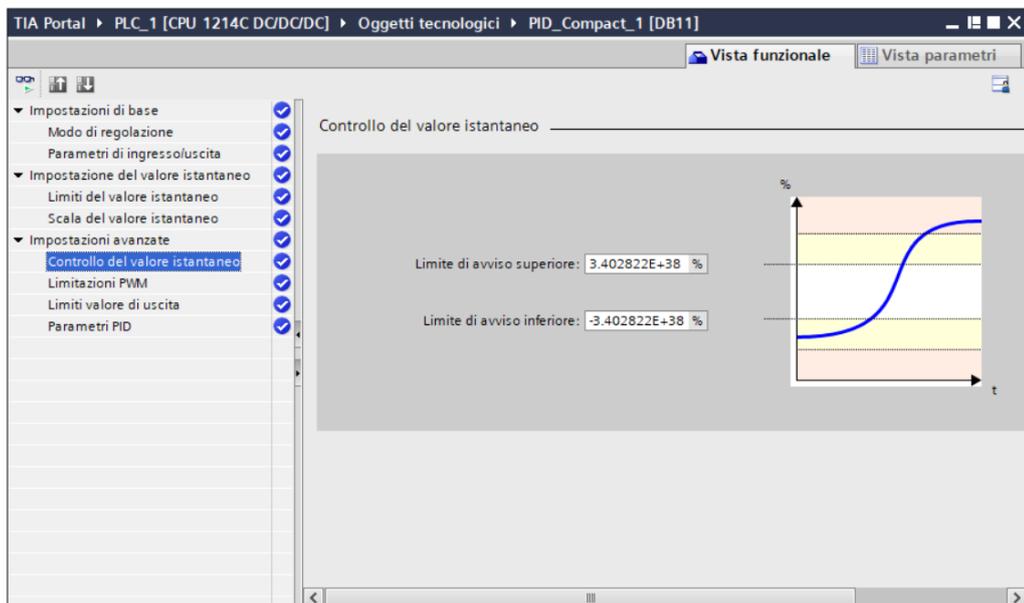


Figura 4.27 Controllo del valore istantaneo del PID

In Figura 4.28 è possibile scegliere il valore del tempo minimo di azionamento e spegnimento del PWM.

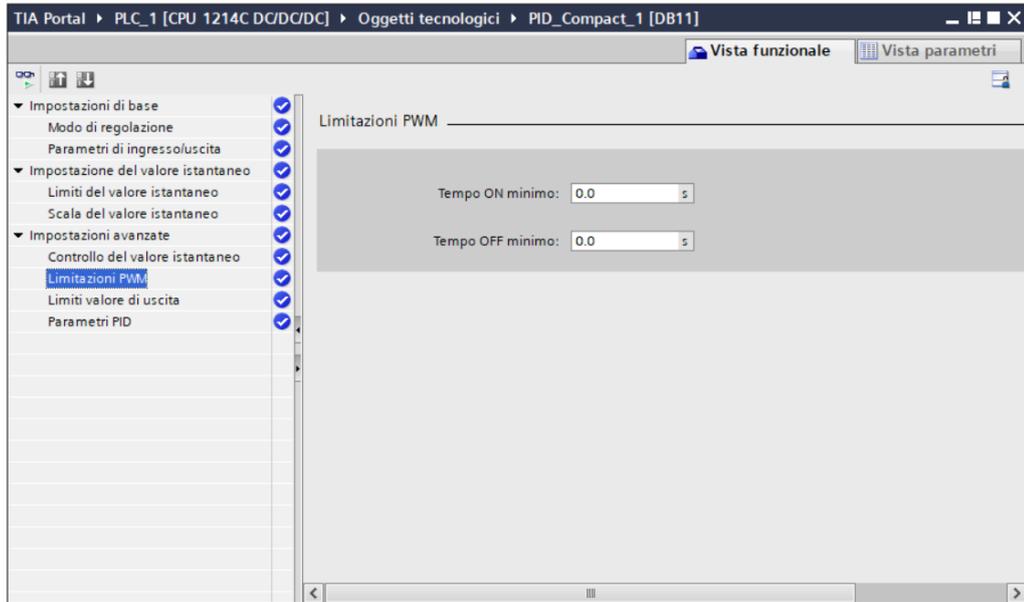


Figura 4.28 Limitazione PWM del PID

Nella schermata in Figura 4.29, invece si configurano i limiti del valore di output, impostando anche un valore sostitutivo in caso di errori.

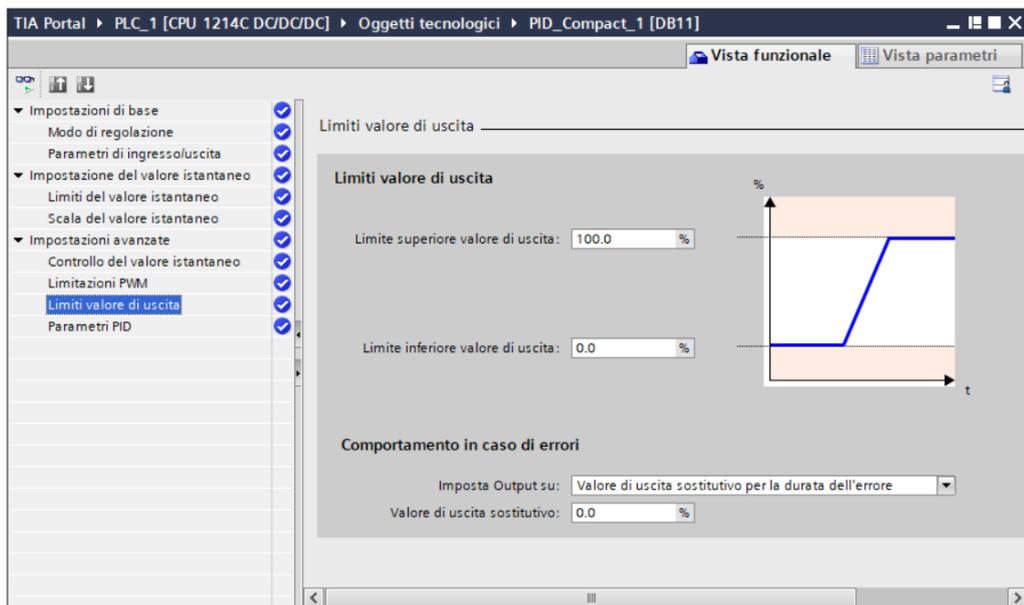


Figura 4.29 Limiti del valore di uscita

Infine, in Figura 4.30 è riportata la pagina per l'immissione manuale dei parametri PID. L'algoritmo PID utilizza la formula riportata nell'equazione 4.6.

$$y = K_P \left[(bw - x) + \frac{1}{T_I s} (w - x) + \frac{T_D s}{aT_D s + 1} (cw - x) \right] \quad 4.6$$

dove:

- y è il valore di uscita dell'algoritmo
- K_P è il guadagno proporzionale
- T_I è il tempo di integrazione
- T_D è il tempo derivativo
- a è il coefficiente per il ritardo derivativo
- b è la ponderazione del componente P
- c è la ponderazione del componente D

Nell'ultimo campo, riportato in Figura 4.30, è possibile scegliere il tempo di campionamento dell'algoritmo poiché il sistema regolato richiede un certo tempo per reagire ad una variazione del valore di uscita. Nel caso si utilizzasse l'Output_PWM, il tempo di campionamento dell'algoritmo PID è pari al periodo della modulazione dell'ampiezza dell'impulso. È necessario pertanto che il tempo di ciclo non sia maggiore di un decimo del tempo di campionamento dell'algoritmo PID.

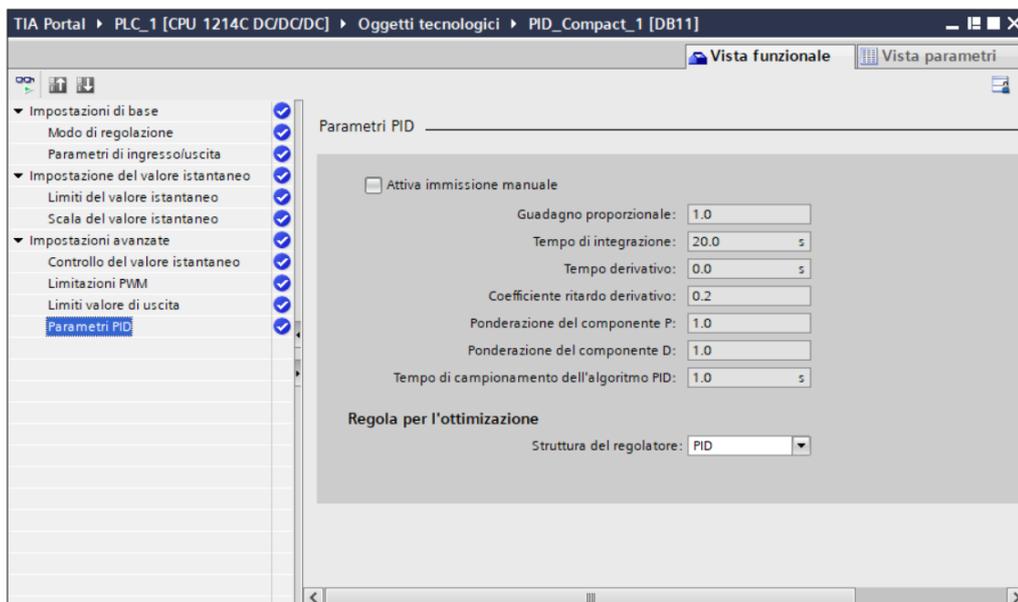


Figura 4.30 Parametri PID del PID_Compact

È importante ricordare come, il blocco PID Compact va inserito in un blocco organizzativo schedulazione orologio. Inoltre, nel momento in cui si inserisce il blocco PID, si crea in automatico un blocco dati che è possibile trovare nella sezione Blocchi di sistema > Risorse del programma. Al suo interno sono presenti tutte le variabili necessarie al funzionamento del controllore PID, con relativo commento. In Figura 4.31 è riportato l'esempio di un generico blocco dati generato in automatico dall'inserimento del PID Compact.

PID_Compact						
	Nome	Tipo di dati	Valor...	Commento
1	▼ Input					
2	Setpoint	Real	0.0	...	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	controller setpoint input
3	Input	Real	0.0	...	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	actual value of process as REAL
4	Input_PER	Int	0	...	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	actual value of process from periphery
5	Disturbance	Real	0.0	...	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	disturbance intrusion
6	ManualEnable	Bool	false	...	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	activate manual input to overwrite output
7	ManualValue	Real	0.0	...	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	input for manual value
8	ErrorAck	Bool	false	...	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	reset error message
9	Reset	Bool	false	...	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	reset the controller
10	ModeActivate	Bool	false	...	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	enable mode
11	▼ Output					
12	ScaledInput	Real	0.0	...	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	scaled peripheral input value from process
13	Output	Real	0.0	...	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	output value in REAL format
14	Output_PER	Int	0	...	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	output value in peripheral format
15	Output_PWM	Bool	false	...	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	pulse width modulated output value
16	SetpointLimit_H	Bool	false	...	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	setpoint is limited at highest level
17	SetpointLimit_L	Bool	false	...	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	setpoint is limited at lowest level
18	InputWarning_H	Bool	false	...	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	input value exceeded high warning level
19	InputWarning_L	Bool	false	...	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	input value exceeded low warning level
20	State	Int	0	...	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	status of controller (0=INACTIVE,1=SUT,...
21	Error	Bool	false	...	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	error flag
22	ErrorBits	DWord	16#0	...	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	error message
23	▼ InOut					
24	Mode	Int	4	...	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	mode selection
25	▶ Static					

Figura 4.31 Blocco dati del PID compact

5 Programmazione del PLC

La programmazione del PLC è stata realizzata utilizzando il software TIA Portal v16 rilasciato dalla Siemens. Il linguaggio utilizzato per la programmazione è il Ladder, anche detto KOP. Esso è un linguaggio di programmazione grafico basata sugli schemi elettrici. Il programma viene rappresentato in alcuni segmenti, ciascuno dei quali presenta una linea di corrente sul margine sinistro dalla quale partono i montanti, sui quali sono disposti i contatti. Le funzioni più complesse, invece, sono rappresentate tramite dei box. Si possono utilizzare quattro tipi di blocchi: i blocchi organizzativi, i blocchi funzione, i blocchi funzionali ed infine i blocchi dati.

I blocchi organizzativi (OB) costituiscono l'interfaccia tra il sistema operativo e il programma utente. Essi vengono richiamati dal sistema operativo e comandano il comportamento del sistema di automazione all'avvio, l'elaborazione ciclica del programma, l'elaborazione del programma comandata da un allarme ed il trattamento degli errori. In particolare, si distinguono OB di schedulazione orologio, i quali permettono di avviare programmi indipendentemente dall'elaborazione ciclica del programma in intervalli definiti.

I blocchi funzione (FC) sono blocchi di codice senza memoria ai sensi della norma IEC 1131-3. Essi offrono la possibilità di trasferire i parametri nel programma utente, motivo per il quale sono utili per programmare costrutti complessi. Essendo sprovviste di memoria dati, quando la funzione viene richiamata i parametri formali devono essere sostituiti con quelli attuali. Un blocco funzione contiene un programma che viene eseguito quando la funzione viene richiamata da un altro blocco di codice.

I blocchi funzionali (FB) sono blocchi di codice che memorizzano i parametri di ingresso, uscita e transito in modo permanente nei blocchi dati di istanza così da poterne disporre anche dopo l'elaborazione del blocco.

I blocchi dati (DB) sono preposti alla memorizzazione dei dati del programma, essi contengono quindi dati variabili che vengono utilizzati da tutti gli altri blocchi.

In questo capitolo si analizza la struttura del codice, analizzando tutti i blocchi utilizzati per la programmazione del sistema. Nell'appendice B è riportato l'intero codice di programmazione.

5.1 Blocchi organizzativi

Nella struttura del codice utilizzato, si fa ricorso a tre blocchi organizzativi: "Main", "PID Posizione", "PID completo". Nei seguenti sottocapitoli si analizzano i segmenti più significativi.

5.1.1 Blocco organizzativo OB1 Main

Il blocco Main viene utilizzato per richiamare i blocchi funzioni, esso costituisce il blocco organizzativo principale e rappresenta la prima parte del codice ad essere eseguita. In questo caso è costituito da nove segmenti, all'interno dei quali sono riportati i blocchi funzioni FC con relativo contatto per l'azionamento, quando è necessario.

5.1.2 Blocco Cycle Interrupt OB30 PID Posizione

Il blocco Cycle Interrupt OB30 PID Posizione è un OB di schedulazione orologio con clock di tempo impostato ad 2 ms. Si attiva premendo il pulsante fisico sul PLC (I0.2) oppure gli appositi pulsanti sull'HMI, come si può vedere in Figura 5.1 nella quale è riportato il primo segmento del blocco. Se l'istruzione JMP è attiva (RLO = 1), infatti, si interrompe l'elaborazione lineare del programma per proseguirla in un altro segmento. Quest'ultimo viene identificato da un'etichetta di salto (LABEL) il cui nome va indicato nel segno posto sopra l'istruzione, nel caso in questione è l'ultimo segmento presente in questo blocco organizzativo. Se la condizione nell'ingresso dell'istruzione non è soddisfatta (RLO = 0), l'elaborazione prosegue nel segmento sottostante. L'utilizzo dell'istruzione JMP è necessario per evitare che il blocco Cycle Interrupt parta all'immediata accensione del PLC.

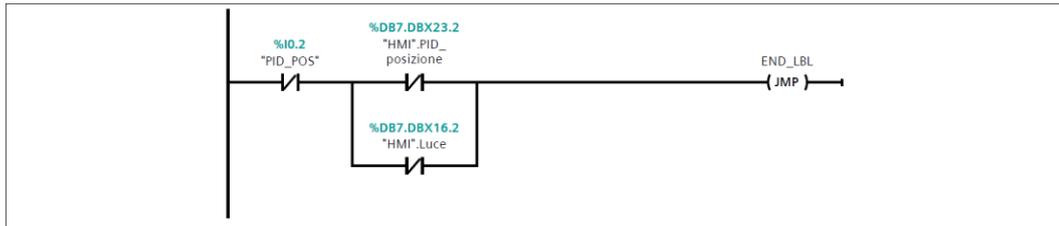


Figura 5.1 Segmento 1: attivazione del PID per il controllo posizione

Il segmento 2, invece, riportato in Figura 5.2, permette di cambiare il valore di x_{SET} da 0 a 250 utilizzando il pulsante fisico IO.0. Il contatto normalmente chiuso evita l'utilizzo quando si utilizza l'HMI.

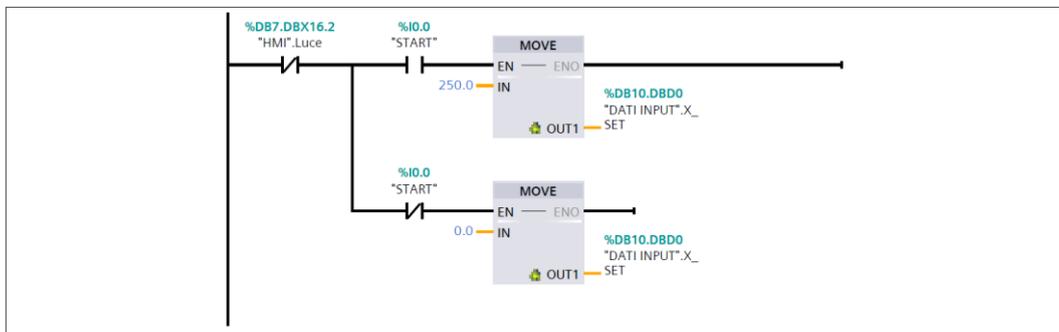


Figura 5.2 Segmento 2: determinazione del valore di x_{SET}

In Figura 5.3 è riportato il segmento 3 il quale importa i valori dalle variabili x_{SET} e x_{FB} del blocco dati "Dati Input" nelle corrispettive variabili del blocco dati "PID".

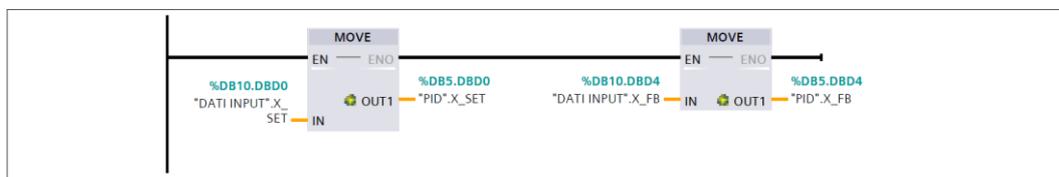


Figura 5.3 Segmento 3: importare valore di x_{set} e di $x_{feedback}$

Nel segmento 4 è inserito il blocco PID_Compact, il quale riceve come input il valore di x_{FB} e come setpoint x_{SET} . Si genera un segnale di Output_PWM, come riportato in Figura 5.4.

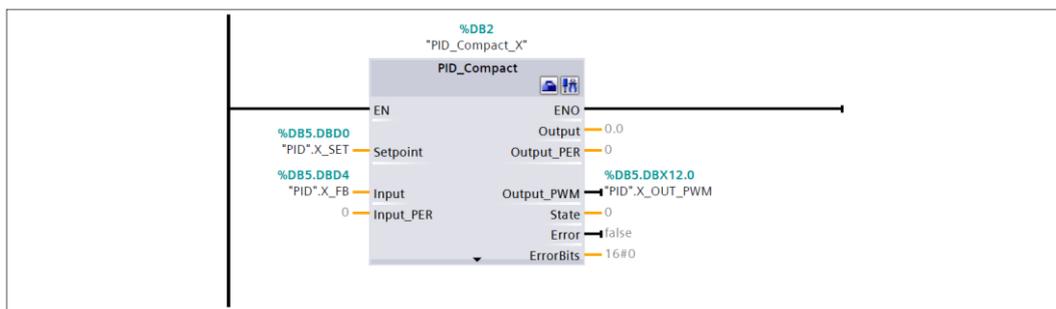


Figura 5.4 Segmento 4: PID Compact X

In Tabella 5.1 sono riportate le principali configurazioni del blocco PID Compact per il controllo della sola posizione del carrello.

Configurazione PID Compact	
Impostazione	Commento
Modo di regolazione	Lunghezza
Unità di misura	mm
Parametro di IN	Input
Parametro di OUT	Output_PWM
Limite superiore IN	500 mm
Limite inferiore IN	0 mm
Limite superiore OUT	100%
Limite inferiore OUT	0%

Tabella 5.1 Caratteristiche PID Compact

Il contatto X_OUT_PWM modula l'attivazione dei merker M0.1 ed M0.0, in particolare, se x_{SET} è minore di x_{FB} si attivano le valvole dispari e si attiva l'InvertControl, al contrario se è maggiore si attivano quelle pari e si disattiva l'InvertControl del PID Compact. I due segmenti sono presenti in Figura 5.5.

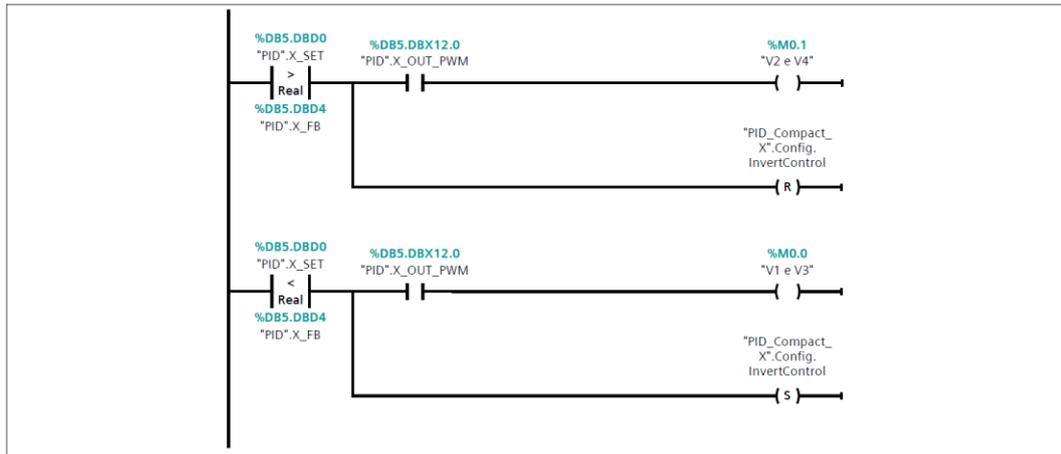


Figura 5.5 Segmento 5: attivazione merker delle valvole e InvertControl

In Figura 5.6 e Figura 5.7 i due segmenti per attivare le uscite digitali tramite i merker M0.0 ed M0.1. La scelta della valvola da utilizzare si può effettuare sia tramite i pulsanti fisici che tramite l'HMI.

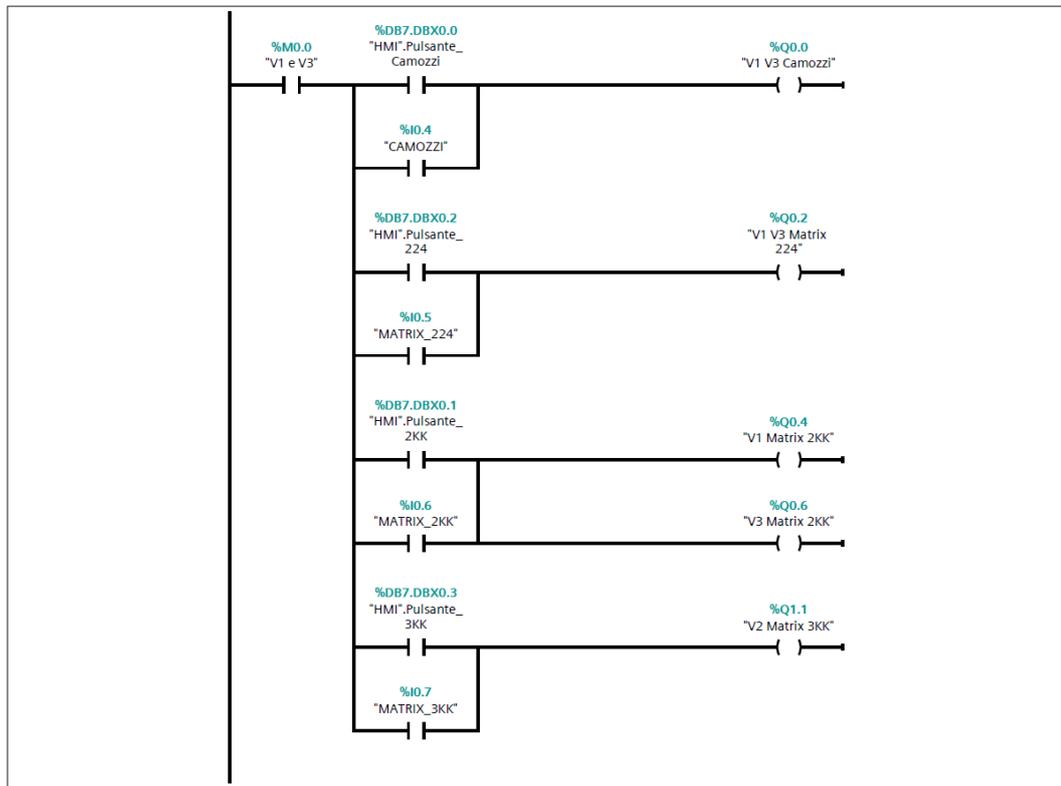


Figura 5.6 Segmento 6: azionamento delle uscite delle valvole dispari

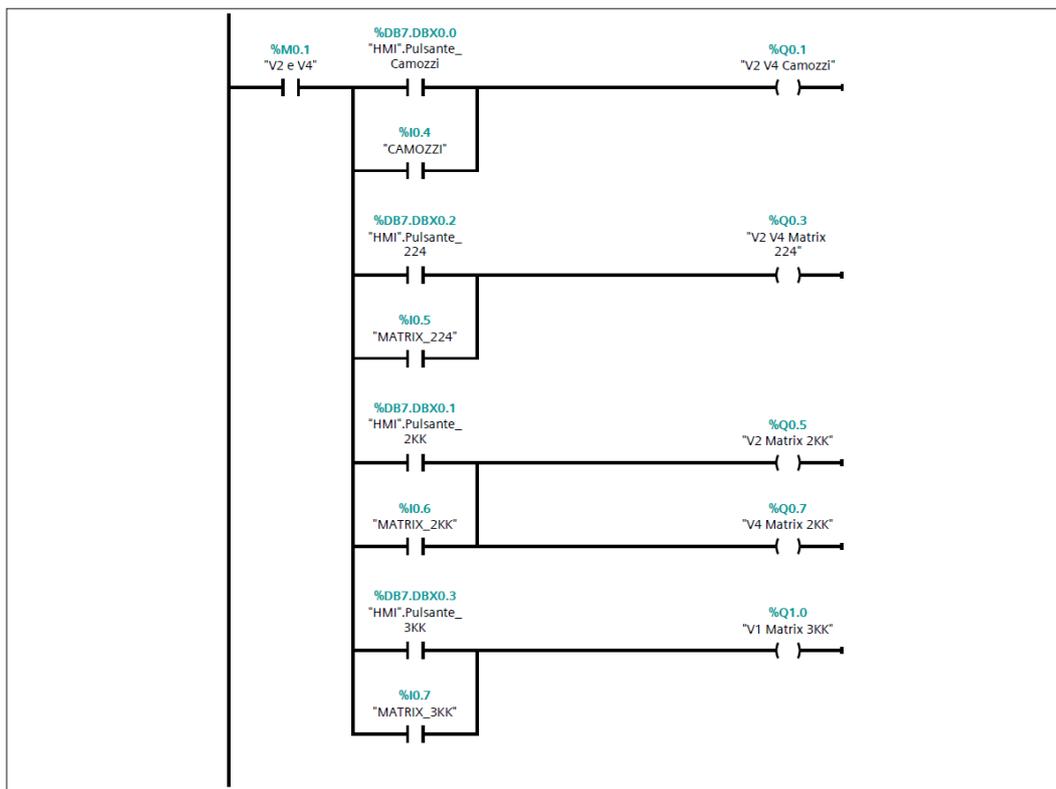


Figura 5.7 Segmento 6: azionamento delle uscite digitali delle valvole

Infine, nel segmento 5.8 è riportato il merker di disattivazione del blocco organizzativo OB30.

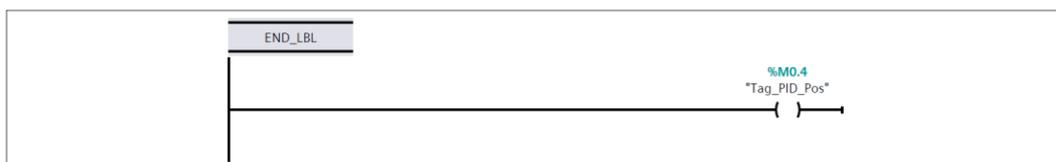


Figura 5.8 Segmento 7: chiusura del PID di posizione

5.1.3 Blocco Cycle Interrupt OB31 PID Completo

Il blocco Cycle Interrupt OB31 PID Completo è un OB di schedulazione orologio con clock di tempo impostato ad 1 ms. Si attiva premendo il pulsante fisico sul PLC (I0.3) oppure gli appositi pulsanti sull'HMI, come si può vedere in Figura

5.9 nella quale è riportato il primo segmento del blocco. In questo caso si riportano solo i segmenti che si differenziano dal blocco OB30 PID Posizione.

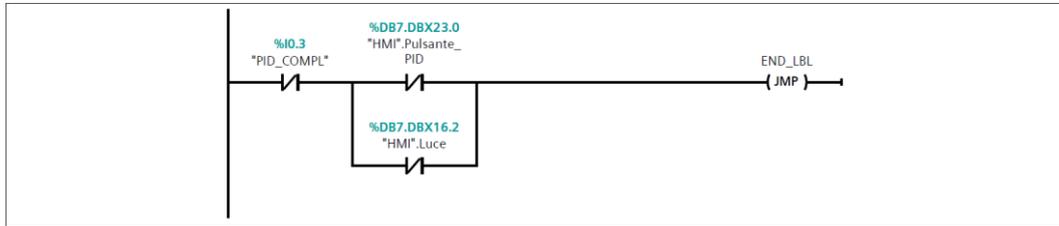


Figura 5.9 Segmento 1: attivazione del PID completo

Il secondo segmento, invece, riportato in Figura 5.10, permette di cambiare il valore di x_{set} tramite il pulsante fisico (I0.0), qualora però non si utilizzi l’HMI. Il contatto normalmente chiuso, infatti, se attivato non permette l’utilizzo del pulsante. Questo per evitare che si sovrascriva il valore inserito da HMI.

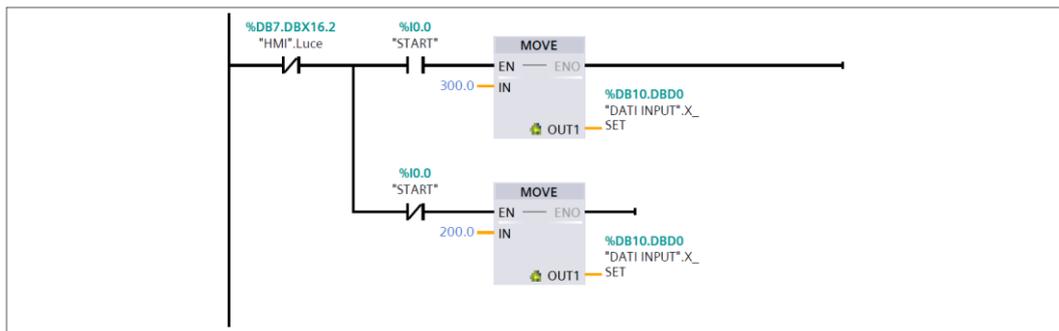


Figura 5.10 Segmento 2: scelta del valore di x_{set} tramite pulsante

Il segmento 3 importa i valori di x_{SET} ed x_{FB} come descritto nel capitolo precedente. In Figura 5.11, invece, il segmento 4 sposta il valore della variabile θ_{FB} dal blocco dati “DATI INPUT” a quello “PID”.

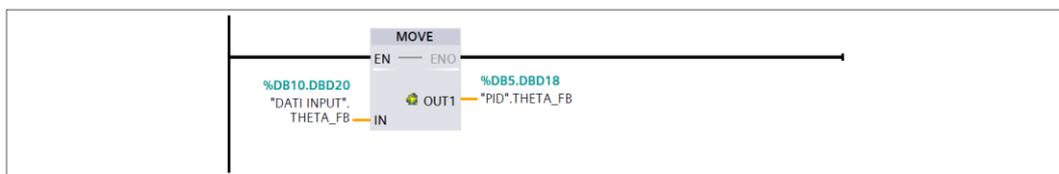


Figura 5.11 Segmento 4: spostamento della variabile $\theta_{feedback}$

In Figura 5.12 è riportato il segmento nel quale sono presenti i due blocchi PID, separati da un blocco MOVE. Il primo PID è quello più esterno, utilizzato per il controllo della posizione, riceve come input il valore di X_{FB} e come setpoint

quello di X_SET. L'output, riportato nella variabile X_OUTPUT, è un angolo ed è compreso tra -50° e 50°. Tramite il blocco MOVE, quest'ultimo valore viene riportato nella variabile THETA_SET. La quale viene confrontata con THETA_FB nel PID interno, per il controllo dell'angolo. In questo caso si utilizza un'uscita PWM per l'azionamento delle valvole. Le caratteristiche dei due blocchi PID sono stati schematizzati rispettivamente nella Tabella 5.2 e nella Tabella 5.3.

Configurazione PID_x	
Impostazione	Commento
Modo di regolazione	Lunghezza
Unità di misura	Mm
Parametro di IN	Input
Parametro di OUT	Output
Limite superiore IN	500 mm
Limite inferiore IN	-500 mm
Limite superiore OUT	0.5%
Limite inferiore OUT	-0.5%

Tabella 5.2 Caratteristiche PID_x

Configurazione PID_θ	
Impostazione	Commento
Modo di regolazione	Angolo
Unità di misura	°
Parametro di IN	Input
Parametro di OUT	Output
Limite superiore IN	0.5°
Limite inferiore IN	-0.5°
Limite superiore OUT	1%
Limite inferiore OUT	-1%

Tabella 5.3 Caratteristiche PID_θ

Il comando MOVE viene utilizzato per associare il valore di THETA_SET pari a quello del PID di posizione.

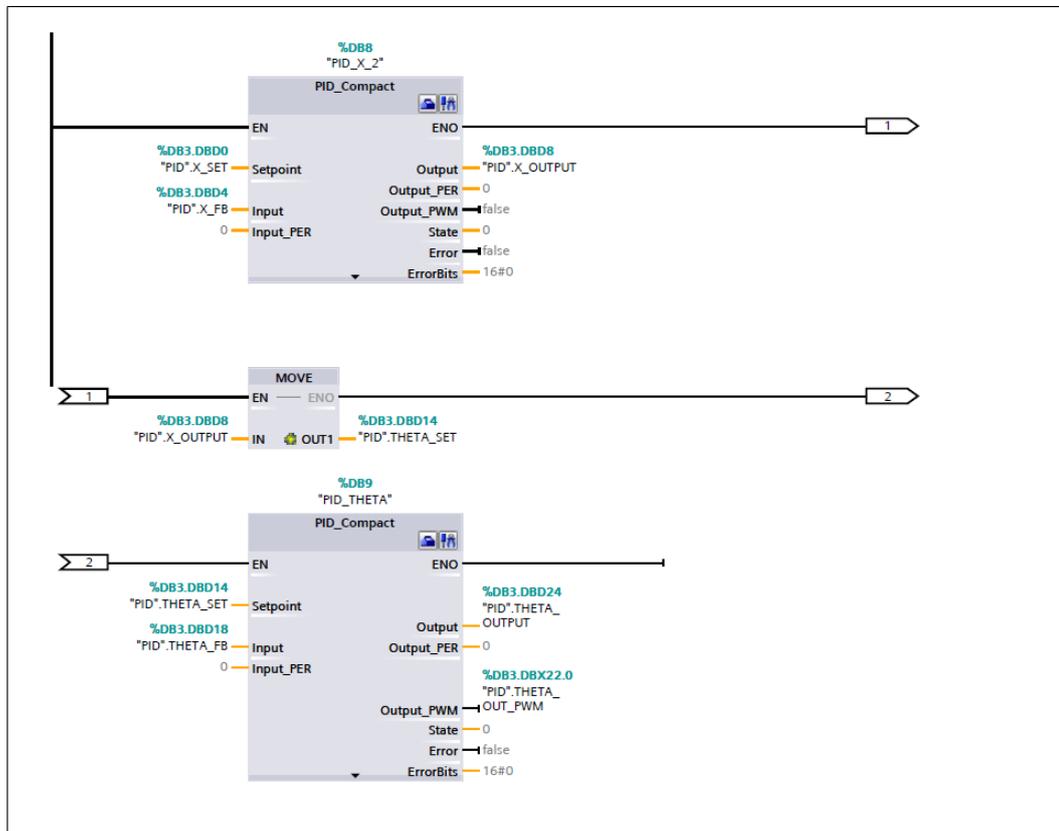


Figura 5.12 Segmento 5: PID di posizione e PID angolare

In Figura 5.13, il segmento 6 mantiene attivi i merker delle valvole. Si può disattivare, attivando il contatto M0.5.

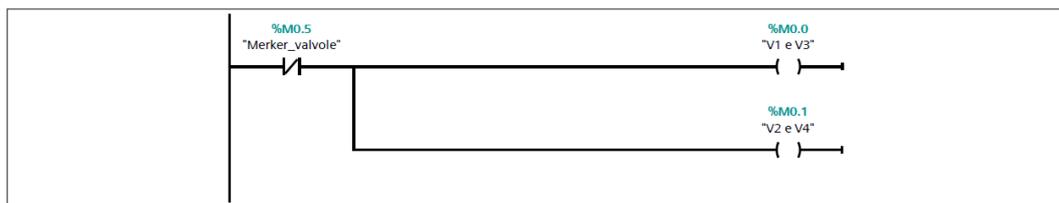


Figura 5.13 Segmento 6: attivazione dei merker per il CTRL_PWM

In Figura 5.14 e Figura 5.15, i segmenti 7 e 8 calcolano il valore del duty cycle a partire dal valore dell'output del PID₀. In particolare è scalata dal valore minimo fino al 100%. Il valore minimo, impostato al 45%, è necessario per tenere entrambe le camere un minimo piene per ammortizzare l'uscita ed il rientro del pistone.

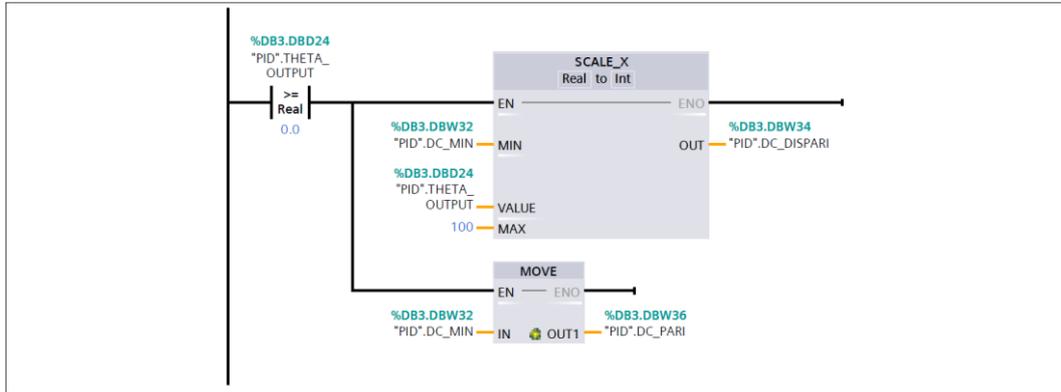


Figura 5.14 Segmento 7: calcolo del duty cycle per le valvole dispari

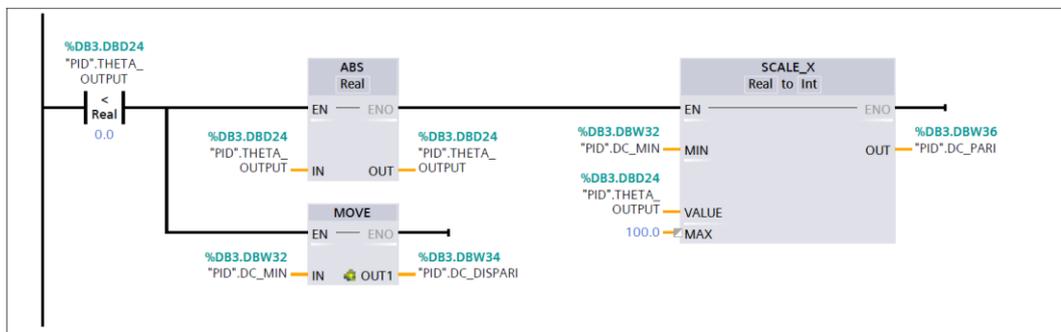


Figura 5.15 Segmento 8: calcolo del duty cycle per le valvole pari

Il segmento 9 ed il 10, riportati rispettivamente in Figura 5.16 e Figura 5.17, permettono di comandare le uscite veloci tramite il valvore del duty cycle calcolato in precedenza. In entrambi i casi, i segmenti si attivano tramite gli appositi pulsanti fisici o sull'HMI.

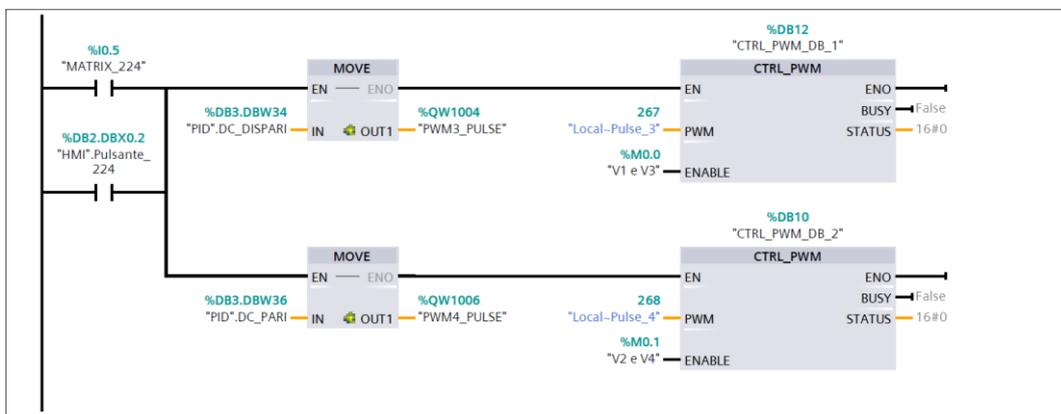


Figura 5.16 Segmento 9: comando valvole Matrix 224

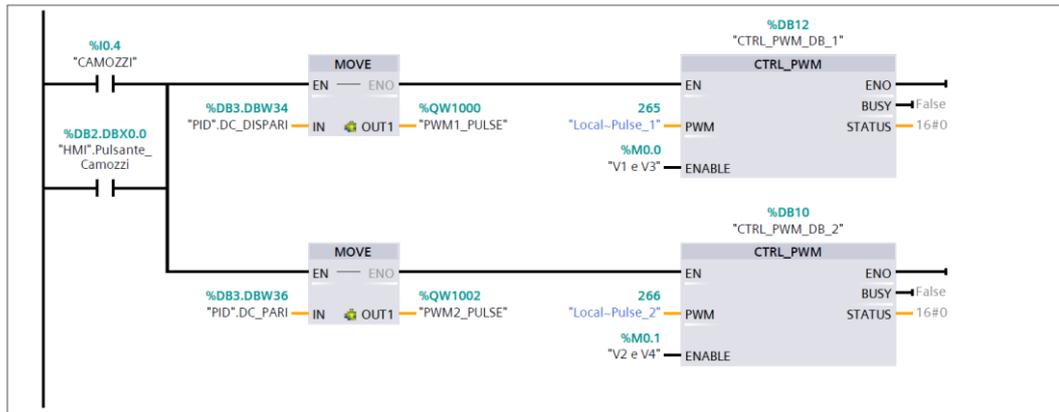


Figura 5.17 Segmento 10: comando valvole Camozzi

In Figura 5.18 è riportato il segmento 11 che permette di ripristinare il valore del termine integrale ogni qualvolta il pendolo si colloca nei due estremi di oscillazione. In questi due casi, infatti, il controllo deve terminare in quanto non si dispone della corsa a sufficienza per riportare in verticale il pendolo. Se non ci fosse l'azzeramento, ci vorrebbe più tempo per far sì che l'errore accumulato venga smaltito.

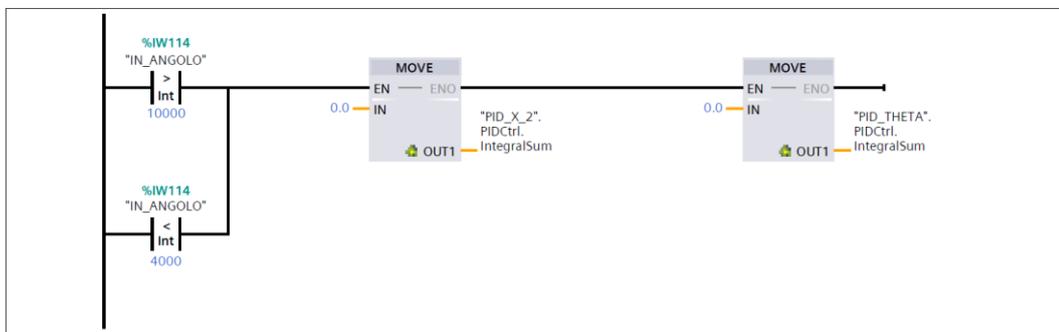


Figura 5.18 Segmento 11: ripristino del termine integrale

Il segmento, in Figura 5.19, attiva il merker per la chiusura e disattivazione del blocco organizzativo.

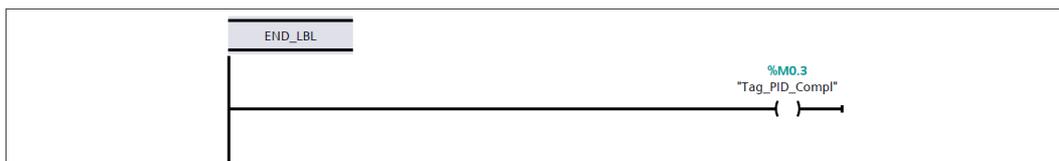


Figura 5.19 Segmento 10: merker chiusura PID Completo

5.2 Blocchi funzione

5.2.1 Blocco funzione FC1 “CTRL_PWM”

Il blocco funzione FC1 “CTRL_PWM” viene attivato quando si vuole utilizzare la modulazione PWM per il controllo della posizione del carrello. Esso si compone di otto segmenti che sono stati riportati nelle successive figure.

In Figura 5.20 è riportato il primo segmento che viene utilizzato per spostare le variabili di x_{SET} e x_{FB} nelle corrispondenti variabili appartenenti al blocco dati “PWM”.



Figura 5.20 Segmento 1: importare i dati acquisiti

In Figura 5.21 è riportato il segmento 2, il quale, tramite la funzione SUB calcola l'errore come differenza tra x_{SET} e x_{FB} . Successivamente si calcola il valore assoluto.

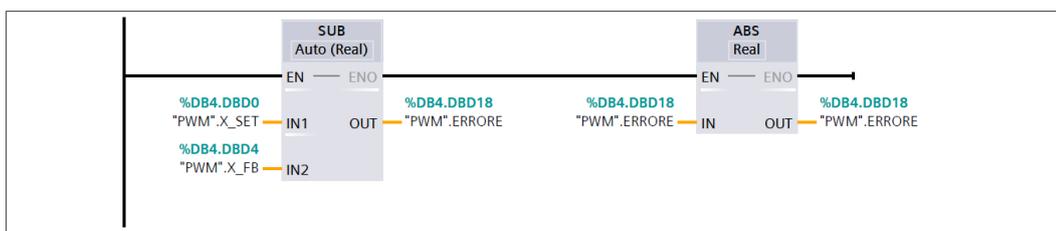


Figura 5.21 Segmento 2: calcolo dell'errore

In Figura 5.22 ed in Figura 5.23 sono riportati i segmenti per il calcolo del valore del duty cycle. Nel primo caso, essendo fuori dal range di regolazione, il valore del dc è massimo. Nel secondo caso, essendo nel range di regolazione, viene prima normalizzato da 0 al valore massimo di range e poi scalato da 0 a 100.

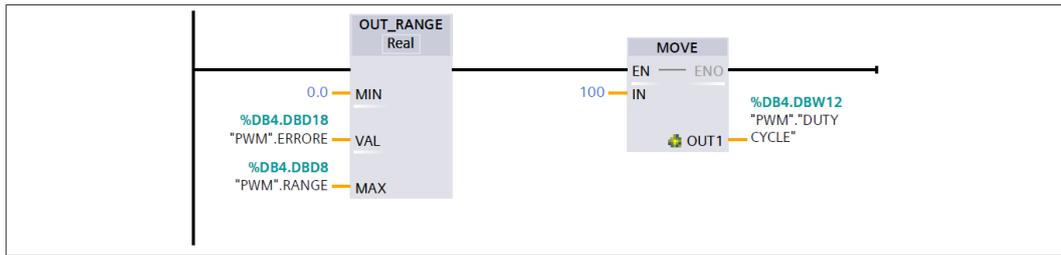


Figura 5.22 Segmento 3: calcolo del duty cycle

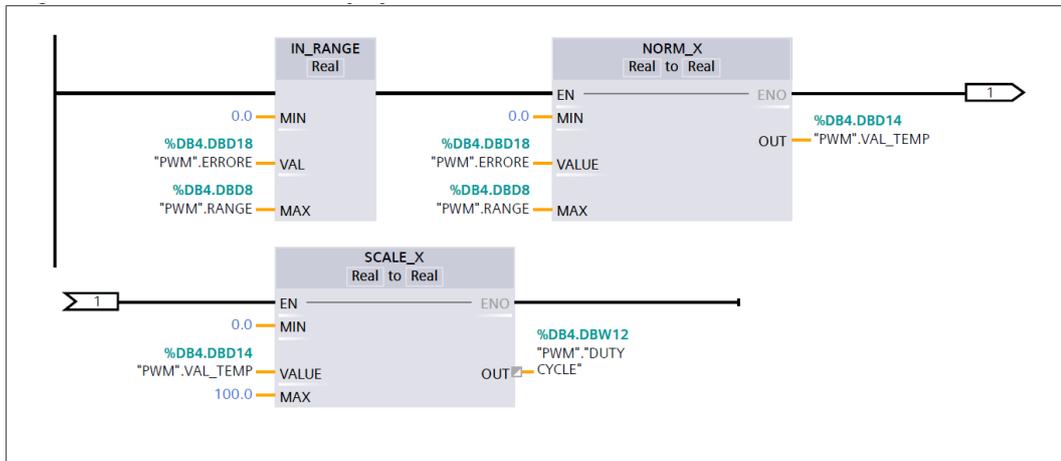


Figura 5.23 Segmento 4: calcolo del duty cycle

In Figura 5.24 ed in Figura 5.25 sono riportati i segmenti per l'attivazione di merker per il comando delle valvole. In particolare, se la x_{SET} è minore di x_{FB} si attiva il merker per l'azionamento delle valvole dispari, oppure il corrispettivo delle valvole pari.

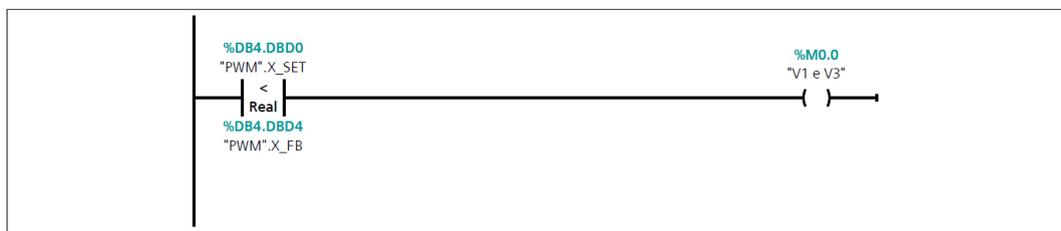


Figura 5.24 Segmento 5: comando valvole dispari

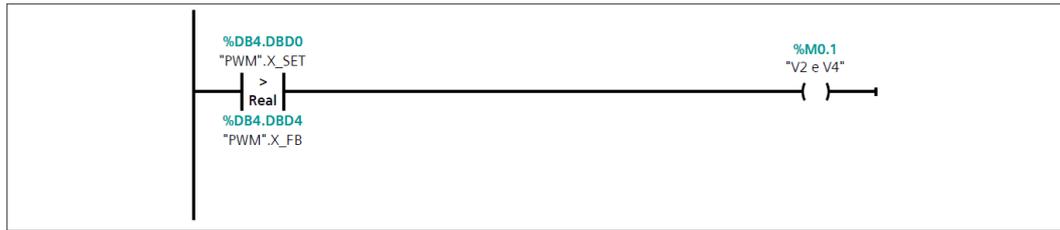


Figura 5.25 Segmento 6: comando valvole pari

In Figura 5.26 è riportato il segmento per l’invio del segnale alle uscite veloci Q0.0 e Q0.1 per l’attivazione delle valvole Camozzi. Per farlo è necessario attivare il contatto con l’input digitale I0.4 oppure con il pulsante sull’HMI. Il valore del Duty Cycle viene, quindi, spostato nella variabile PWM1_PULSE o PWM2_PULSE ed il blocco CTRL_PWM genera un’onda quadra di periodo T costante, rispettivamente, sul canale “Local-Pulse_1” o sul canale “Local-Pulse_2”.

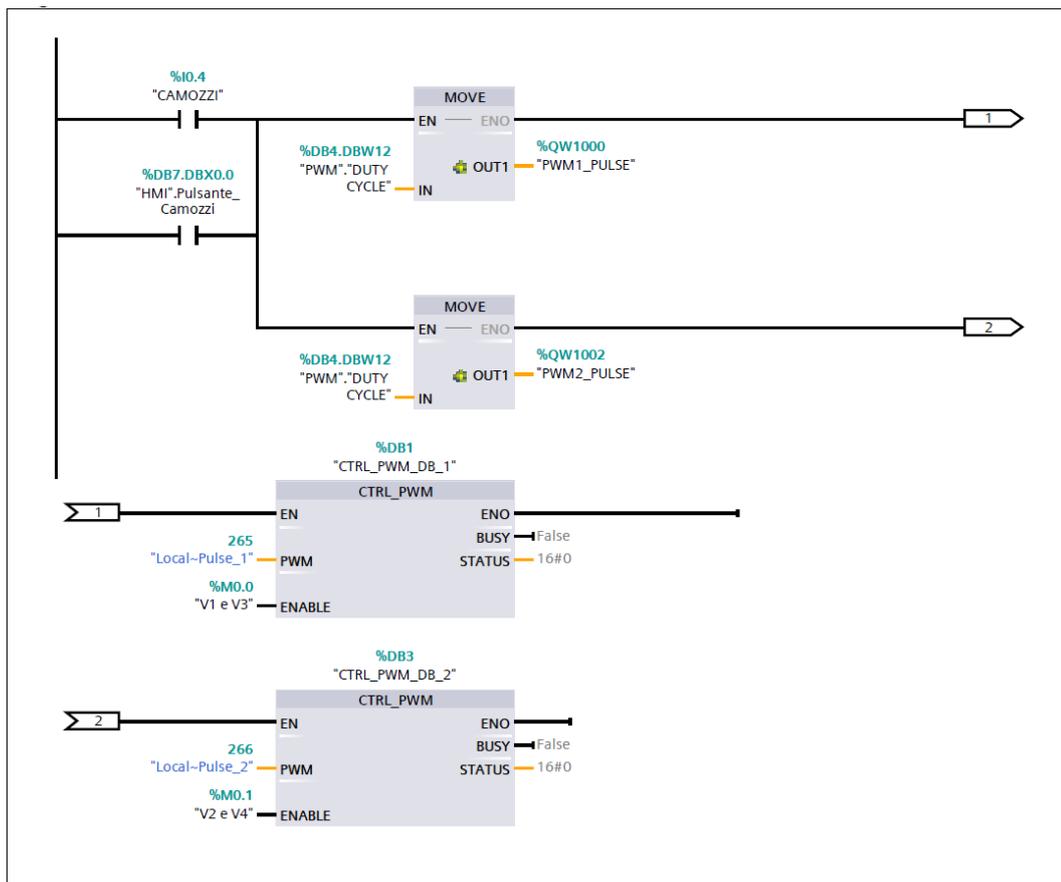


Figura 5.26 Segmento 7: azionamento valvole della Camozzi

In Figura 5.27 è riportato, invece, il corrispettivo per le valvole Matrix 224.

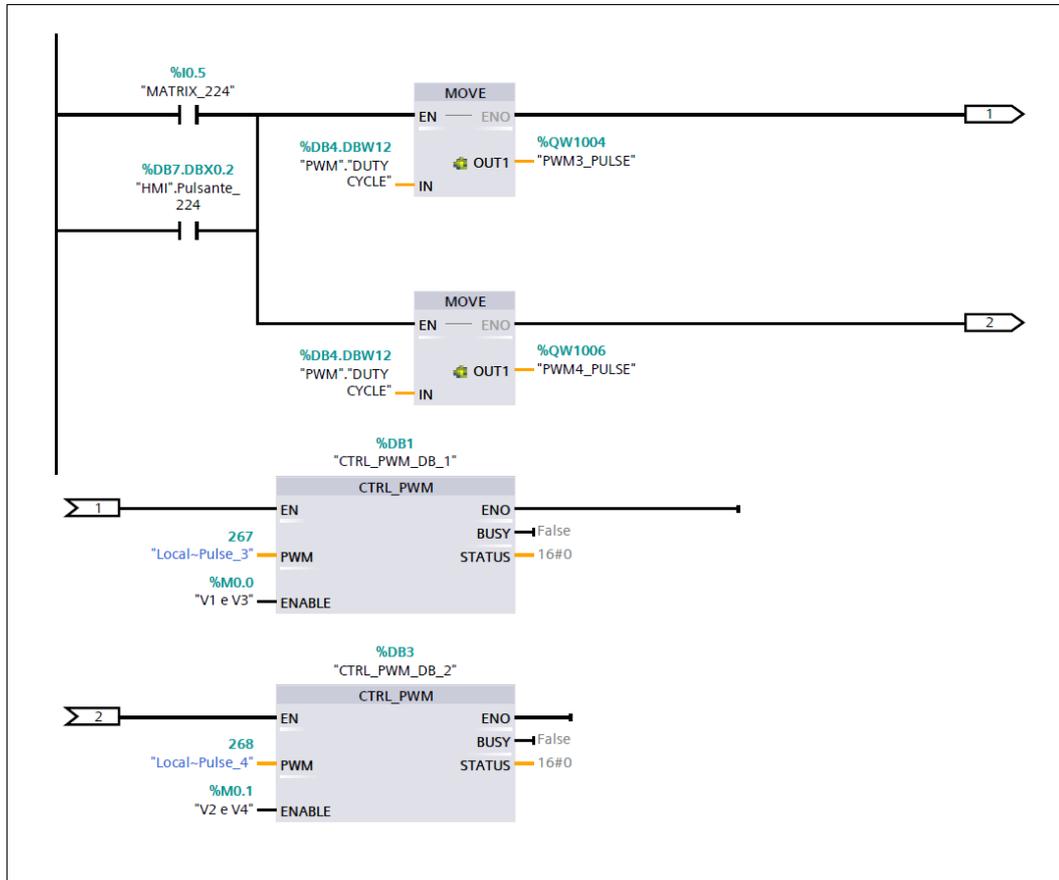


Figura 5.27 Segmento 8: azionamento valvole Matrix 224

5.2.2 Blocco funzione FC3 “Acquisizione dati”

Questo blocco funzionale è stato realizzato per acquisire e rielaborare le informazioni del trasduttore di posizione e dal trasduttore angolare. Si compone di tre segmenti: il primo segmento, riportato in Figura 5.28, elabora il segnale di input analogico IW112, che proviene direttamente dal trasduttore di posizione. Esso viene normalizzato e scalato da 0 a 500 mm. Il blocco SUB, invece, fa sì che il valore 0 mm corrisponda all'attuatore rientrato.

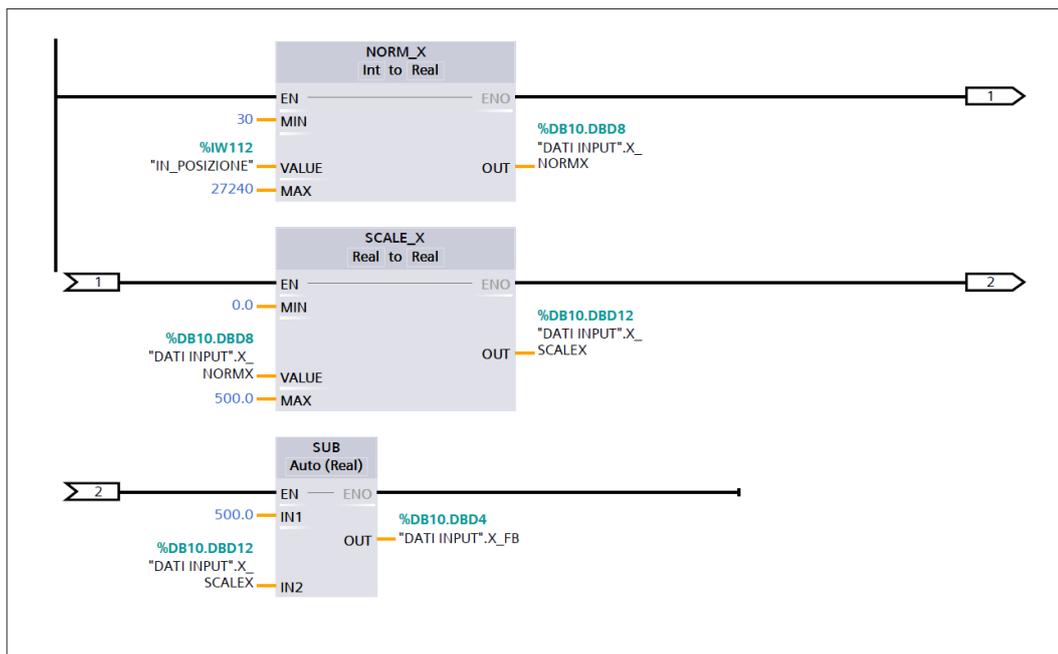


Figura 5.28 Segmento 1: acquisizione segnale trasduttore di posizione

In Figura 5.29 è riportato il segmento due, esso permette di effettuare la taratura dello zero del sensore angolare. La procedura da seguire consiste nel sistemare il pendolo in posizione verticale manualmente finchè non rimane in equilibrio e premere l'apposito pulsante presente sulla schermata "Controllo ed acquisizione" dell'HMI. Il valore ottenuto quindi viene immagazzinato nella variabile "Dati input".THETA_ZERO.

In Figura 5.30 è riportato il segmento tre, necessario ad acquisire ed rielaborare il segnale dal trasduttore angolare. Esso normalizza e scala il segnale acquisito dall'input analogico IW114 e sottrae il valore del THETA_ZERO.

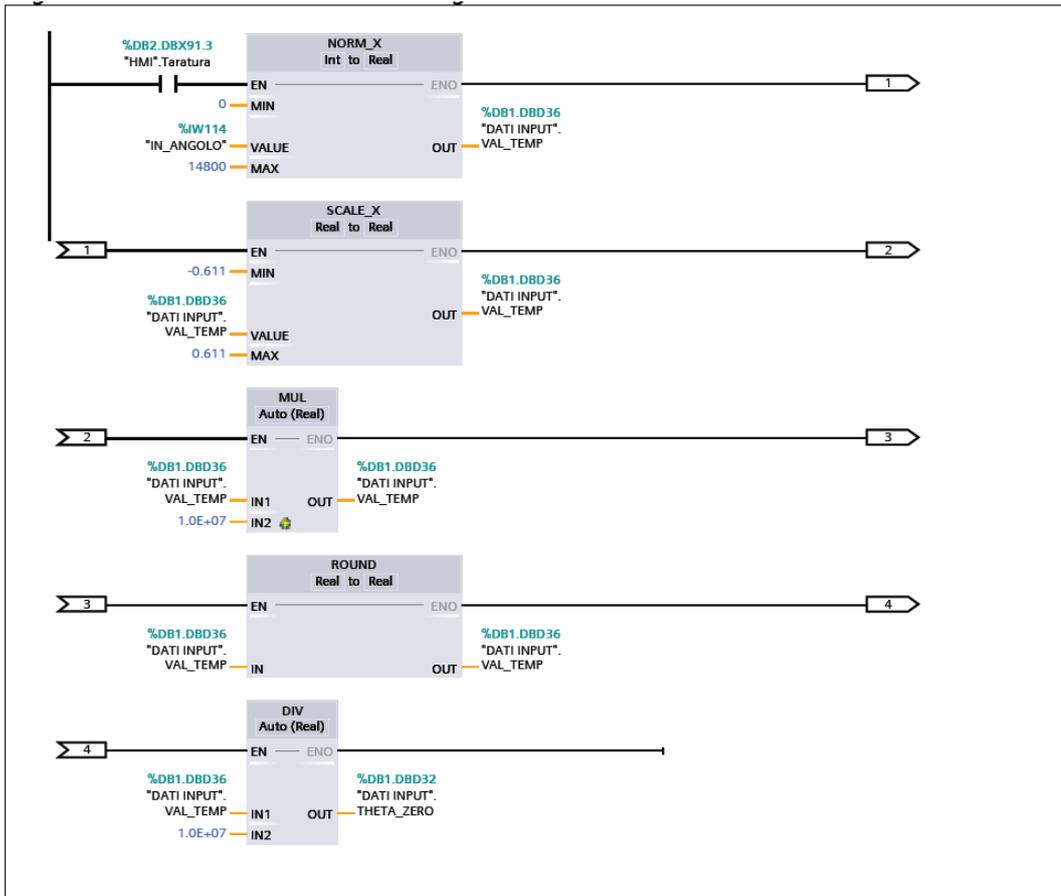


Figura 5.29 Segmento 2: taratura dell'angolo zero

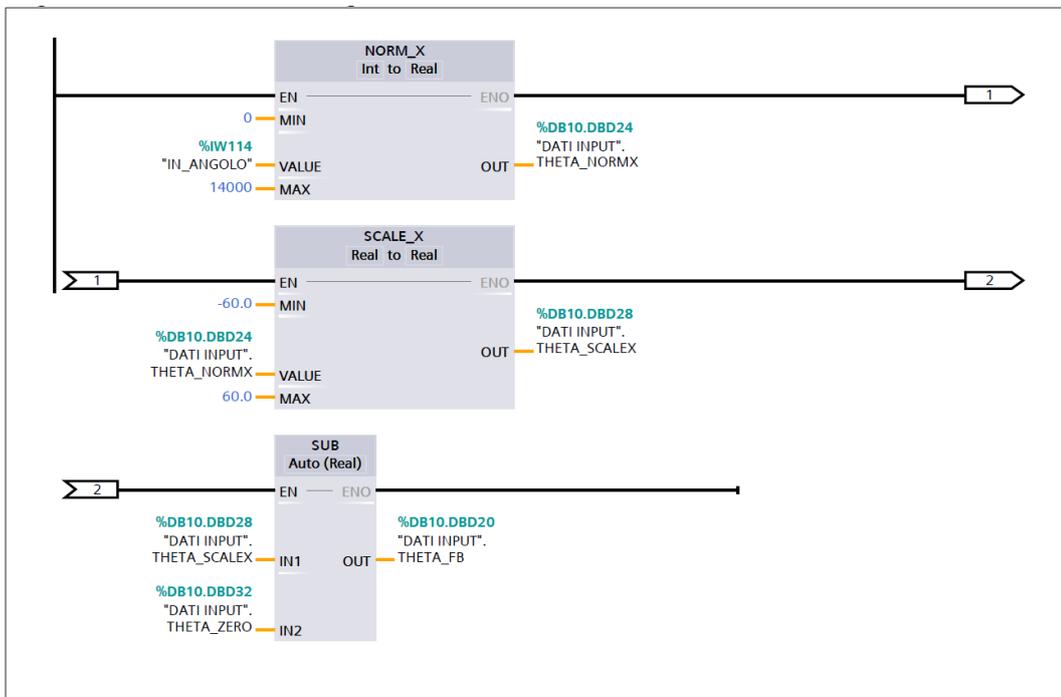


Figura 5.30 Segmento 3: acquisizione segnale trasduttore angolare

5.2.3 Blocco funzione FC4 “PID_automatico”

Il seguente blocco funzione permette di inserire, nei blocchi PID, il valore delle costanti che stabilizzano il sistema. In Figura 5.31 è riportato il segmento per l’inserimento automatico dei parametri per quanto riguarda le valvole della Matrix 224. Si utilizza il comando MOVE per importarli nella variabile dedicata, essi si attivano con gli appositi contatti associati ai pulsanti presenti nell’HMI. Il blocco funzione si compone di altri tre segmenti analoghi per le altre valvole del banco di prova.

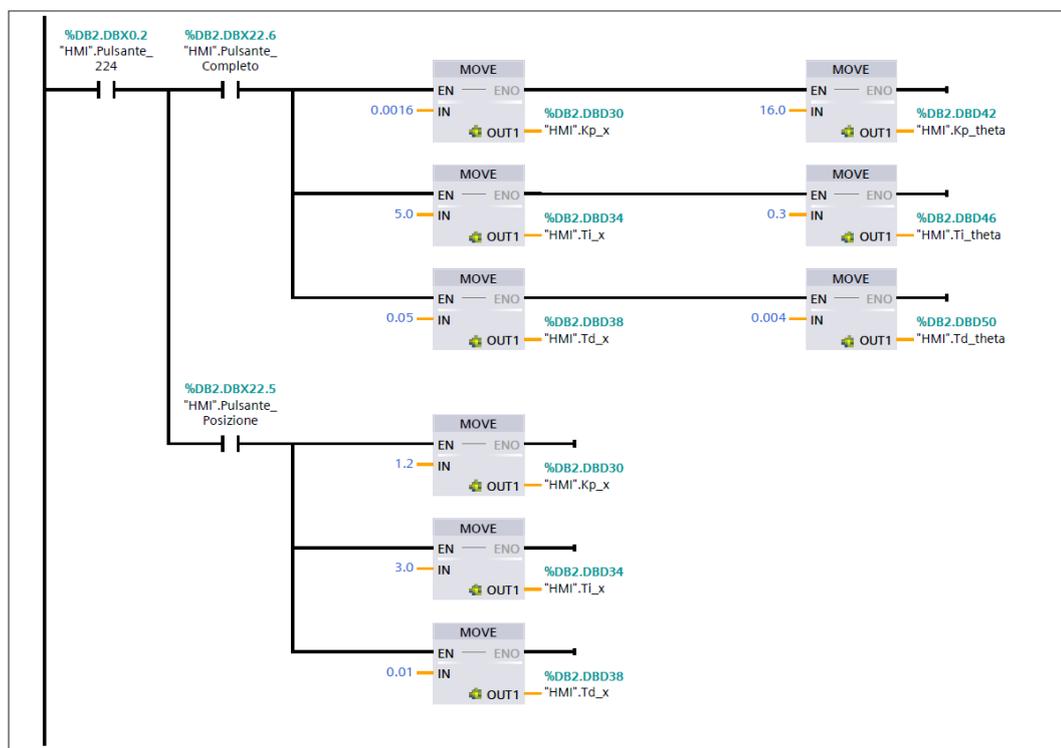


Figura 5.31 Segmento 2: inserimento automatico dei parametri del PID

5.2.4 Blocco funzione FC5 “Controllo manuale”

In Figura 5.32 ed in Figura 5.33 si riportano i segmenti del blocco funzionale “07_Controllo Manuale”. Questo blocco si attiva premendo l’apposito pulsante sull’HMI e permette di spostare a sinistra o a destra il carrello, premendo i due pulsanti, avendo prima selezionato la valvola da utilizzare.

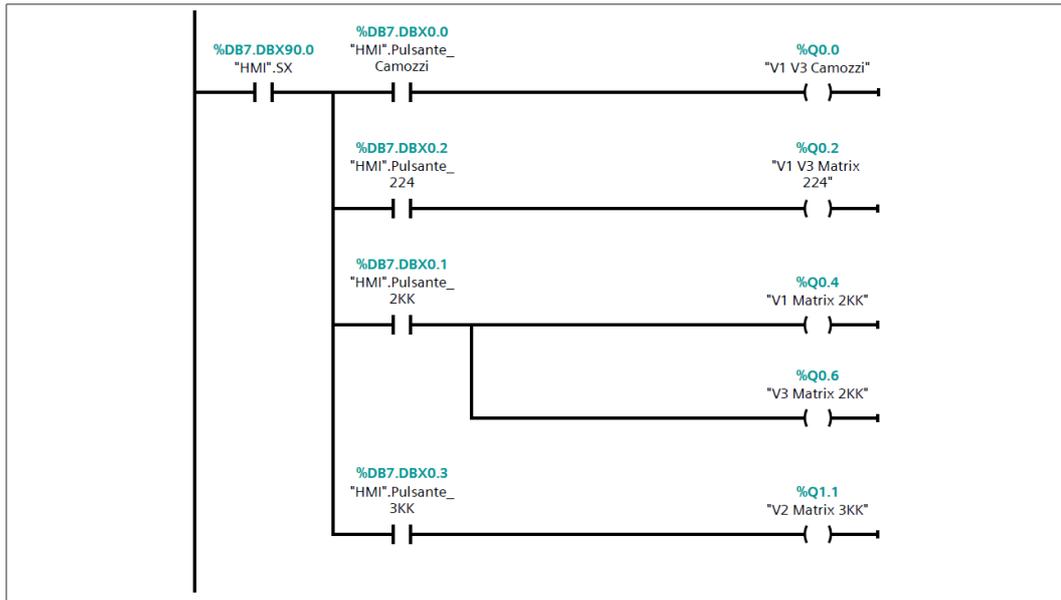


Figura 5.32 Segmento 1: spostamento a sinistra del carrello

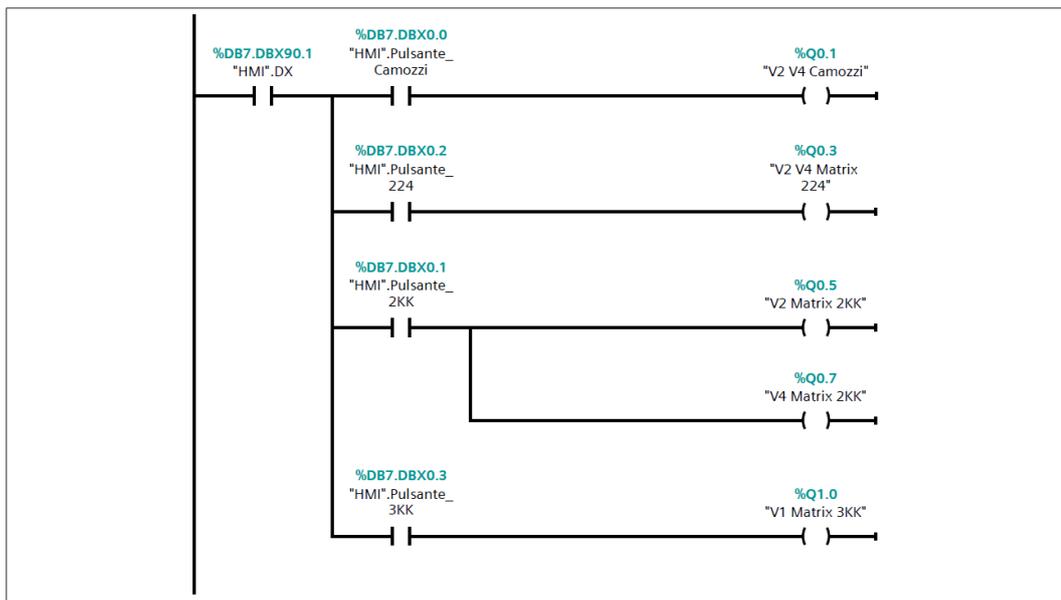


Figura 5.33 Segmento 2: spostamento a destra del carrello

5.3 Blocchi dati

I blocchi dati utilizzati sono quattro: “Dati input”, “HMI”, “PID” e “PWM”. Sono state classificate rispetto al blocco funzione nel quale vengono utilizzati. Tutti i blocchi dati devono essere con accesso standard, essi non hanno una struttura definita. Gli elementi dei dati nella dichiarazione contengono sia un nome simbolico che un indirizzo fisso all'interno del blocco. L'indirizzo viene visualizzato nella colonna "Offset".

5.3.1 Blocco dati DB1 “Dati input”

Il blocco dati DB1 “Dati input” riportato nella Tabella 5.4 viene utilizzato per salvare e rielaborare i valori della posizione e dell'angolo partendo dai valori ottenuti dal trasduttore LVDT e RVDT.

Blocco dati “Dati input”			
Nome variabile	Tipo di dati	Valore di avvio	Commento
X_set	Real	0.0	Target di posizione
X_fb	Real	0.0	Posizione attualmente occupata
X_normx	Real	0.0	Valore di posizione normalizzato
X_scalex	Real	0.0	Valore di posizione scalato
Theta_set	Real	0.0	Target di angolo
Theta_fb	Real	0.0	Angolo attualmente occupato
Theta_normx	Real	0.0	Valore di angolo normalizzato
Theta_scalex	Real	0.0	Valore di angolo scalato
Theta_zero	Real	0.037	Valore di angolo col pendolo verticale
Val_temp	Real	0	Valore temporaneo

Tabella 5.4 Variabili del blocco dati "Dati input"

5.3.2 Blocco dati DB3 “PID”

Nel blocco dati DB3 “PID” vengono salvati i valori utilizzati per il blocco organizzazione PID_X e PID_θ. Le caratteristiche delle variabili utilizzate sono riportate nella Tabella 5.5.

Blocco dati “PID”			
Nome variabile	Tipo di dati	Valore di avvio	Commento
X_set	Real	0.0	Target di posizione
X_fb	Real	0.0	Posizione attualmente occupata
X_output	Real	0.0	Uscita PID X
X_out_pwm	Bool	false	Uscita PID X PWM
Theta_set	Real	0.0	Target di angolo
Theta_fb	Real	0.0	Angolo attualmente occupato
Theta_output	Real	0.0	Uscita PID THETA
Theta_out_pwm	Bool	false	Uscita PID THETA PWM
DC_min	Int	45	Valore minimo del duty cycle
DC_dispari	Int	0	Valore del dc per le valv. dispari
DC_pari	Int	0	Valore del dc per le valv. pari

Tabella 5.5 Variabili del blocco dati "PID"

5.3.3 Blocco dati DB4 “PWM”

Nel blocco dati DB4 “PWM” vengono salvati i valori utilizzati per il blocco funzione CTRL_PWM. Le caratteristiche delle variabili utilizzate sono riportate nella Tabella 5.6.

Blocco dati PWM			
Nome variabile	Tipo di dati	Valore di avvio	Commento
X_set	Real	0.0	Target di posizione
X_fb	Real	0.0	Posizione attualmente occupata
Range	Real	100.0	Valore a partire dal quale modulare il dc
Duty Cicle	Int	0	Valore del dc
Val_temp	Real	0.0	Valore temporaneo
Errore	Real	0.0	Differenza tra il segnale di set ed il segnale di feedback

Tabella 5.6 Variabili del blocco dati "PWM"

6 Programmazione dell'HMI

Per poter utilizzare il banco di prova per scopi didattici, è stato programmato un HMI Comfort TP700, in modo tale da offrire un'interfaccia uomo-macchina efficace e intuitiva. La programmazione dell'HMI si compone di una parte grafica e di una in linguaggio Ladder associato. In particolare, sono state realizzate sette interfacce, descritte in questo capitolo. Una descrizione più dettagliata sul linguaggio ladder associato è possibile trovarla nell'allegato X.

6.1 Schermata principale e schermata delle informazioni

All'accensione dell'HMI, è presente una pagina con il logo del Politecnico di Torino e i riferimenti al relatore e al candidato. Un pulsante con un freccia in alto a destra, come si può vedere in Figura 6.1, permette di spostarsi nella pagina delle istruzioni.



Figura 6.1 HMI: pagina base

Nella Figura 6.2 è riportata la schermata delle informazioni, si tratta di una pagine di introduzione che riassume le istruzioni per poter utilizzare il banco di

prova correttamente e illustra quali sono le funzioni che si possono fare tramite l'HMI.

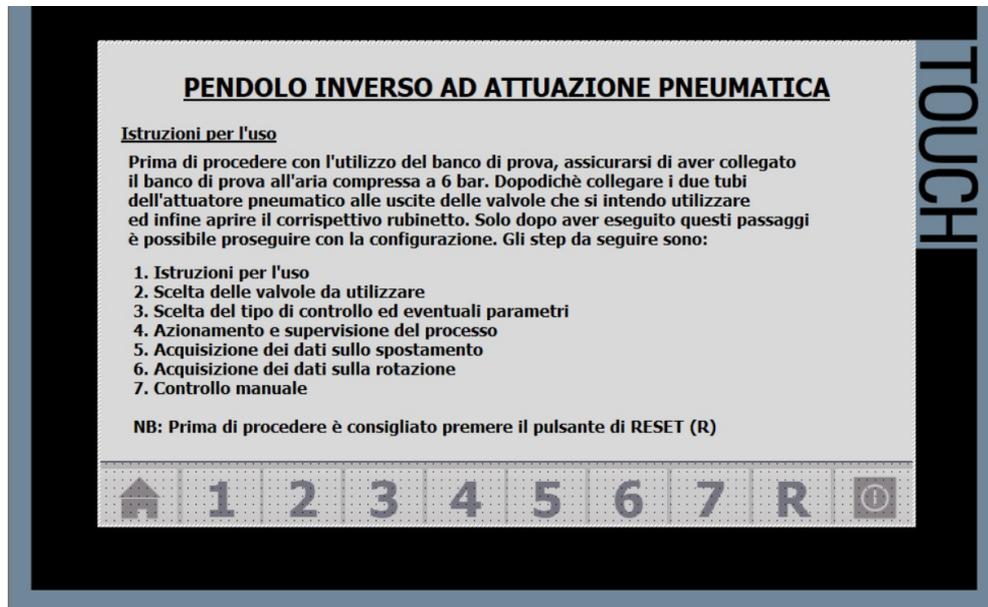


Figura 6.2 HMI: pagina delle istruzioni

In basso sono presenti i dieci pulsanti, le cui funzioni sono descritte nell'elenco puntato riportato sulla pagina. In particolare il pulsante di Reset (R) permette di ripristinare tutte le scelte fatte in precedenza. Esso, infatti, è associato alla variabile "HMI.Reset_0", la quale, come si può notare nei tre segmenti che compongono il blocco funzione "HMI_principale", premendola riporta a zero tutte le variabili e riporta a zero i valori inseriti da tastiera.

6.2 Pagina per la scelta delle valvole

In Figura 6.3 è riportata la schermata dell'HMI per la scelta delle valvole da utilizzare. Essa si compone di quattro grandi pulsanti sui quali è riportata l'immagine della valvola, inoltre, a lato di ciascuna di esse è presente un pulsante che se premuto aziona una schermata pop-up nella quale sono presenti le indicazioni principali delle valvole.



Figura 6.3 HMI: pagina scelta delle valvole

Premendo ciascun pulsante si attiva il merker della corrispettiva valvola. Tuttavia, non potendo utilizzare due tipologie di valvole contemporaneamente, qualora l'operatore dovesse premerne piu di una, un messaggio di errore compare sulla schermata, come mostrato in Figura 6.4.



Figura 6.4 HMI: avviso scelta delle valvole errata

6.3 Scelta del metodo di controllo

Una volta determinata la tipologia di valvola da utilizzare si passa alla schermata sulla scelta del tipo di controllo ed eventuale parametrizzazione, riportata nella Figura 6.5 Per evitare che l'operatore effettui delle scelte sbagliate, la comparsa dei pulsanti avviene solo quando la scelta è possibile. La prima è tra il controllo PID e la modulazione PWM. Quest'ultima solo nel caso in cui siano state scelte le valvole della Camozzi o le Matrix 224. Inoltre con la modulazione PWM è possibile effettuare solo un controllo posizione. Con il controllore PID è possibile effettuare entrambi i controlli (posizione o completo) ed inoltre è possibile utilizzare i parametri automatici oppure sceglierli manualmente. In quest'ultimo caso è necessario premere la casella corrispondente ed inserire il parametro tramite la tastiera che compare a schermo. Anche in questo caso una schermata di errore compare in caso di scelta sbagliata da parte dell'operatore. In basso sono presenti due indicazioni per la corretta esecuzione delle prove ed infine ai lati i classici pulsanti per cambiare pagina, resettare le scelte o tornare alla pagina principale. Il pulsante Taratura θ è associato alla variabile "HMI_Taratura", è consigliato fare la taratura prima di effettuare le prove.



Figura 6.5 HMI: schermata per la scelta del metodo di controllo

6.4 Pagine di azionamento e simulazione

Nella schermata successiva, riportata in Figura 6.6 è stato riprodotto il banco di prova utilizzando la simbologia stabilita dalla ISO 1219-1. Utilizzando, infatti, il segnale analogico di input e rielaborandolo è possibile visualizzare la movimentazione su schermo. Inoltre, come riportato in Figura 6.7, anche le valvole si muovono, mostrando quale di quelle è in funzionamento ed infine i tubi si colorano di blu scuro, se attraversati da aria in pressione, o blu chiaro, se attraversato da aria in scarico.

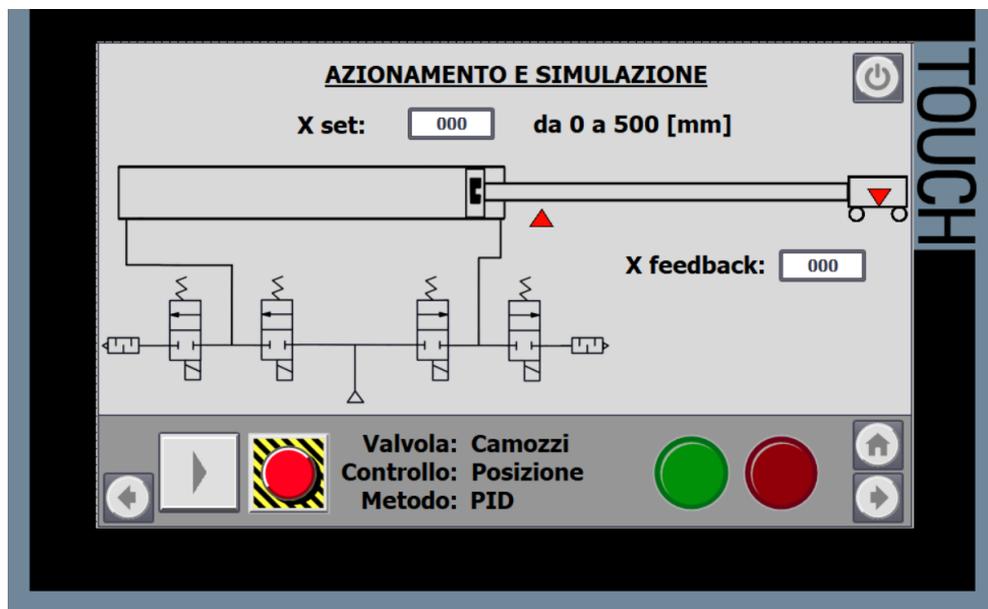


Figura 6.6 Pagina di visualizzazione ed azionamento

Nella parte in alto è possibile, tramite tastierino numerico, scegliere il valore di x set, mentre sotto il carrello è riportato il valore numerico della posizione attualmente occupata dal carrello (x feedback).

La parte in basso, si divide in tre parti, i due pulsanti a destra sono i pulsanti di start e di emergenza, associati rispettivamente alle variabili “HMI.Start” ed “HMI.Stop”, permettono di far partire e fermare la simulazione. Al centro un recap della configurazione scelta e a destra due led. Il led verde, se acceso, indica lo stato di funzionamento del sistema, se invece il led rosso è acceso vuol dire che è attivo il pulsante di emergenza.

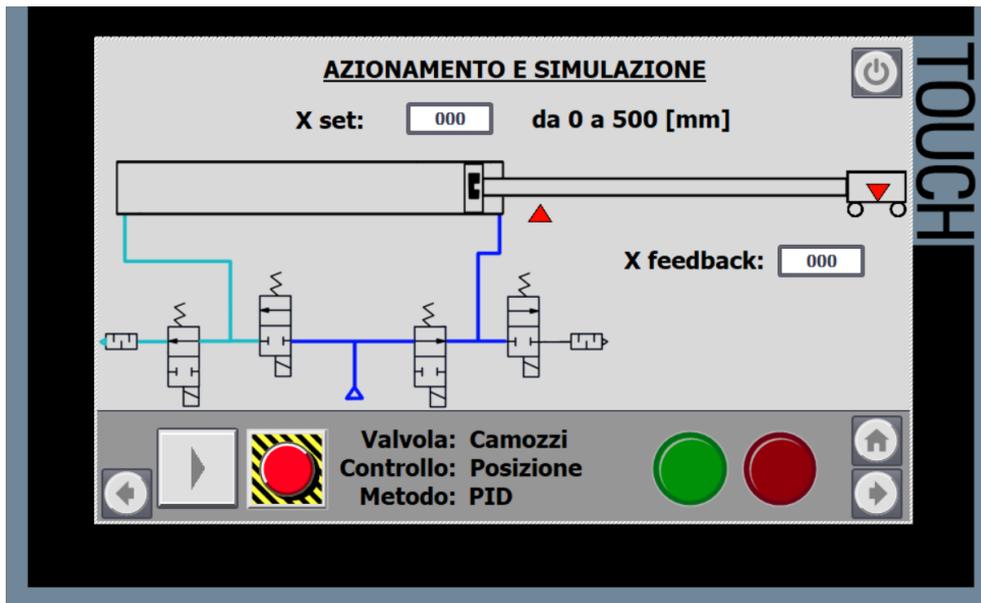


Figura 6.7 Pagina di visualizzazione in funzione

Una volta premuto il pulsante di azionamento, a schermo comparirà un timer, terminato il quale partirà il sistema. L'inserimento del timer è stato realizzato tramite il segmento 8 del blocco funzionale "HMI_Simulazione" riportato in Figura 6.8.

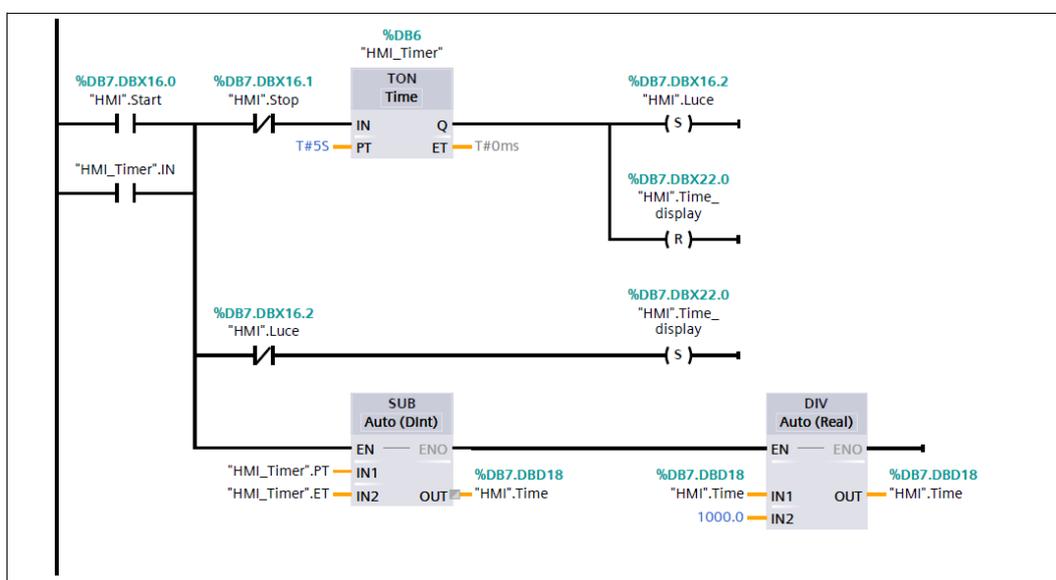


Figura 6.8 Ladder per l'inserimento del timer sull'HMI

6.5 Pagina di acquisizione dei risultati ottenuti

In Figura 6.9 e in Figura 6.10 sono riportate le pagine nelle quali è possibile visualizzare il grafico di x_{set} e $x_{feedback}$ nella prima pagina e di θ_{set} e $\theta_{feedback}$ nella seconda. È stato realizzato implementando l'elemento "Vista delle curve" presente nella sezione "Control" della biblioteca "Casella degli strumenti". Attorno sono riportati i pulsanti per tornare alla pagina iniziale, alla pagina precedente, a quella successiva e il tasto per spegnere l'HMI.

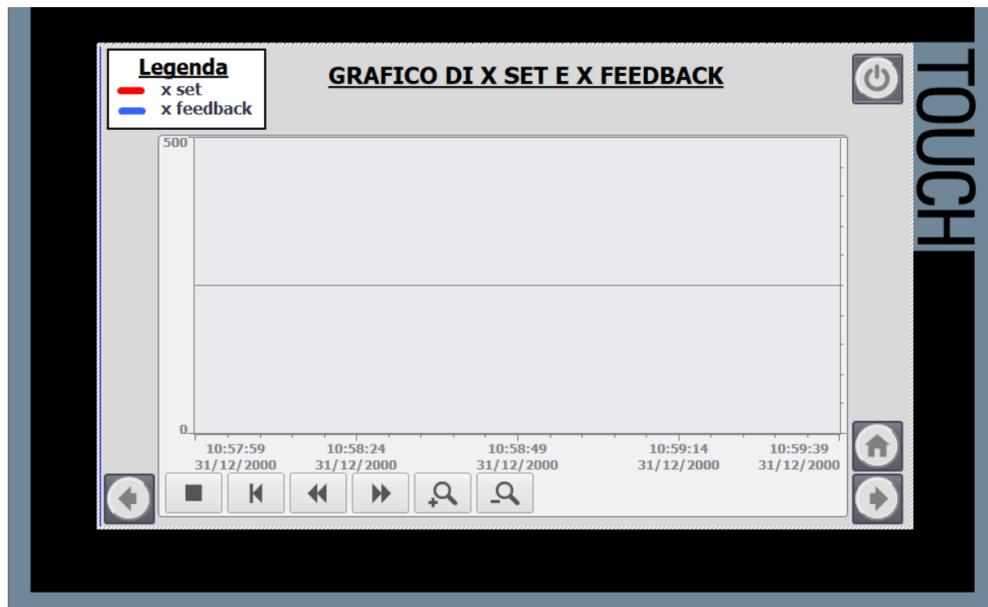


Figura 6.9 HMI:pagina per la visualizzazione di x_{set} e $x_{feedback}$

In alto, invece, è riportata la legenda. I pulsanti, presenti di default sulla schermata del grafico, permettono, partendo da sinistra verso destra, di:

- bloccare la registrazione;
- ritornare all'inizio dalla registrazione;
- tornare indietro;
- avanzare nella registrazione;
- ingrandire il grafico;
- rimpicciolire il grafico.

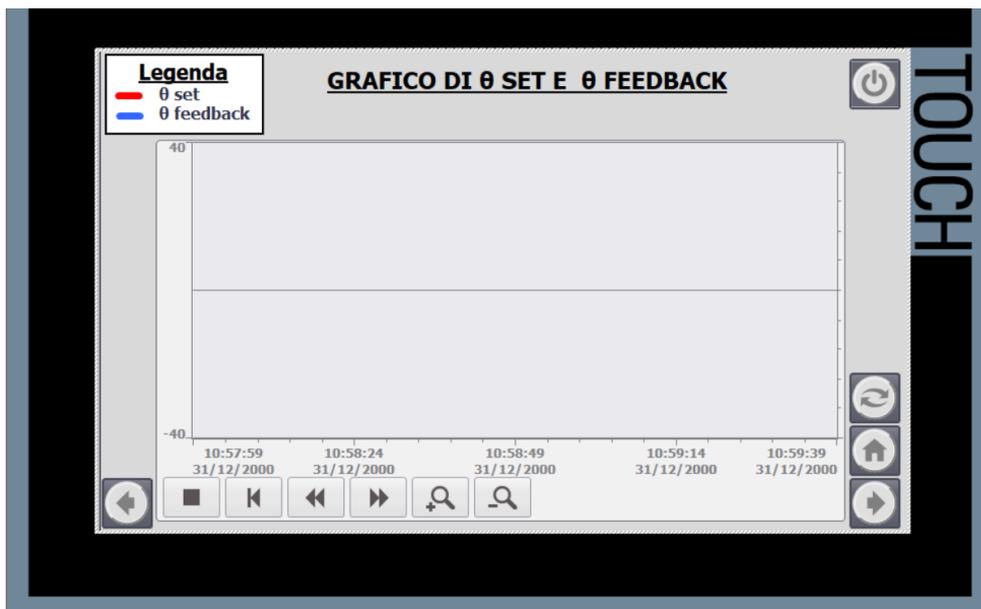


Figura 6.10 HMI: pagina per la visualizzazione di θ_{set} e $\theta_{feedback}$

6.6 Controllo manuale

In Figura 6.11 è riportata la pagina dell'HMI per il controllo manuale dell'attuatore. Dopo aver selezionato la valvola da utilizzare è possibile recarsi su questa pagina per impostare il valore di posizione iniziale.

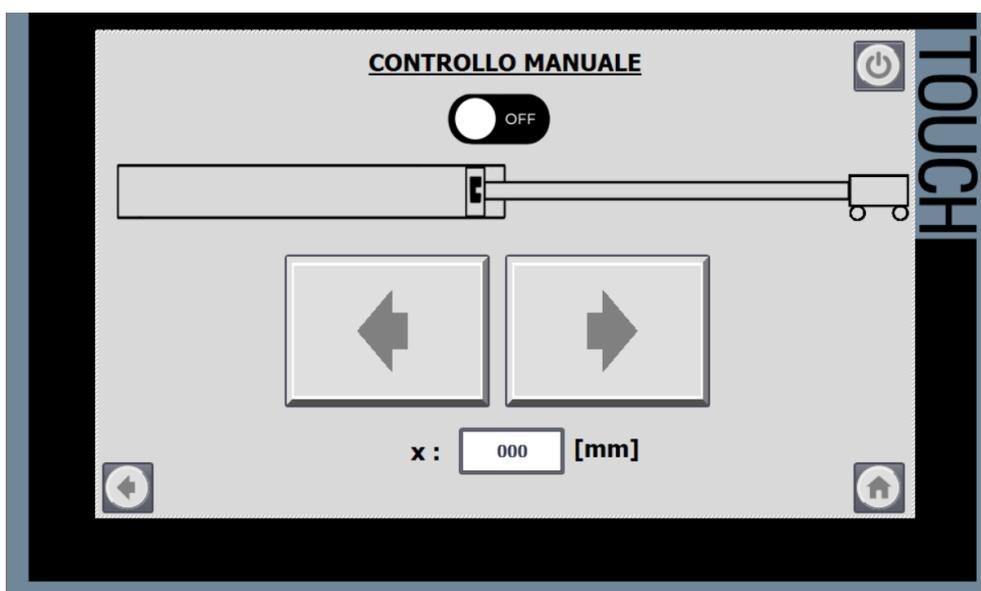


Figura 6.11 HMI: pagina per il controllo manuale

Il pulsante ON/OFF è collegato alla variabile “HMI_Controllo_Manuale” che attiva il blocco funzione associato. La schermata si compone di un’anteprima grafica dell’attuatore e del carrello simile a quella utilizzata nella schermata di visualizzazione e descritta nel Capitolo 6.4. Subito sotto sono presenti due grandi pulsanti per spostare il carrello a destra o a sinistra. In particolare il primo è associato alla variabile “HMI. SX” mentre il secondo alla variabile “HMI. DX”. Essi attivano i contatti presenti nel segmento 1 e nel segmento 2 del blocco funzione “Controllo manuale” descritto nel Capitolo 5.2.4. è possibile utilizzare il controllo tramite pulsanti per determinare la posizione iniziale del carrello prima di effettuare le prove. La schermata si conclude con il valore in millimetri della posizione attualmente occupata dal carrello.

7 Modello teorico realizzato su *Amesim*®

In questo capitolo, a seguito di una breve introduzione sul software, è stato analizzato il modello teorico realizzato su *Amesim*®, lo studio si divide in due parti: il controllo della sola posizione del carrello e il controllo della posizione e dell'angolo del pendolo. La modellazione del sistema è fondamentale per poter analizzare il contributo dei coefficienti del PID e confrontare i risultati teorici con quelli sperimentali.

7.1 Introduzione ad *Amesim*®

Amesim® è un software rilasciato dalla Siemens che permette di simulare, valutare e ottimizzare sistemi meccatronici. Si basa su un'interfaccia grafica intuitiva in cui il sistema viene visualizzato durante tutto il processo di simulazione. Permette di modellare tramite schema a blocchi oppure si può interfacciare con software come *Matlab*® o *Simulink*®. È possibile effettuare tutte le fasi di sviluppo, modellando interi sistemi, parti o singoli componenti. Si possono realizzare sistemi meccanici, idraulici, pneumatici ed elettrici ma anche sistemi multi-livello e multi-fisico. Per creare modelli con più fisiche che possono interagire tra di loro è necessario garantire una compatibilità tra le connessioni dei diversi sottosistemi. *Amesim*® fornisce un' interfaccia grafica con una collezione di integratori numerici e più di 40 librerie. Ciascun elemento è caratterizzato da diverse porte di connessione di input e di output pertanto il collegamento tra due componenti è possibile solo se si hanno uscite ed entrate compatibili.

La progettazione si compone di quattro fasi: “Sketch”, “Submodel”, “Parameter” e “Simulation”. Nella prima si realizza il modello, trascinando i componenti presenti nelle librerie sulla destra. Ciascun componente è caratterizzato da un colore che lo classifica in base alla fisica di appartenenza (pneumatico, elettrico, ecc.). Nella seconda si definisce il modello matematico di ciascun componente scelto, nella terza inseriamo i parametri caratterizzanti lo schema e infine effettuiamo la simulazione per analizzare i risultati. Ciascun elemento è

caratterizzato da diverse porte di connessione di input e di output pertanto il collegamento tra due componenti è possibile solo se hanno uscite ed entrate compatibili.

Mediante il software sono stati realizzati due modelli: il primo con la presenza del solo carrello, sul quale è stata effettuata un'analisi parametrica dei coefficienti del PID, e il secondo implementando anche il pendolo e quindi il controllo sia posizione che angolare. I componenti utilizzati sono stati scelti dalle librerie, configurando i parametri in modo tale da rendere il modello teorico quanto più simile a quello reale.

7.2 Componenti utilizzati

In questo paragrafo analizzeremo tutti i componenti utilizzati per la realizzazione del modello matematico su *Amesim*®. Le parti utilizzate appartengono a quattro librerie differenti: segnali, pneumatica, meccanica 1D e meccanica 2D. Indicate in figura rispettivamente col colore: rosso, viola, verde e verde scuro.

7.2.1 Componenti libreria dei segnali

In Figura 7.1 sono presenti i componenti utilizzati nel modello che appartengono alla libreria dei segnali.

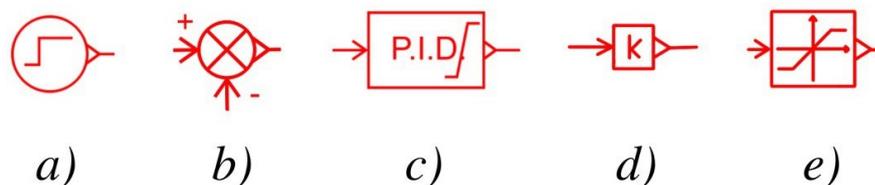


Figura 7.1 Componenti della libreria dei segnali utilizzati

Il componente *a)* è il generatore di un segnale a gradino, il componente *b)* effettua la sottrazione tra i due segnali di input. Il componente *c)*, invece, è il blocco PID che può essere regolato inserendo i valori manualmente. Il componente *d)* restituisce in output il segnale di input moltiplicato per il guadagno k ed, infine,

il componente *e*) è un sottomodello di saturazione. L'utente deve fornire i livelli minimo e massimo consentiti, il segnale di uscita sarà limitato a questo intervallo.

7.2.2 Componenti libreria pneumatica

I componenti pneumatici utilizzati si dividono in due librerie: quelli riportati in Figura 7.2 appartengono alla libreria pneumatica, mentre quelli riportati in Figura 7.3 appartengono alla libreria “Pneumatic Component Design”.

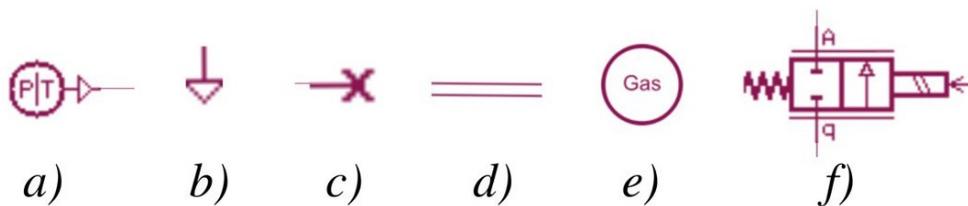


Figura 7.2 Componenti pneumatici presenti nel circuito

In Figura 7.2, il componente indicato con la lettera a) è una sorgente pneumatica di pressione e temperatura, le sue uscite sono la pressione relativa in Pa e la temperatura in K. Con la lettera b) è indicato lo scarico mentre con la lettera c) è indicato un sottomodello di una sorgente a flusso pneumatico zero. Il componente con la lettera d) è un sottomodello a parametri concentrati di un tubo pneumatico con solo gli effetti di comprimibilità e attrito che tengono conto dello scambio termico. Con la lettera e), invece, è riportato un sottomodello necessario per definire le caratteristiche del gas nel circuito pneumatico. Infine, in Figura 7.2f) è presente un semplice sottomodello di una servovalvola pneumatica proporzionale a 2 vie e 2 posizioni. I flussi attraverso gli orifizi possono essere subsonici, sonici o laminari. Il segnale in ingresso è equivalente ad una corrente ed è normalizzato con il parametro della corrente nominale della valvola. In Figura 7.3 sono riportati i componenti utilizzati che appartengono alla libreria “Pneumatic Component Design”. La libreria di progettazione dei componenti pneumatici è uno strumento che contiene gli elementi costitutivi di base di qualsiasi componente e sistema pneumatico. Questa libreria può essere vista come un linguaggio ingegneristico in grado di modellare componenti pneumatici come attuatori, compressori, regolatori di ossigeno, serrande o qualsiasi tipo di valvola pneumatica.

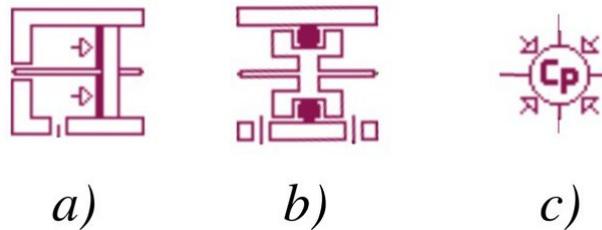


Figura 7.3 Componenti della libreria "Pneumatic Component Design"

In particolare, la lettera *a)* è un componente che viene utilizzato per rappresentare una parte di un martinetto o valvola pneumatica in cui una pressione agisce su un pistone o una spola e il corpo del martinetto o della valvola è fisso. Con la lettera *b)* il modello di tenuta ad attrito. Nessuna perdita viene presa in considerazione in questo sottomodulo. La forza di attrito dipende linearmente dalla differenza di pressione su ciascun lato della tenuta, può essere utilizzata per far fronte all'attrito quando c'è una tenuta tra una parte mobile e una fissa. Infine, il componente con la lettera *c)* rappresenta una camera pneumatica a volume e pressione variabili. Ciascuna porta riceve in ingresso una portata massica in g/s e una portata entalpica in J/s e fornisce in uscita la pressione in Pa e la temperatura in K della camera.

7.2.3 Componenti meccanici

In Figura 7.4 sono riportati gli elementi utilizzati nel circuito appartenenti alla meccanica 1D.

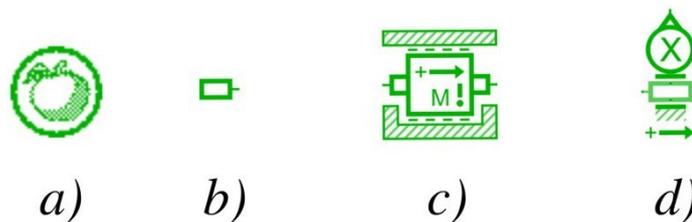


Figura 7.4 Componenti della meccanica 1D utilizzati nel circuito

L'elemento indicato con la lettera *a)* è il componente gravità, permette di definire l'accelerazione gravitazionale, nel nostro caso è pari a 9.807 m/s^2 . Con la lettera *b)* è indicato è una sorgente di forza zero. Il componente *c)* è un generatore di forza di attrito e infine, con la lettera *d)* è rappresentato un sensore di

spostamento lineare. In Figura 7.5 sono presenti i componenti appartenenti alla libreria della meccanica 2D.

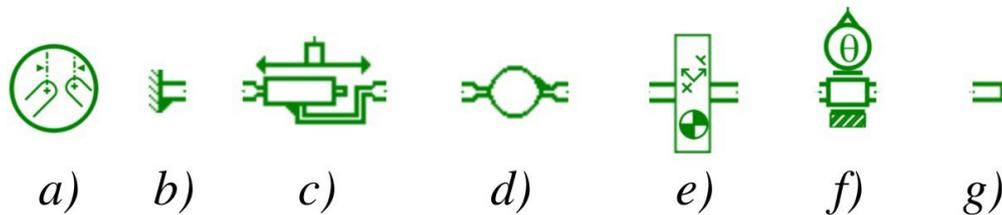


Figura 7.5 Componenti della meccanica 2D utilizzati nel circuito

L'elemento indicato con la lettera *a*) genera un processo di assemblaggio prima dell'esecuzione della simulazione. Il componente con la lettera *b*) è un sottomodulo di un corpo fisso nel sistema di riferimento e può essere considerato come una sorgente zero di accelerazione, velocità e spostamento. Il componente in Figura 7.5*c*) è una coppia prismatica che blocca due gradi di libertà (1 rotazione e 1 traslazione), l'unico movimento rimanente è una traslazione. Il componente indicato con la lettera *d*) è un sottomodulo di una coppia di rivoluzione. Il componente con la lettera *e*) è un corpo rigido che accetta un numero variabile di giunti, questo numero viene specificato dall'utente durante la selezione dell'icona. L'elemento con la lettera *f*) è un sottomodulo di un trasduttore di spostamento, viene normalmente utilizzato tra un corpo e una giunzione. Infine, il componente con la lettera *g*) è una sorgente di coppia e forza zero.

7.3 Controllo posizione del carrello

In Figura 7.6 è riportato il modello del banco di prova realizzato su *Amesim*®. In alto a sinistra sono presenti i tre componenti che definiscono il sistema: gravità, gas utilizzato e l'assemblaggio dei componenti. Più in basso notiamo il generatore di un segnale a gradino. Nel caso del controllo in posizione, il comando passa da 0 a 250 mm dopo 1 s.

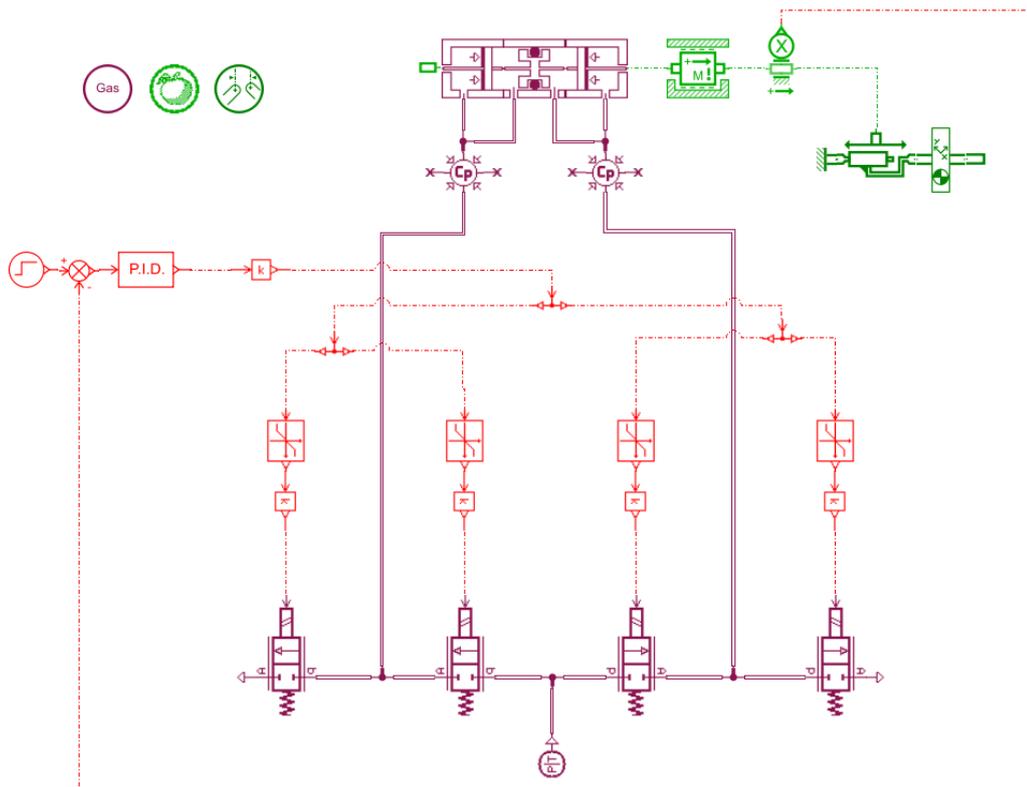


Figura 7.6 Modello del banco in controllo posizione realizzato su *Amesim*®

Il valore del segnale di comando viene confrontato con il valore proveniente dal trasduttore di posizione del feedback, la differenza diventa il segnale di input del blocco PID. All'uscita del blocco PID un guadagno k moltiplica il valore di output per 10 in quanto il PLC fornisce in output un segnale in tensione compreso tra 0 e 10 V. Tramite i quattro blocchi saturazione, il segnale viene inviato alle valvole dispari se è minore di zero o alle valvole pari se è maggiore di zero. Un guadagno proporzionale, infine, moltiplica il valore per 2.4 poiché le valvole ricevono in tensione un valore compreso tra 0 e 24 V. Le valvole lavorano in coppia ed in mutua esclusione. Esse sono collegate ad una sorgente di aria alla pressione di 6 bar e 293,15 K. Le valvole 1 e 3 alimentano la camera posteriore, mentre la 2 e 4 la camera anteriore dell'attuatore. Quest'All'attuatore è collegato un generatore di attrito, il cui coefficiente è stato posto pari a 20.9 Ns/m. Segue un trasduttore di posizione che rileva la posizione del carrello e la invia al PID di posizione.

7.3.1 Analisi parametrica e risultati ottenuti

Per poter configurare correttamente il blocco PID è necessario effettuare un'analisi parametrica dei valori che lo definiscono. Inizialmente, impostando un valore nullo per K_I e K_D , si fa variare il valore di K_P . Il Grafico 7.1 riporta la risposta del sistema al variare del parametro proporzionale per il quale sono stati scelti tre valori significativi. Si nota come, aumentando il parametro K_P , la risposta del sistema aumenta ma la stabilità diminuisce. Si sceglie un valore di $K_P = 2$ per il buon compromesso tra rapidità di risposta e stabilità. Infatti per K_P pari ad 1 la risposta, seppur stabile è molto lenta, mentre per K_P pari a 3 si verifica un overshoot troppo elevato.

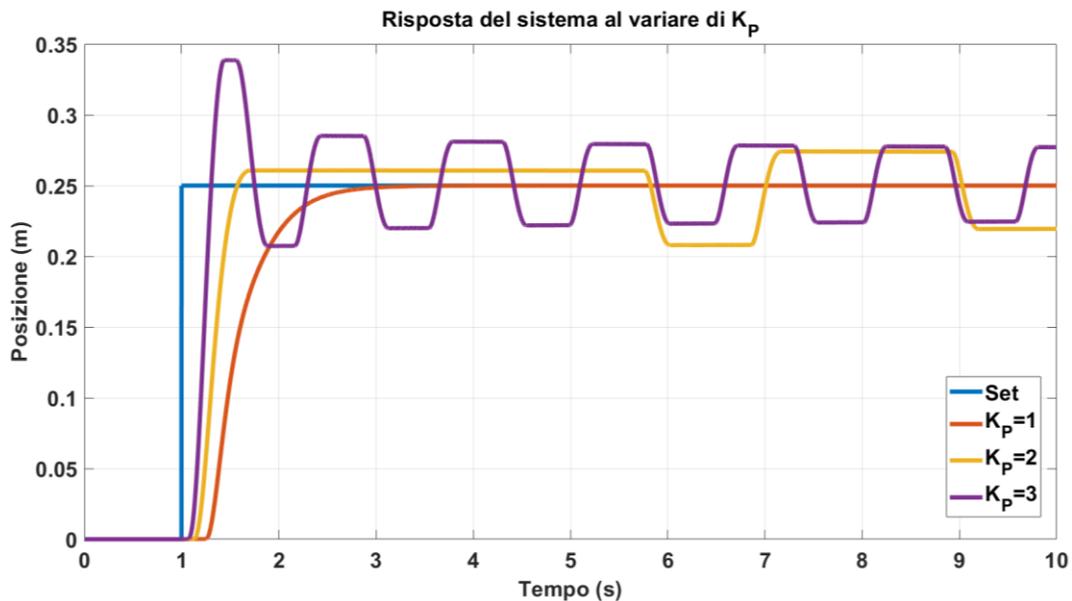


Grafico 7.1 Risposta del modello ad un segnale a gradino al variare di K_P

Un'ulteriore conferma la si ha osservando il Grafico 7.2 nel quale è riportato l'errore, definito come la differenza tra il set e il feedback.

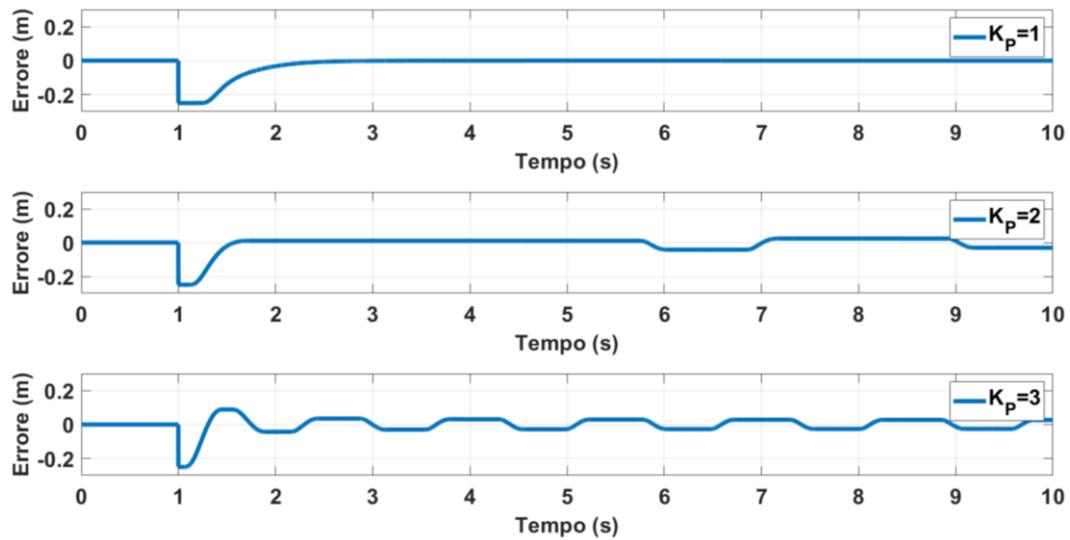


Grafico 7.2 Errore della risposta al variare di K_P

Il secondo parametro da scegliere è quello integrativo mantenendo il valore di $K_P = 2$. Nel Grafico 7.3 è riportato l'andamento della risposta del sistema al variare del parametro K_I . L'aggiunta del parametro comporta una diminuzione dell'errore del sistema stazionario, tuttavia nel caso in questione si è scelto un valore di K_I nullo poiché presenta un errore statico più basso.

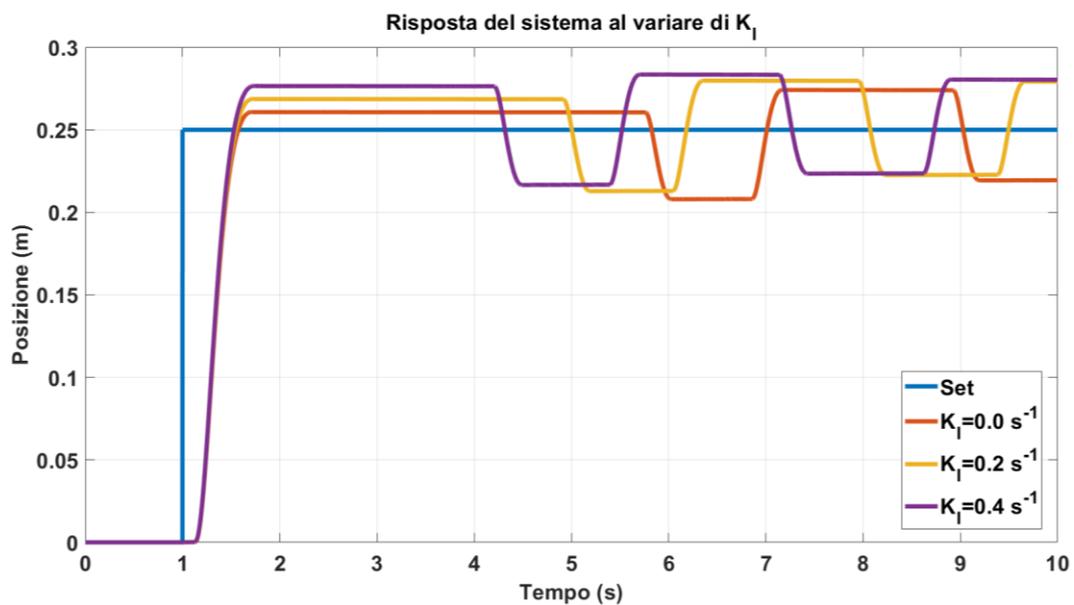


Grafico 7.3 Risposta del modello ad un segnale a gradino al variare di K_I

Nel Grafico 7.4 è riportato l'andamento dell'errore al variare del parametro K_I . Si nota come un valore nullo comporta un errore minore nel tempo.

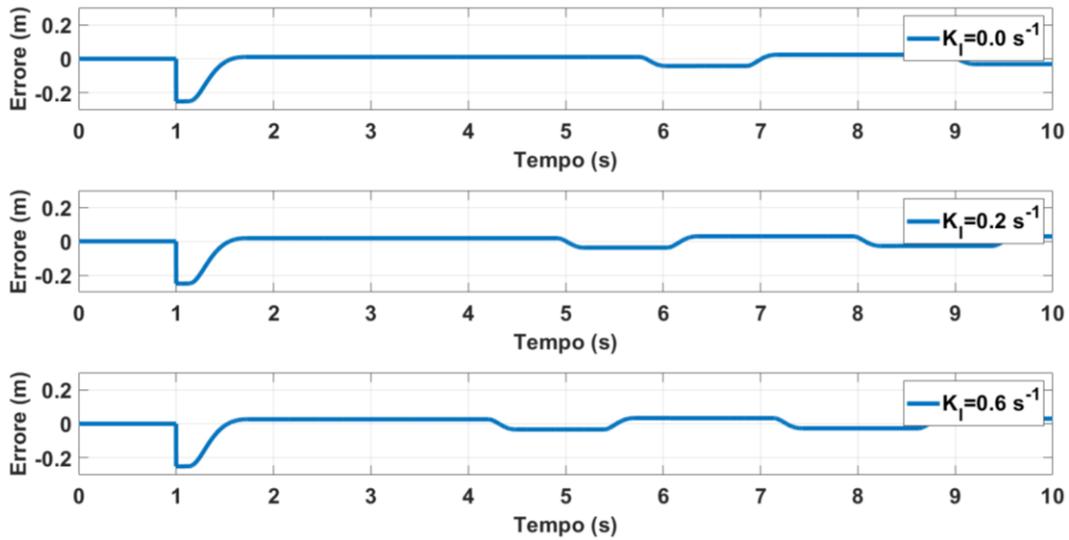


Grafico 7.4 Errore della risposta al variare di K_I

Si determina, infine, il valore del parametro derivativo, quindi impostando K_P pari a 2 e K_I nullo si fa variare il valore di K_D . Nel Grafico 7.5 è riportata la risposta del sistema per $K_D=0.1, 0.3$ e 0.6 s. All'aumentare del valore di K_D aumenta la stabilità ma diminuisce la rapidità del sistema. Si imposta quindi un valore pari a 0.1 s in quanto è il giusto compromesso tra rapidità e stabilità.

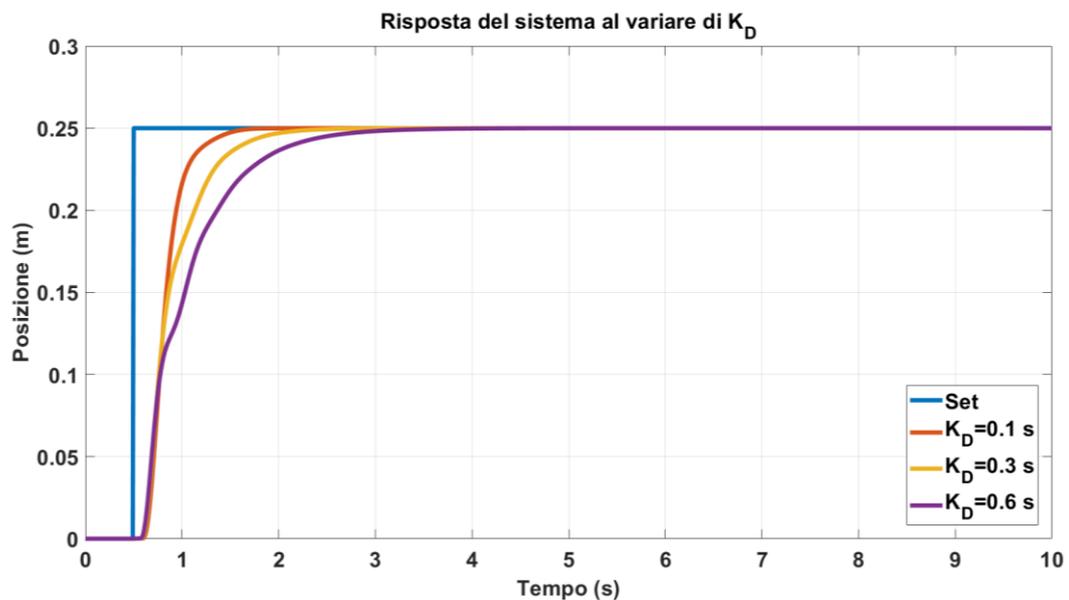


Grafico 7.5 Risposta del modello ad un segnale a gradino al variare di K_D

Nel Grafico 7.6 è riportato l'andamento dell'errore al variare di K_D . Notiamo come per $K_D=0.1$ s il sistema è stabile e rapido.

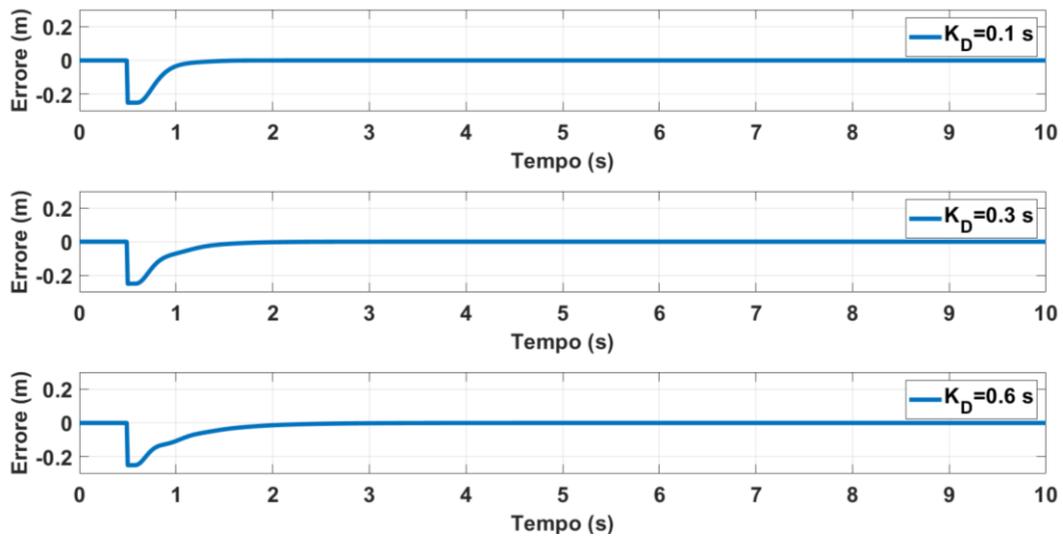


Grafico 7.6 Errore della risposta al variare di K_D

Un ulteriore confronto si può effettuare sostituendo il blocco PID con il componente PID Tuning riportato in Figura 7.7. Il PID Tuning è uno strumento di calibrazione per i controllori PID. La calibrazione avviene in 2 fasi: prima viene identificato un modello semplificato dell'impianto dai risultati della simulazione, quindi viene messa a punto la dinamica ad anello chiuso. La sintesi del guadagno si basa sulla teoria del controllo del modello interno per sistemi Linear Time Invariant. Sebbene questo controller sia originariamente realizzato per i sistemi lineari, potrebbe ancora funzionare se il sistema cambia leggermente durante il funzionamento.



Figura 7.7 Componente PID Tuning su *Amesim*®

In Tabella 7.1 sono riportati i parametri dei due PID configurati, a sinistra quello configurato manualmente mentre a destra quello con il tuning.

	Manuale	Tuning
Kp	2	1.572
Ki [s⁻¹]	0	0
Kd [s]	0.1	0.228

Tabella 7.1 Valori utilizzati nei due PID

Nel Grafico 7.7 sono riportati gli andamenti della risposta al variare dei due PID utilizzati. Possiamo concludere che la parametrizzazione manuale del PID è più rapida di quella tramite tuning, in quanto presenta una risposta più veloce raggiungendo la stabilità un secondo prima dell'altra.

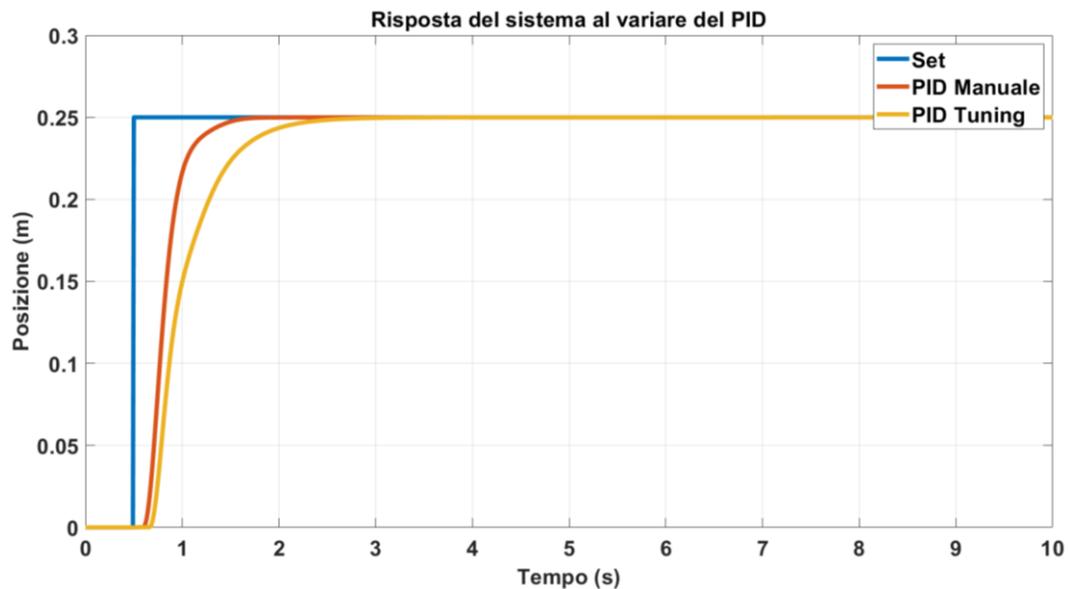


Grafico 7.7 Risposta del sistema al variare del PID utilizzato

Nel Grafico 7.8 è riportato l'andamento dell'errore nei due casi studiati.

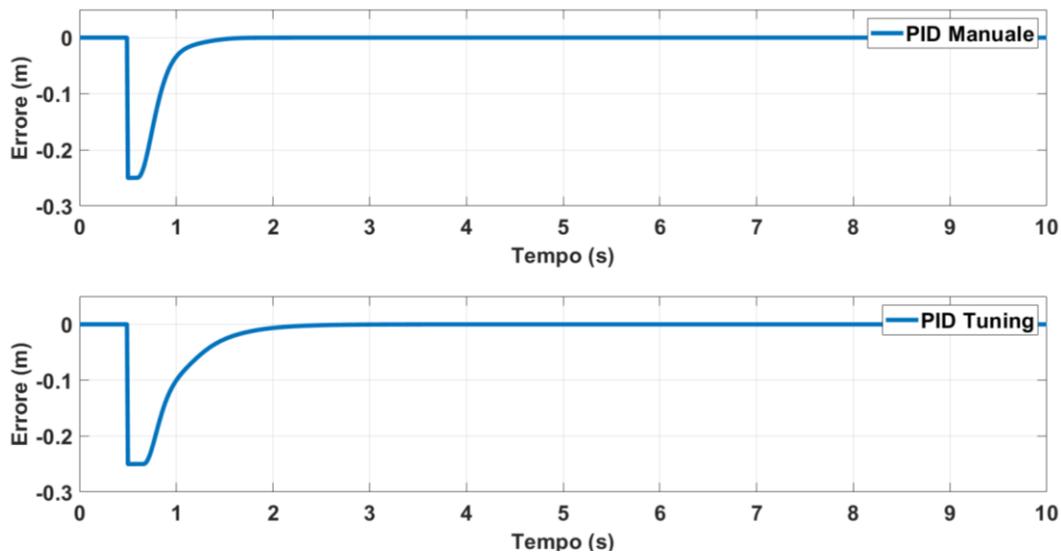


Grafico 7.8 Errore del sistema al variare del PID utilizzato

7.4 Controllo posizione e angolo del pendolo

Una volta realizzato il modello del controllo posizione è possibile ampliarlo inserendo anche il pendolo inverso e il controllore PID in serie a quello già presente. In particolare, come si può osservare dalla Figura 7.8 nella quale è riportato il modello completo realizzato su *Amesim*®, il PID di rotazione riceve in input la differenza tra l'output del PID di traslazione e il segnale di feedback tra trasduttore rotativo.

In questo caso non è stato possibile utilizzare il blocco di PID Tuning, trattandosi di un sistema instabile. Per questo motivo è stata fatta una calibrazione manuale del sistema partendo inizialmente dal solo controllo angolare e poi implementando anche quello di posizione.

Il sistema è sottoposto ad un comando a gradino di ampiezza 100 m, con una posizione iniziale di 250 mm. Il carrello ha una massa di 1.5 kg mentre il pendolo ha una massa di 0.4 kg. Il sistema presenta un attrito statico di 20.9 Ns/m.

Il resto del sistema è uguale al modello descritto per il controllo della sola posizione del sistema.

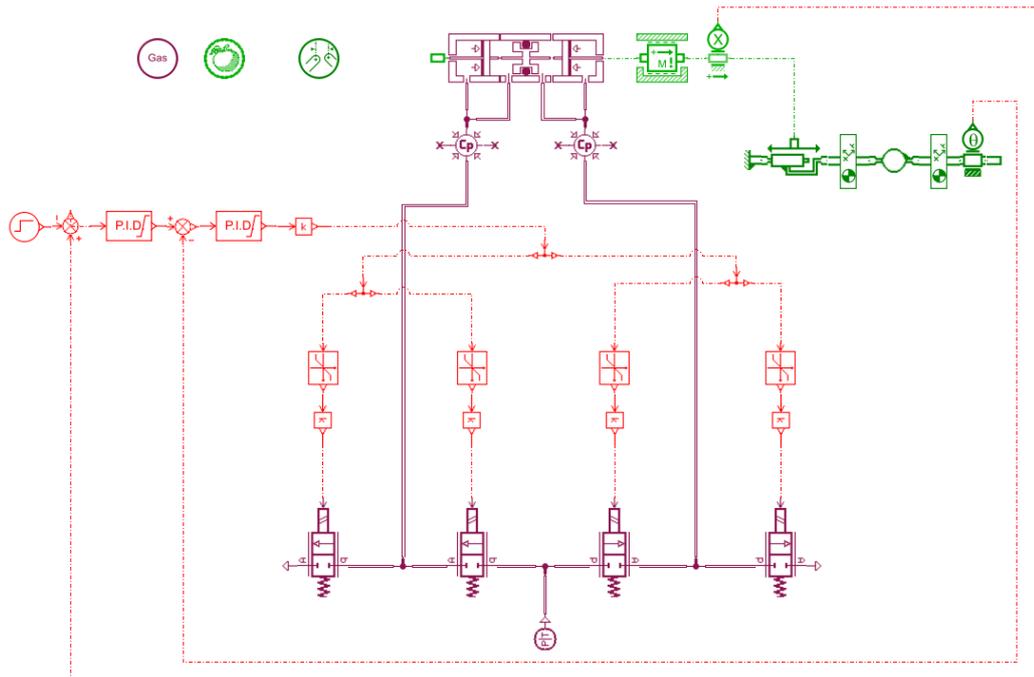


Figura 7.8 Modello completo con controllo posizione e angolo

In Tabella 7.2 sono riportati i parametri utilizzati per i due blocchi PID. I valori dei coefficienti del PID_x sono più bassi rispetto a quelli del PID_θ.

PID	Traslazione	Rotazione
K_P	1.1	2
K_I [s⁻¹]	0.1	2.5
K_D [s]	0.1	0.7

Tabella 7.2 Parametri del PID di traslazione e di rotazione

7.4.1 Risultati ottenuti

Una volta impostati correttamente i valori di entrambi i PID è possibile far partire la simulazione. Nel Grafico 7.9 è riportato l'andamento del carrello in risposta ad un segnale a gradino, come si può notare, essendo un sistema non lineare, non si raggiunge mai la stabilità ma oscilla intorno al valore di set. È interessante notare l'undershoot che si presenta quando inizia il segnale a gradino. Ciò è giustificato dal fatto che il movimento del carrello presenta un andamento caratteristico dei sistemi a non minima rotazione di fase. Questo è dovuto dal fatto

che il carrello deve sbilanciare il pendolo nel verso del moto e per far ciò deve inizialmente muoversi nella direzione opposta.

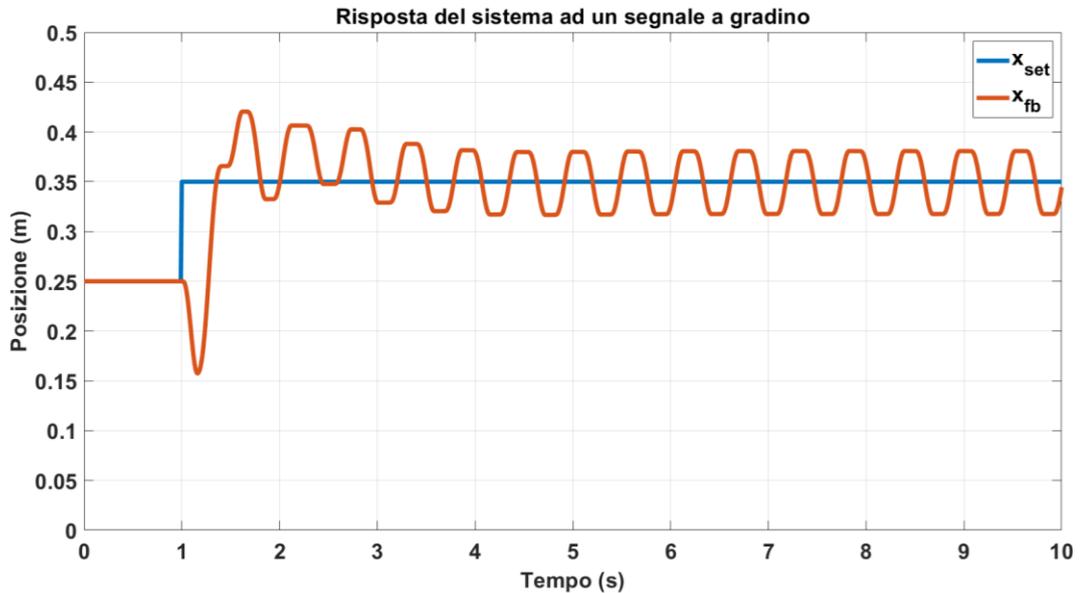


Grafico 7.9 Risposta in controllo traslazione ad un segnale a gradino

Nel Grafico 7.10 è riportato l'andamento del θ_{set} e del $\theta_{feedback}$. Come possiamo vedere, il pendolo segue il segnale di input dettato dall'errore di posizione. Ciò è dovuto al fatto che il carrello cerca sempre di posizionarsi al di sotto della massa del pendolo.

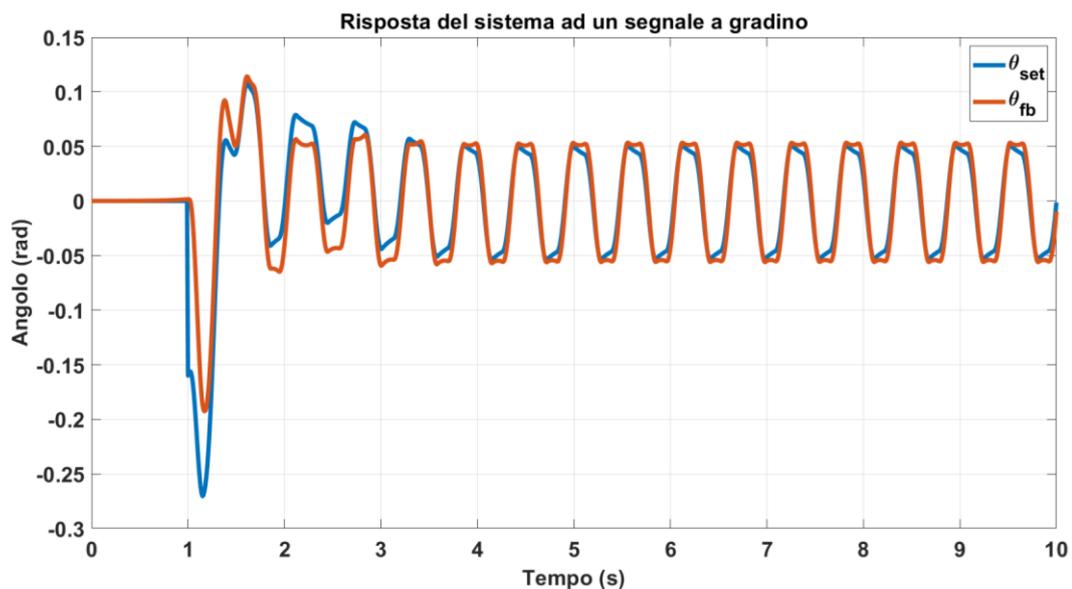


Grafico 7.10 Risposta in controllo rotazione ad un segnale a gradino

8 Risultati sperimentali per il controllo posizione

In questo capitolo si confrontano le prestazioni del sistema utilizzando le diverse tipologie di valvole in differenti situazioni di funzionamento, effettuando un confronto fra le varie tecnologie di controllo (modulazione PWM, controllore PID) con lo scopo di ottenere le migliori condizioni di lavoro e i parametri di risposta ottimizzati per il controllo della posizione del carrello.

8.1 Requisiti di un sistema di controllo

Con riferimento alla Figura 8.1 osserviamo i parametri che definiscono un sistema, ossia la stabilità, la precisione e la velocità di risposta del controllo. Un sistema si definisce stabile quando la variabile di processo (segnale di output) si avvicina asintoticamente alla variabile impostata di riferimento (segnale di input). La precisione statica, invece, è correlata all'errore statico del sistema, vale a dire la differenza tra il valore a regime e il segnale di riferimento. La risposta del sistema si definisce attraverso tre parametri: la sovraelongazione percentuale, il tempo di salita e la prontezza. La sovraelongazione massima \hat{s} è la differenza fra il massimo valore che la variabile di processo può assumere durante il transitorio e il valore di riferimento, dal punto di vista matematico si può definire secondo la formula riportata nell'equazione 8.1.

$$\hat{s} = \frac{y_{max} - y_{set}}{y_{set}} \quad 8.1$$

La quantità \hat{s} definisce la precisione dinamica del sistema e si può anche esprimere in forma percentuale tramite l'equazione 8.2.

$$\hat{s}_{\%} = 100 * \hat{s} \quad 8.2$$

La prontezza e il tempo di salita, invece, definiscono la velocità di risposta di un controllo. Il primo, anche detto tempo di assestamento ($t_{a5\%}$), è la quantità di tempo necessaria affinché la risposta al gradino raggiunga e rimanga all'interno di un intervallo pari a $\pm 5\%$ del valore a regime y_{set} . Mentre il tempo di salita t_r è il

tempo necessario affinché la risposta salga dallo 0% al 100% del suo valore di riferimento.

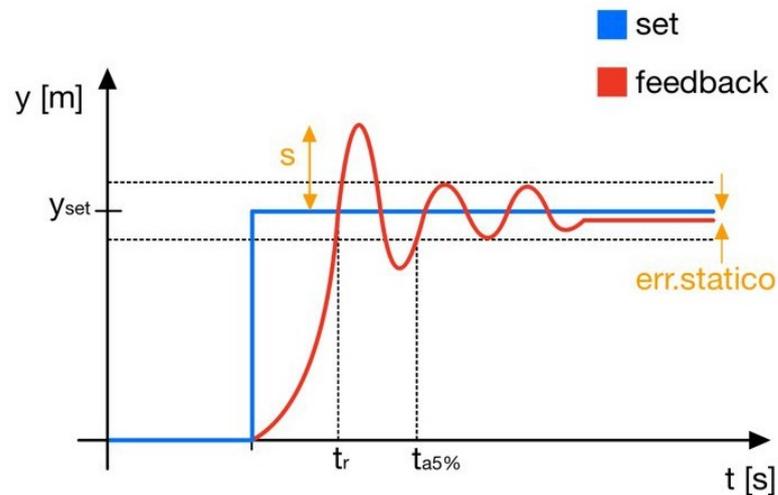


Figura 8.1 Risposta ad un segnale a gradino

Tutte le prove per il controllo della posizione sono state eseguite con il solo carrello installato, il segnale a gradito fornito ha un'ampiezza di 250 mm e la posizione iniziale è pari a 0 mm , ossia l'attuatore è completamente rientrato.

8.2 Controllo posizione tramite il blocco CTRL_PWM

Il primo metodo di controllo è mediante il blocco funzionale CTRL_PWM, il cui codice Ladder è stato descritto nel Capitolo 4.1.3. Per le uscite veloci si può regolare il tempo di ciclo, pertanto sono stati scelti quattro valori per osservare come varia la risposta del sistema al variare della frequenza. In particolare i valori scelti sono 50 , 100 , 150 e 200 ms per il tempo ciclo, a cui corrispondono 20 , 10 , 6.67 e 5 Hz di frequenza. Tutte le prove sono state effettuate tramite una regolazione veloce: il sistema inizia a regolare quando il carrello si trova a 100 mm dal valore di set.

Nel Grafico 8.1 è riportata la risposta del sistema comandato dalle valvole della Matrix 224 con una frequenza di 20 Hz . Il feedback presenta un'ottima rapidità di risposta e un overshoot minimo. Dopo pochi secondi, inoltre, il sistema stabilizza con un errore statico basso.

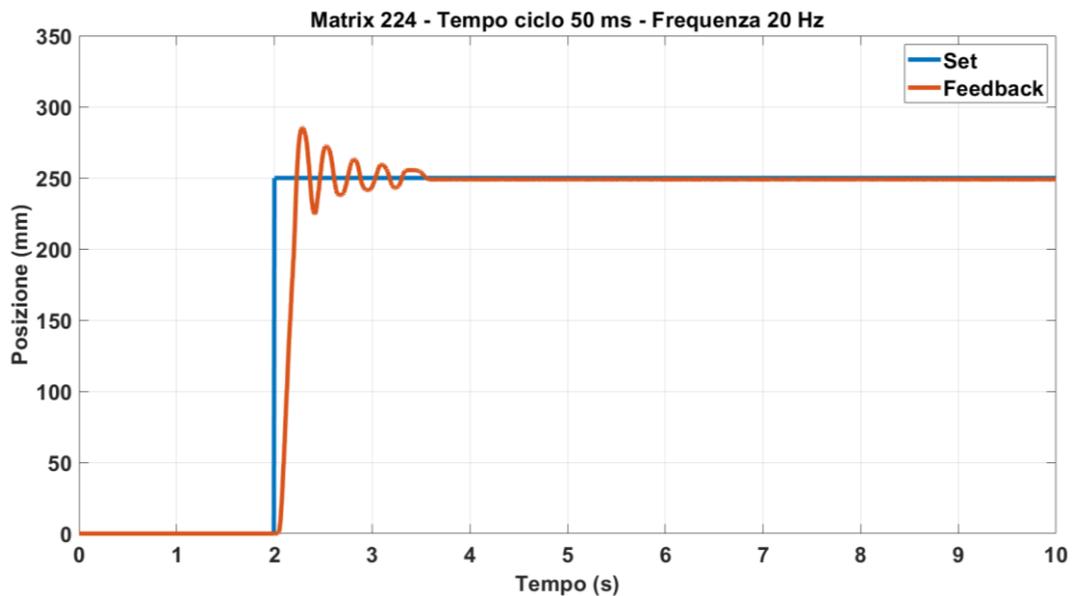


Grafico 8.1 Risposta a gradino - Matrix 224 - Frequenza 20 Hz

Nel Grafico 8.2, invece, è riportata la risposta con un tempo ciclo di 100 ms. Si nota subito come la sovraelongazione aumenta ed il carrello oscilla intorno alla posizione di set senza mai fermarsi.

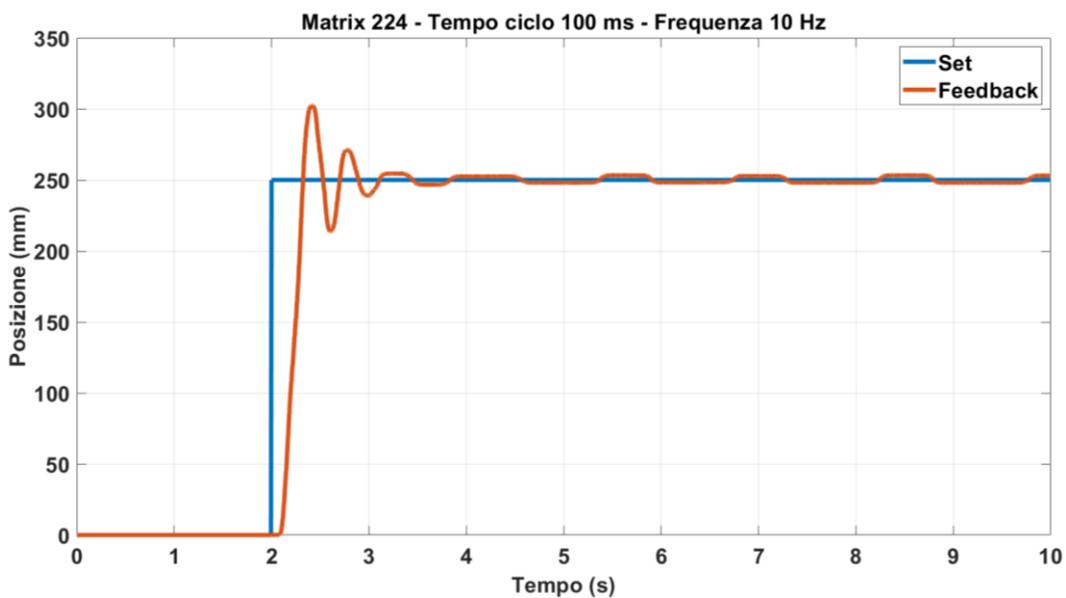


Grafico 8.2 Risposta a gradino - Matrix 224 - Frequenza 10 Hz

Diminuendo la frequenza a 6.67 Hz , la risposta presenta un valore di overshoot maggiore, ma si ferma in prossimità del valore di x_{set} , con un errore statico minimo.

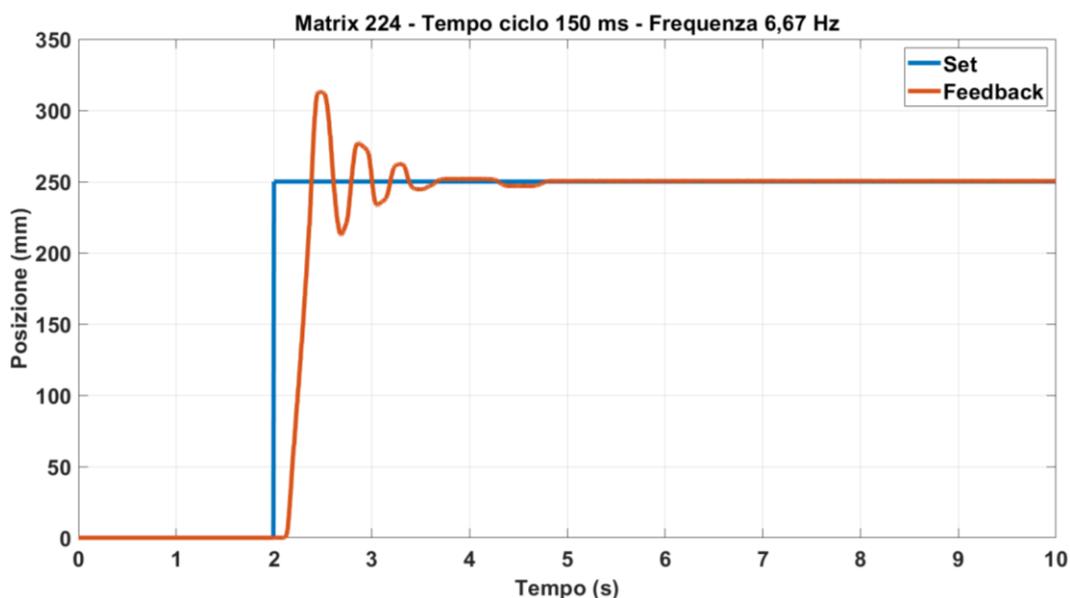


Grafico 8.3 Risposta a gradino - Matrix 224 - Frequenza 6,67 Hz

Infine, portando la frequenza a 5 Hz, la risposta non converge al segnale di feedback. Il cui andamento è riportato nel Grafico 8.4.

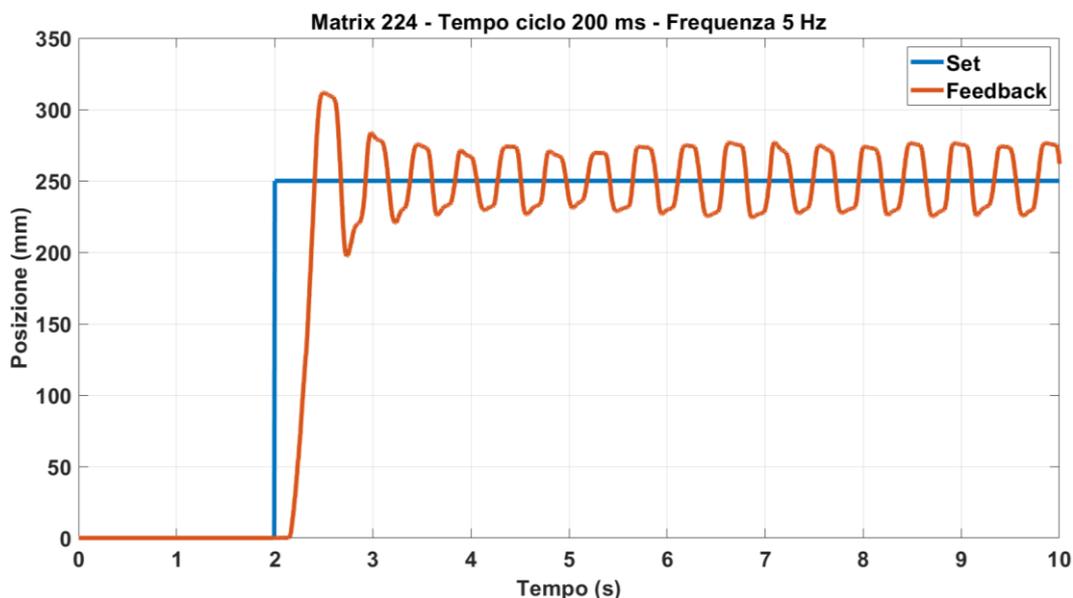


Grafico 8.4 Risposta a gradino - Matrix 224 - Frequenza 5 Hz

In Tabella 8.1 sono riportati i valori dei tre parametri precedentemente citati, nelle quattro diverse configurazioni descritte. In concordanza con quanto visto nei grafici, i parametri più elevanti sono presenti ad una frequenza più bassa. Pertanto una risposta migliore la si ottiene a frequenze più elevate, in accordo con quanto

visto nella descrizione teorica. Una frequenza più alta, infatti, permette di rendere il segnale digitale quanto più simile a quello analogico.

Parametri caratterizzanti la risposta con le valvole Matrix 224				
f [Hz]	20	10	6.67	5
$\hat{s}_\%$ [%]	14.2	21	25.2	24.76
t_r [s]	0.23	0.32	0.38	0.41
$t_{a5\%}$ [s]	0.83	0.84	1.14	-

Tabella 8.1 Parametri caratterizzanti la risposta con le Matrix 224

Le stesse prove sono state eseguite con le valvole della Camozzi per poter effettuare un confronto. In generale, come è possibile vedere nei successivi grafici, rispondono meglio rispetto le valvole della Matrix 224.

Nel Grafico 8.5 è riportata la risposta del sistema con le valvole della Camozzi con un frequenza di 20 Hz. Il sistema risponde con un overshoot molto basso e privo di oscillazioni.

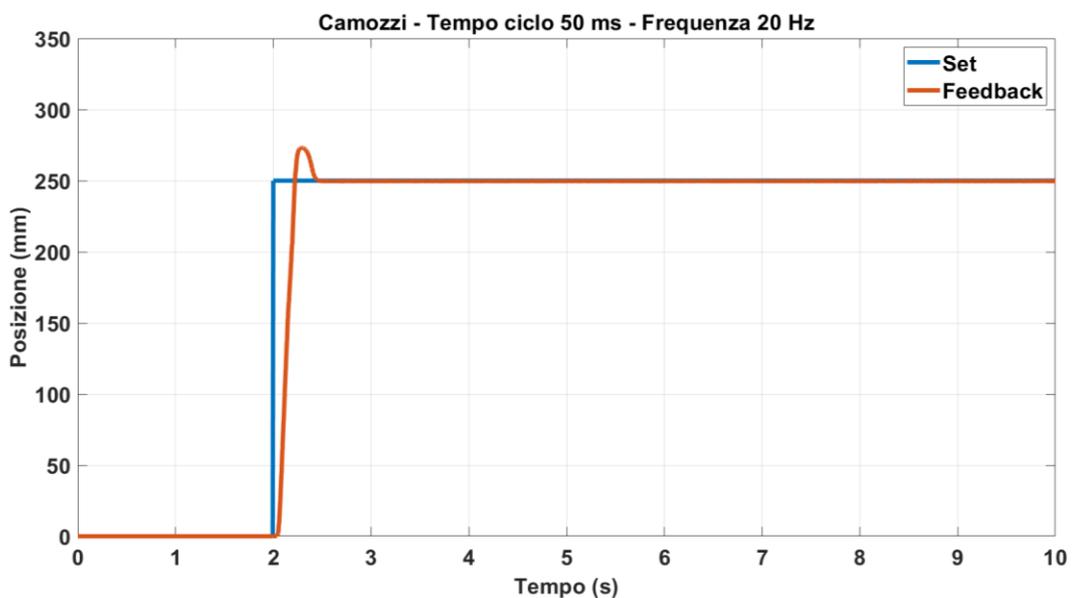


Grafico 8.5 Risposta a gradino - Camozzi - Frequenza 20 Hz

Aumentando la frequenza a 10 Hz, aumenta il valore della sovraelongazione e il numero delle oscillazioni, mantenendo il valore del tempo di assestamento molto basso.

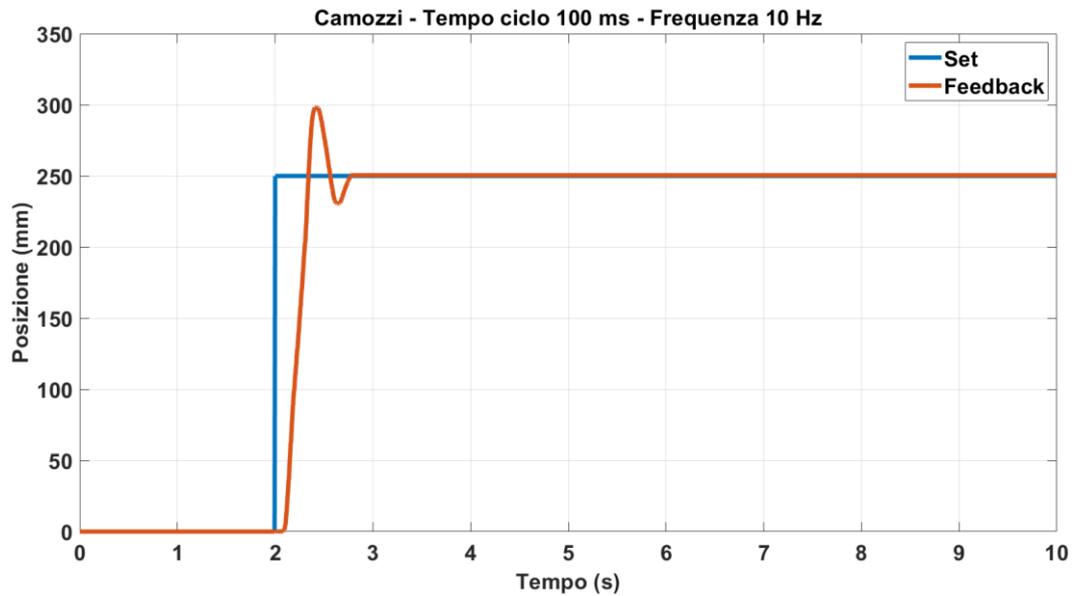


Grafico 8.6 Risposta a gradino - Camozzi - Frequenza 10 Hz

Nel Grafico 8.7 è riportata la risposta del sistema con una frequenza di 6,67 Hz.

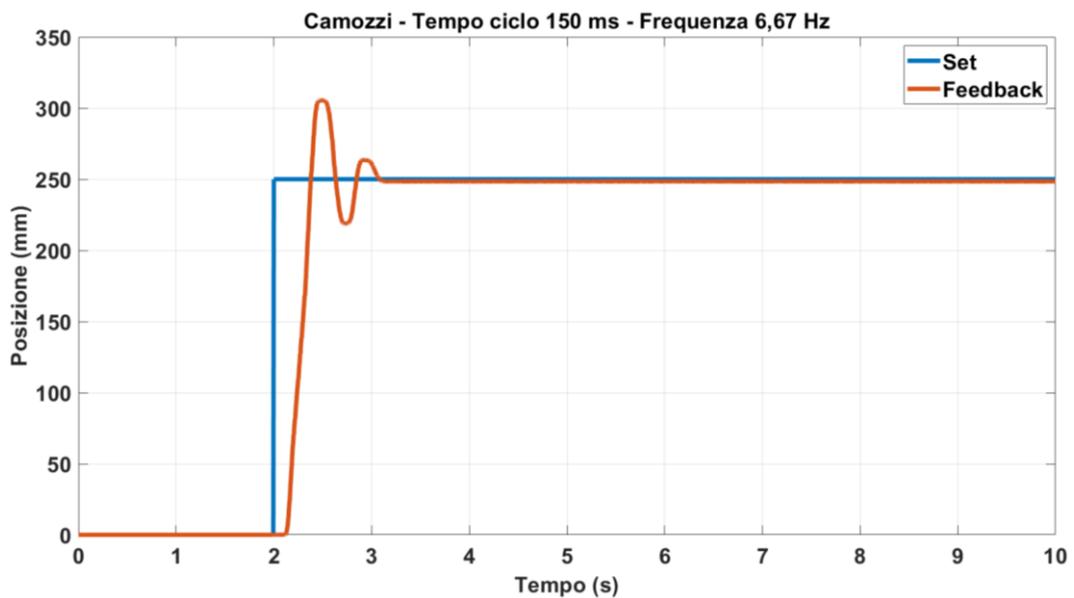


Grafico 8.7 Risposta a gradino - Camozzi - Frequenza 6,67 Hz

Essa presenta un numero maggiore di oscillazioni ed una risposta più lenta rispetto alle risposte precedentemente incontrate.

Nel Grafico 8.8 è riportata la risposta del sistema ad un comando in frequenza di 5 Hz: nonostante presenti delle oscillazioni, la risposta stabilizza dopo poco più di tre secondi.

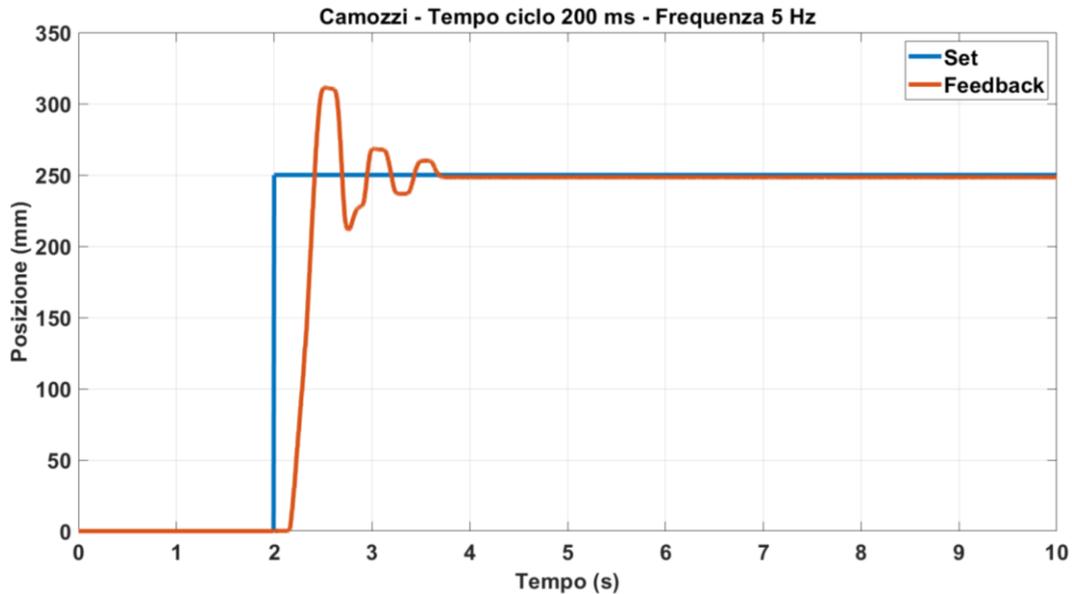


Grafico 8.8 Risposta a gradino - Camozzi - Frequenza 5 Hz

Nella Tabella 8.2 sono stati riportati i valori dei parametri di overshoot, tempo di salita e del tempo di assestamento al 5% per il funzionamento del sistema tramite le valvole della Camozzi al variare della frequenza.

Parametri caratterizzanti la risposta con le valvole Camozzi				
f [Hz]	20.0	10.0	6.67	5.00
$\hat{s}_\%$ [%]	9.28	19.3	22.2	24.6
t_r [s]	0.21	0.34	0.38	0.41
$t_{a5\%}$ [s]	0.39	0.69	0.99	1.38

Tabella 8.2 Parametri caratterizzanti la risposta con le Camozzi

Anche in questo caso notiamo un peggioramento delle prestazioni al diminuire della frequenza.

A questo punto è possibile fare un confronto tra le due valvole nelle migliori configurazioni possibili, ossia 20 Hz di frequenza per entrambe. Nel Grafico 8.9 è riportata la risposta dei due sistemi. Come possiamo notare, le valvole della Camozzi presentano un numero ridotto di oscillazioni, un overshoot minore ed un errore statico più basso.

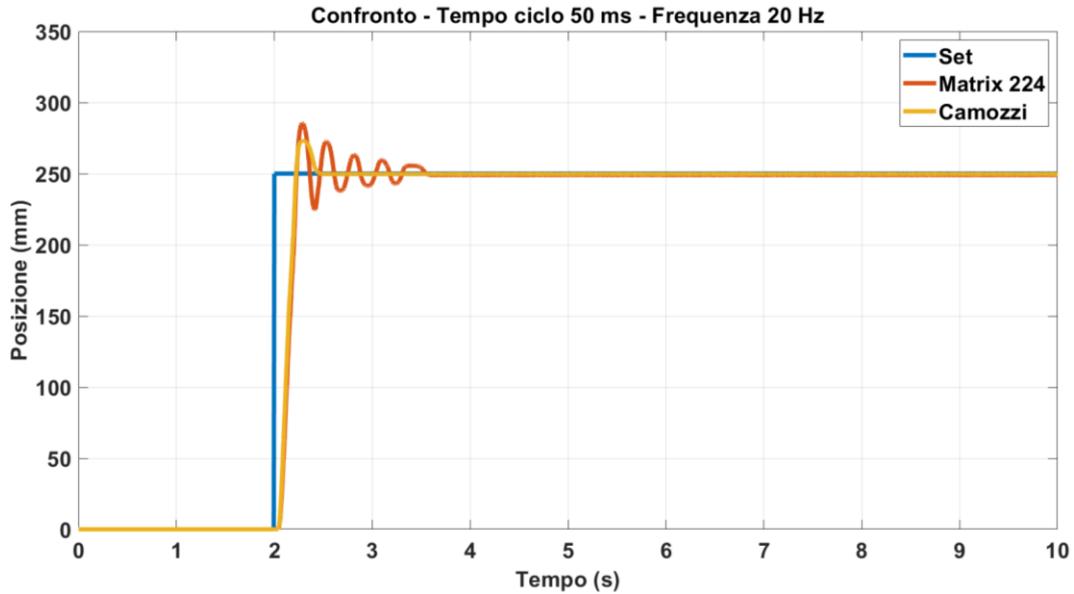


Grafico 8.9 Confronto valvole Matrix 224 e Camozzi con CTRL_PWM

8.3 Controllo posizione tramite controllore PID

I parametri di un controllore PID possono essere ottenuti con diversi metodi di tuning, in particolare si confronta il metodo manuale (per tentativi) e il metodo Ziegler Nichols. Quest'ultimo è un metodo molto diffuso per la regolazione di un controllore PID. Inizialmente i parametri K_I e K_D sono impostati a zero e si aumenta il valore di K_P fino a quando il feedback inizia ad oscillare. Una volta iniziata l'oscillazione, si annota il guadagno critico K_P e il periodo delle oscillazioni T_0 . I parametri K_P , T_I e T_D vengono quindi regolati secondo le formule in Tabella 8.3.

Parametri PID con metodo Ziegler Nichols			
	K_P	T_I [s]	T_D [s]
P	$0.5K_{P0}$	-	-
PI	$0.45K_{P0}$	$0.8T_0$	-
PID	$0.6K_{P0}$	$0.5T_0$	$0.125T_0$

Tabella 8.3 Parametri del PID con metodo Ziegler Nichols

Per la regolazione manuale, invece, è necessario conoscere il significato di ciascun parametro di guadagno. Anche in questo metodo, i termini K_I e K_D vengono impostati prima a zero e il guadagno proporzionale viene aumentato finché il feedback non oscilla. Il valore di K_P è stato impostato per ottenere una risposta rapida, il termine integrale viene aumentato per fermare le oscillazioni e ridurre l'errore di stato stazionario, ma aumenta l'overshoot. Tuttavia, l'overshoot è necessario affinché il sistema possa rispondere immediatamente ai cambiamenti. Il termine derivativo, invece, viene aumentato fino a quando il ciclo non raggiunge il punto di regolazione. L'aumento del termine derivato riduce l'overshoot e produce un guadagno maggiore con stabilità, ma rende il sistema sensibile al rumore. In questo capitolo confronteremo i due metodi di tuning per il controllo della posizione del carrello sottoposto ad un segnale a gradino azionato tramite le valvole Matrix MX821100C224. Si effettua, prima, un tuning con il metodo Ziegler Nichols e successivamente quello manuale, andando poi a confrontare i risultati ottenuti.

Nel Grafico 8.10 è riportata la risposta del sistema con controllo proporzionale con coefficiente $K_P = 1.45$, ossia il valore minimo affinché il sistema oscilli.

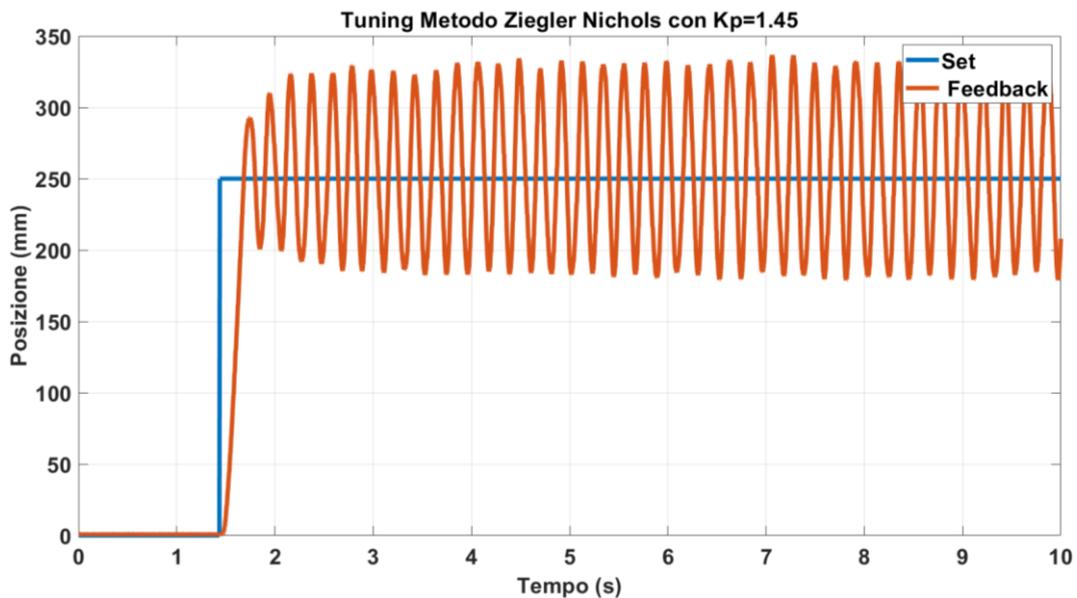


Grafico 8.10 Tuning con metodo Ziegler Nichols con $K_P = 1.45$

A questo punto è stato possibile calcolare il periodo di oscillazione T_0 , mediato su 10 misurazioni. Si ottiene, pertanto, un valore di $K_0=1.45$ e di $T_0 = 340$ ms. Sostituendoli nella Tabella 8.3, si ottengono i seguenti valori dei parametri del PID:

$$K_p = 0.87 \quad T_I = 0.17 \text{ s} \quad T_D = 0.0425 \text{ s}$$

Riportandoli, successivamente, nella configurazione del PID_Compact, si ottiene il risultato riportato nel Grafico 8.11.

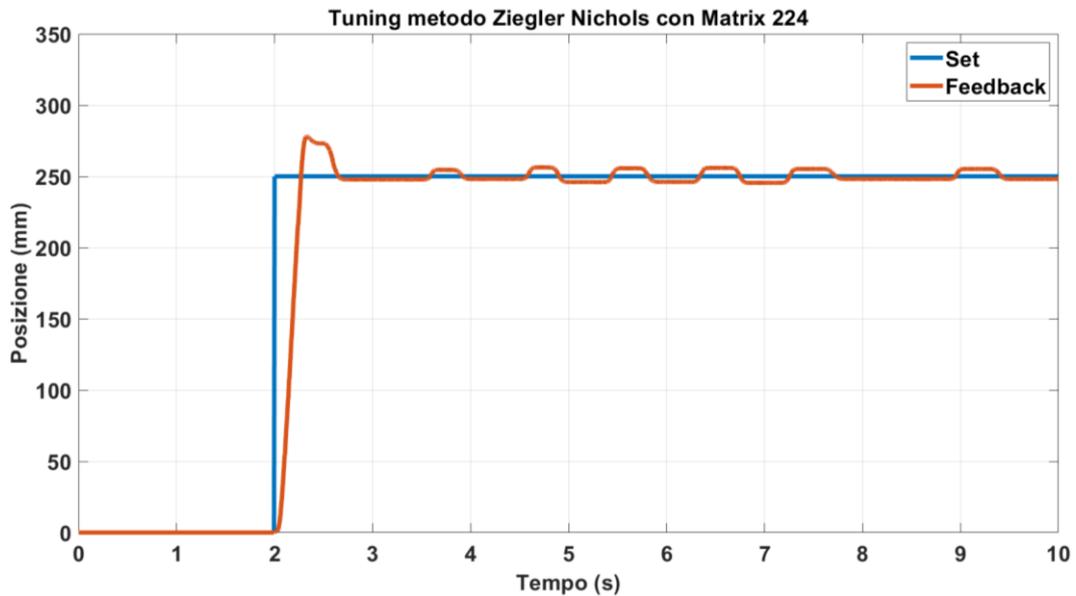


Grafico 8.11 Tuning con il metodo Ziegler Nichols con Matrix 224

Come si può notare, il sistema presenta un buon tempo di risposta e un piccolo overshoot, stabilizza nell'intorno del valore di x_{set} senza, però, mai fermarsi.

A questo punto è possibile eseguire il tuning manuale, nel nostro caso sono stati scelti tre valori per ciascun parametro, scegliendo, di volta in volta, il valore che meglio rispetta le caratteristiche richieste. Nel Grafico 8.12 è riportata la risposta del sistema ad un segnale a gradino con controllo puramente proporzionale. È possibile notare come per un valore di $K_p=1.5$ presenta numerose oscillazioni, mentre per $K_p=1$ notiamo un errore a regime. Pertanto si sceglie $K_p=1.2$ in quanto il sistema presenta delle lievi oscillazioni e una buona stabilizzazione.

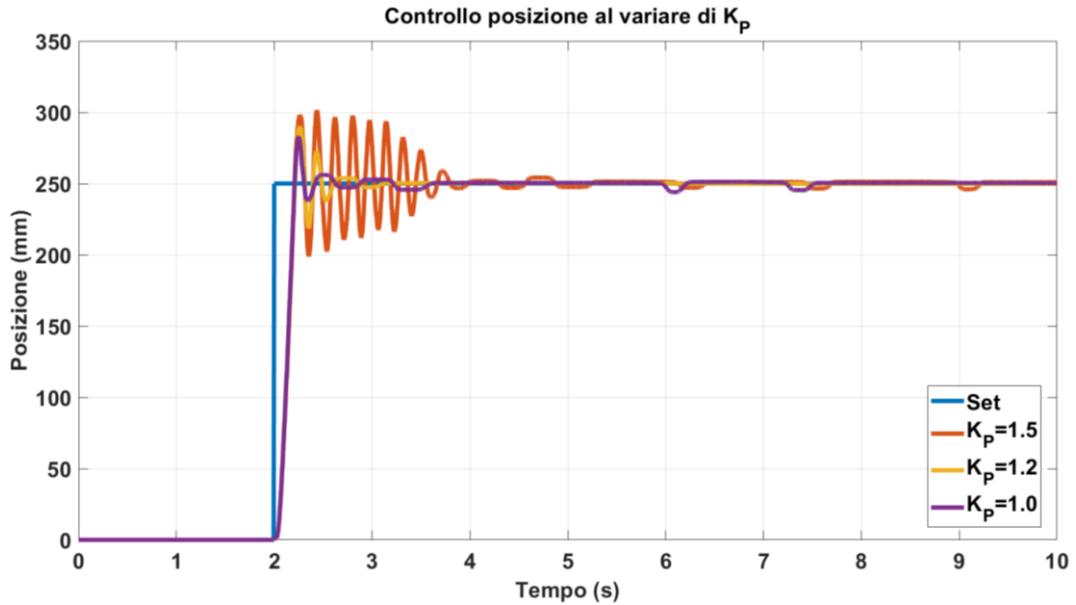


Grafico 8.12 Controllo posizione al variare di K_p

Una volta determinato il valore di K_p , si esegue il controllo posizione al variare di K_I , in questo caso i tre valori scelti sono 0.6, 0.4 e 0.3 s^{-1} . La soluzione migliore la si ottiene per $K_I = 0.4$, come si può notare dal Grafico 8.13.

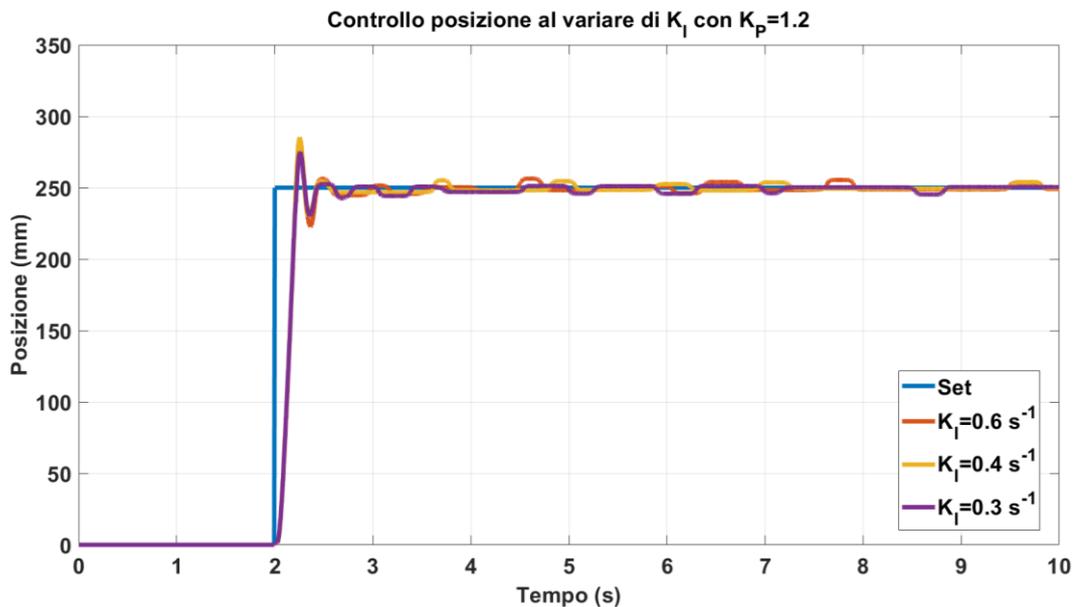


Grafico 8.13 Controllo posizione al variare di K_I con $K_p=1.2$

Il valore di overshoot aumenta, ma in compenso diminuiscono le oscillazioni e l'errore a regime. Noto K_I e K_p è possibile determinare il valore di K_D .

Anche in questo caso sono stati scelti tre valori, ossia 0.012, 0.036 e 0.06 s. I risultati ottenuti sono stati riportati nel Grafico 8.14.

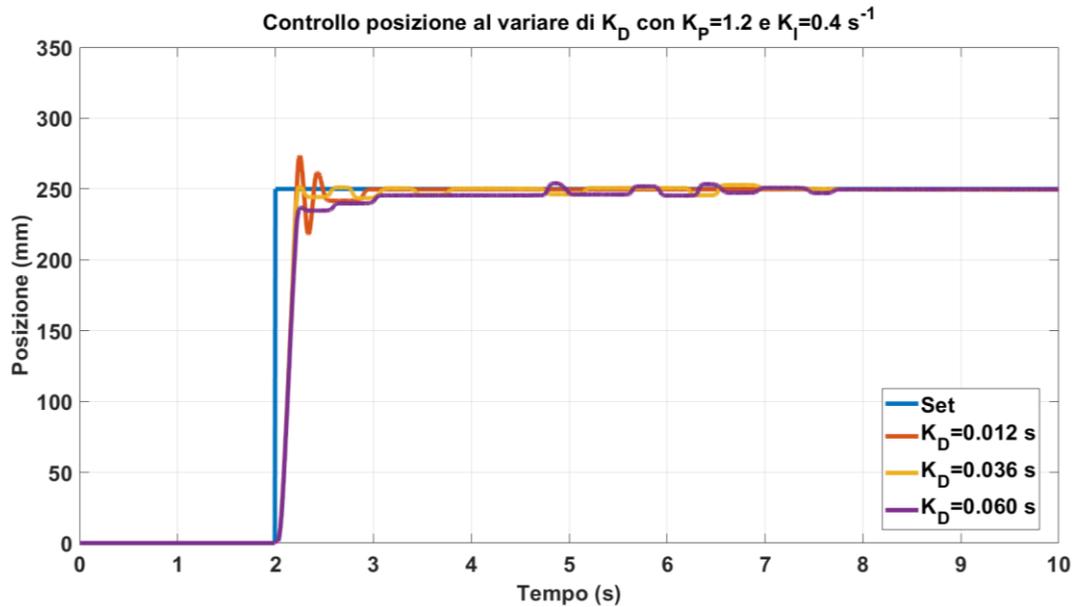


Grafico 8.14 Controllo posizione al variare di K_D con $K_P=1.2$ e $K_I=0.4 \text{ s}^{-1}$

Il valore di K_D per una corretta stabilizzazione del sistema è pari a 0.012 s. Esso, infatti, permette da una parte di preservare il valore di overshoot, essenziale per la risposta ai disturbi del sistema, dall'altra di eliminare completamente l'errore a regime.

È possibile pertanto confrontare la stabilizzazione ottenuta con il metodo di Ziegler Nichols e quella ottenuta con il metodo manuale. I due andamenti sono riportati nel Grafico 8.15. La stabilizzazione con tuning manuale presenta una piccola oscillazione iniziale, ma in compenso stabilizza in prossimità del valore desiderato e ha una risposta al sistema più rapida. Di contro il sistema stabilizzato con il metodo di Ziegler Nichols non presenta oscillazioni.

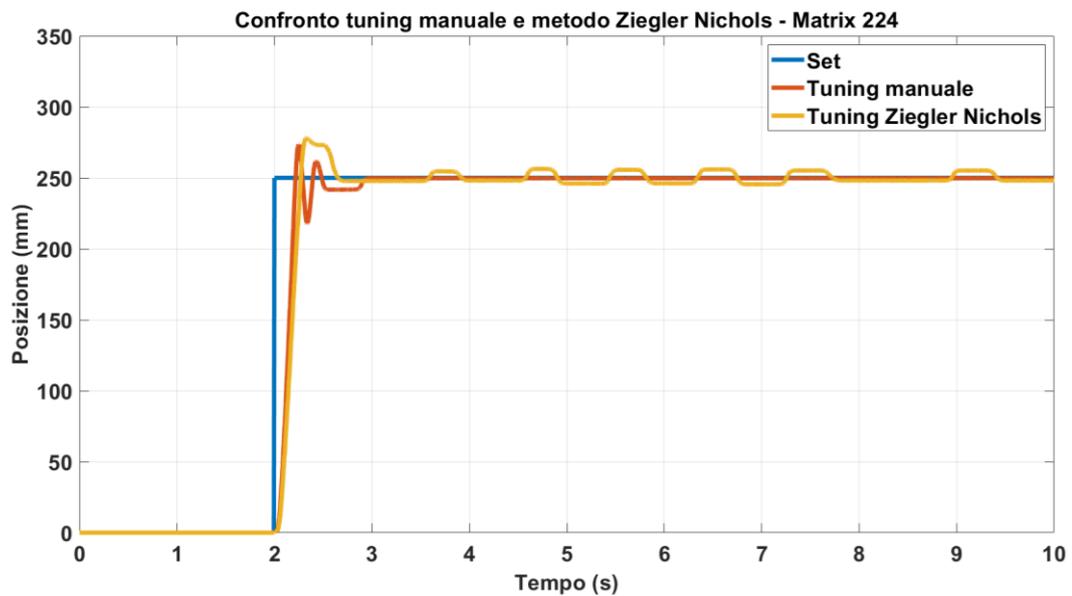


Grafico 8.15 Confronto tuning manuale e metodo di Ziegler Nichols

Un'ulteriore conferma la si ottiene confrontando il valore della sovralongazione, del tempo di assestamento e del tempo di salita. I valori sono riportati nella Tabella 8.4.

Confronto metodi di tuning		
	Manuale	Zigler Nichols
K_P	1.20	0.87
$K_I [s^{-1}]$	0.40	5.12
$K_D [s]$	0.012	0.037
$\hat{s}_\% [\%]$	9.44	11.24
$t_r [s]$	0.22	0.27
$t_{a5\%} [s]$	0.38	0.59

Tabella 8.4 Parametri per il confronto metodi di tuning

È possibile, pertanto, considerare il metodo di tuning, anche se più lungo, più efficace nella stabilizzazione del sistema. Pertanto per i restanti sistemi è stato utilizzato quest'ultimo metodo.

Il primo sistema stabilizzato è quello azionato dalle valvole della Camozzi. La risposta è riportata nel Grafico 8.16. È stato utilizzato un K_P uguale 2, un K_I pari a

0.25 s^{-1} ed un K_D uguale a 0.02 s . La risposta presenta un lieve overshoot ed una buona rapidità di risposta. A regime oscilla intorno alla posizione di x_{set} .

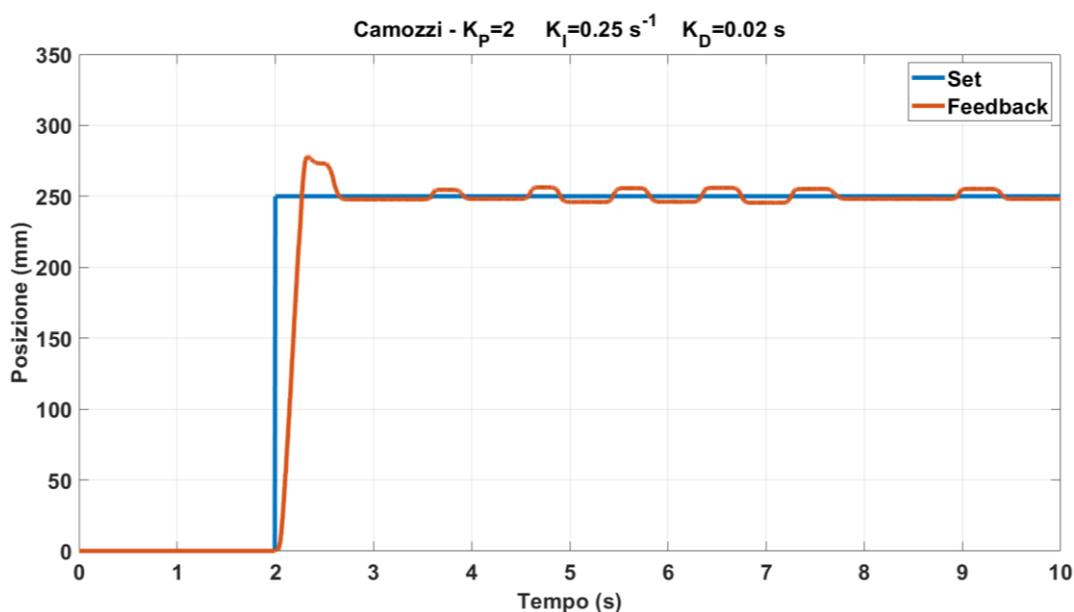


Grafico 8.16 Risposta del sistema con le Camozzi

Nel Grafico 8.17 è riportata la risposta del sistema con le Matrix 2KK, le quali utilizzano il Driver Speed-Up. Il sistema non presenta overshoot e presenta un tempo di assestamento molto basso ma oscilla intorno al valore di set. I valori utilizzati sono $K_P = 0.65$, $K_I = 0.13 \text{ s}^{-1}$ e $K_D = 0.026 \text{ s}$.

Nel Grafico 8.18, invece, è stata riportata la risposta del sistema utilizzando le valvole Matrix 3KK, essendo solo due valvole, ci si aspetta una risposta più rapida. Questo produce un overshoot più elevato rispetto le rispettive valvole 2/2, ma presenta un numero minore di oscillazioni ed un errore statico più basso. I valori dei coefficienti del controllore PID sono $K_P = 0.8$, $K_I = 0.73 \text{ s}^{-1}$ e $K_D = 0.028 \text{ s}$.

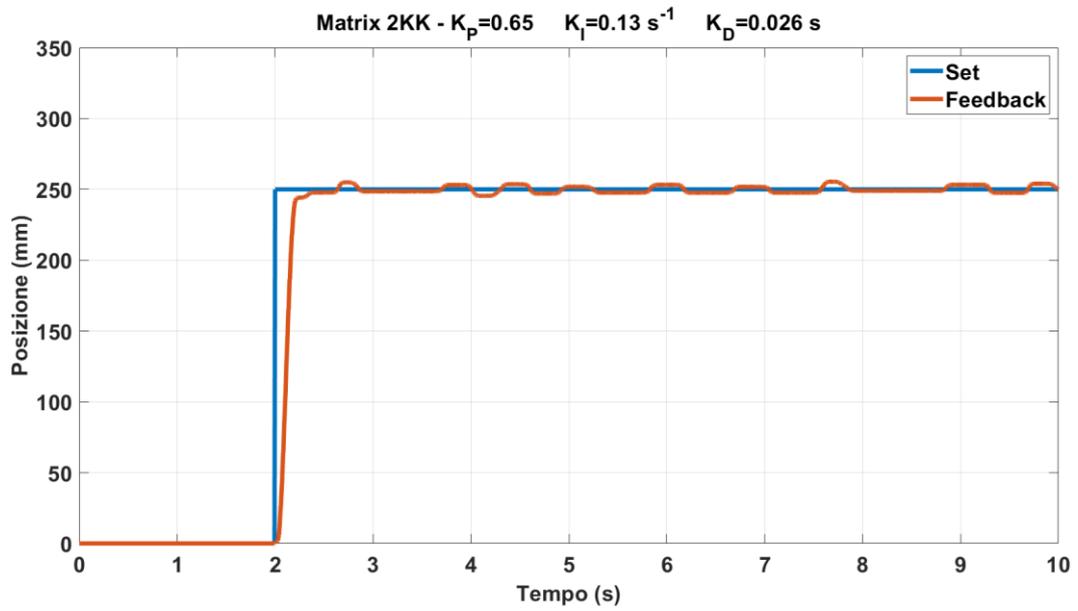


Grafico 8.17 Risposta del sistema con le Matrix 2KK

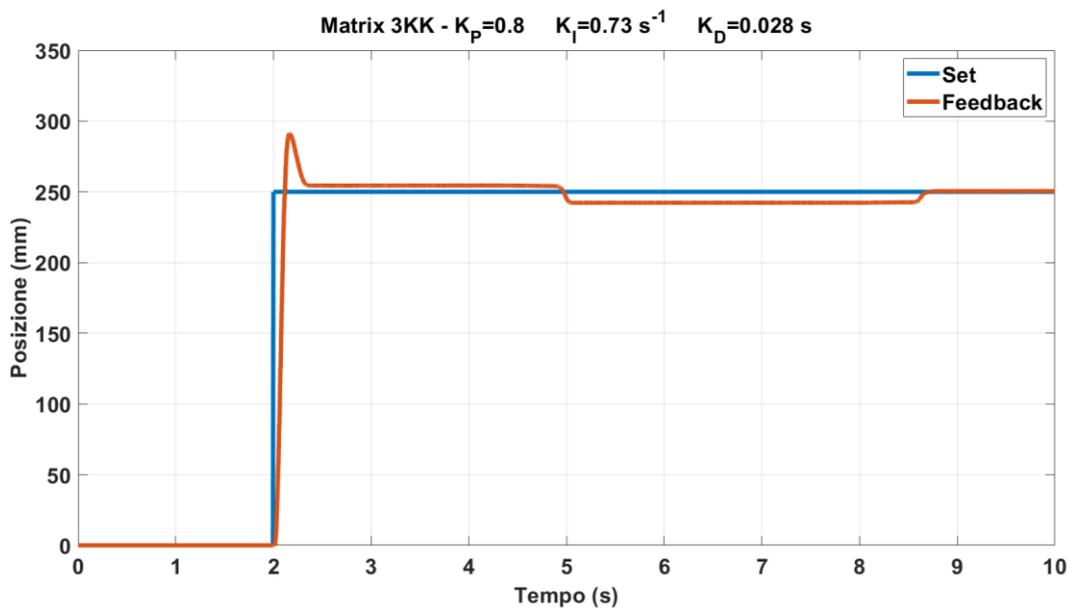


Grafico 8.18 Risposta del sistema con le Matrix 3KK

Per confronto, nel Grafico 8.19, è riportata la risposta del sistema con le valvole della Matrix 224, già descritta in precedenza.

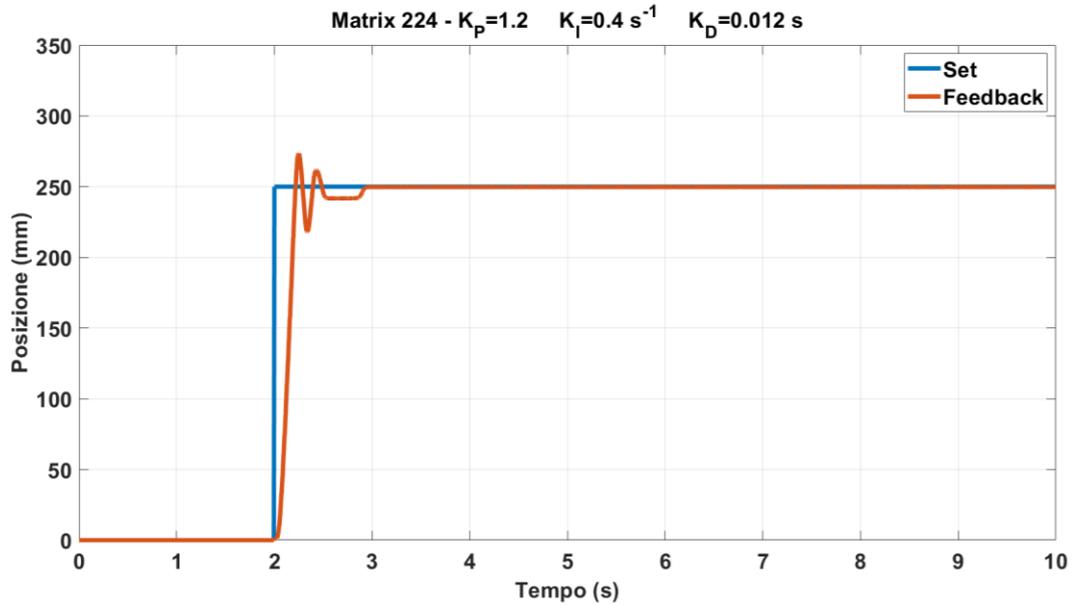


Grafico 8.19 Risposta del sistema con le Matrix 224

In Tabella 8.5 sono riportati i parametri caratterizzanti la risposta al variare delle valvole utilizzate: in rosso è evidenziato il parametro più elevato di ciascuna riga, mentre in verde quello più basso.

Parametri caratterizzanti la risposta al variare delle valvole				
Valvola	Camozzi	Matrix 224	Matrix 2KK	Matrix 3KK
$\hat{s}_\% \text{ [%]}$	11.24	9.44	2.00	16.5
$t_r \text{ [s]}$	0.27	0.22	0.64	0.11
$t_{a5\%} \text{ [s]}$	0.59	0.37	0.21	0.28

Tabella 8.5 Parametri caratterizzanti la risposta al variare delle valvole

Effettuando un confronto grafico e parametrico delle prestazioni delle valvole si può affermare che le valvole 2/2 della Matrix sono le più performanti, in quanto presentano un ottimo tempo di salita e di assestamento, un lieve overshoot ed un bassissimo errore statico. In alternativa anche le valvole 3/2 della Matrix garantiscono ottime prestazioni, soprattutto l'elevata rapidità di risposta e l'elevata sovraelongazione per compensare eventuali disturbi esterni.

9 Risultati sperimentali del banco completo

In questo capitolo si discutono le prove sperimentali sul controllo della posizione e dell'angolo eseguite sul banco di prova. Ciascun test è stato eseguito facendo partire il pendolo da una posizione di 150mm per permettere una corsa sufficiente.

9.1 Architettura di controllo del sistema

L'architettura di controllo adottata prevede due anelli in cascata con regolatori PID come mostrato nello schema a blocchi in Figura 9.1. L'anello interno regola l'angolo di inclinazione del pendolo, mentre l'anello esterno la posizione del carrello. L'obiettivo è quello di mantenere il pendolo in posizione verticale e il carrello nella posizione di input desiderata x_{SET} . Per realizzare ciò, l'angolo θ_{SET} viene modificato, rispetto alla posizione verticale, nella direzione in cui si intende muovere il carrello. In questo modo è possibile mantenere il pendolo in equilibrio e al tempo stesso spostare il carrello nella posizione desiderata.

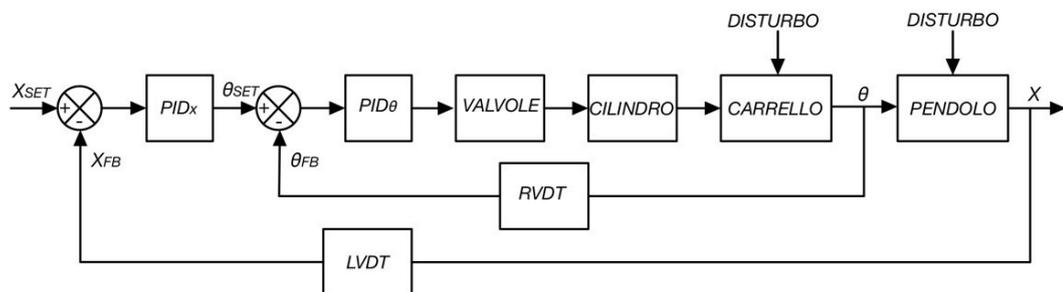


Figura 9.1 Schema a blocchi del banco di prova

L'obiettivo è minimizzare o ridurre a zero l'errore tra i segnali di set e i segnali di feedback. Il regolatore PID interno genera un segnale modulato ad ampiezza d'impulso per il pilotaggio delle valvole elettropneumatiche. In caso di errore positivo sull'angolo ($\theta_{SET} > \theta_{FB}$) il segnale PWM viene fornito alle valvole V_1 e V_3 per comandare il rientro del cilindro, nel caso in cui l'errore è negativo ($\theta_{SET} < \theta_{FB}$) vengono attivate le valvole V_2 e V_4 per comandare la fuoriuscita del cilindro.

In Figura 9.2 è riportata la logica di controllo implementata nel PLC per il controllo del sistema. L'input del controllore PID_x è la differenza tra la posizione attualmente occupata dal carrello e quello di set scelta dall'operatore. L'output del PID_x diventa, quindi, il setpoint della variabile θ . Nel caso in cui il carrello si trova nella posizione desiderata, il setpoint è zero. Quest'ultimo valore viene poi confrontato con il valore della posizione di feedback e la differenza è l'input del PID_θ . Il valore dell'output viene utilizzato per calcolare il duty cycle del PWM e si azionano le valvole dispari nel caso in cui u_θ sia maggiore di zero oppure le dispari se è minore.

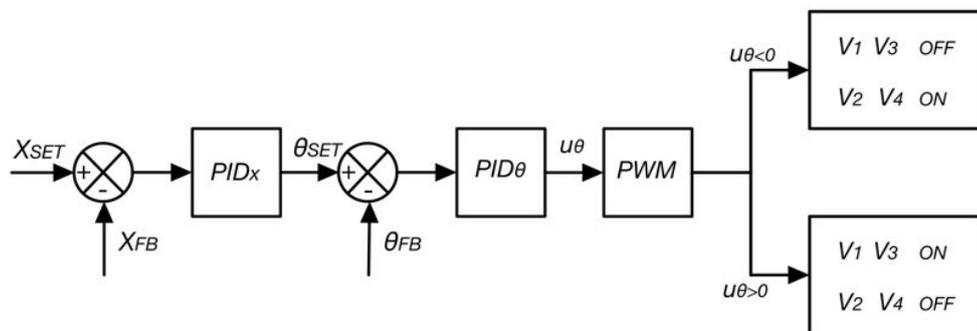


Figura 9.2 Logica di controllo

9.2 Tuning manuale del sistema

Effettuare un tuning manuale di un sistema instabile è un processo molto lungo. Nel caso in questione è stato scelto di effettuare la stabilizzazione del sistema azionato dalle valvole della Matrix 224, in quanto si sono dimostrate le migliori nel controllo della sola posizione. In prima battuta è stata fatta la stabilizzazione del controllo dell'angolo: ponendo a zero tutti i parametri del PID_x , si variano i coefficienti K_P , K_I , K_D del PID_θ . L'obiettivo è quello di ottenere un carrello che mantiene la posizione ed un pendolo stabile che risponde rapidamente a disturbi esterni. Inizialmente è stato effettuato un controllo proporzionale, aumentando il guadagno, poi è stato aumentato il derivativo ed infine l'integrativo. Nel Grafico 9.1 è riportato l'andamento del pendolo sottoposto al solo controllo angolare. Si può notare come il valore oscilla tra $\pm 2^\circ$, stabilizzazione accettabile.

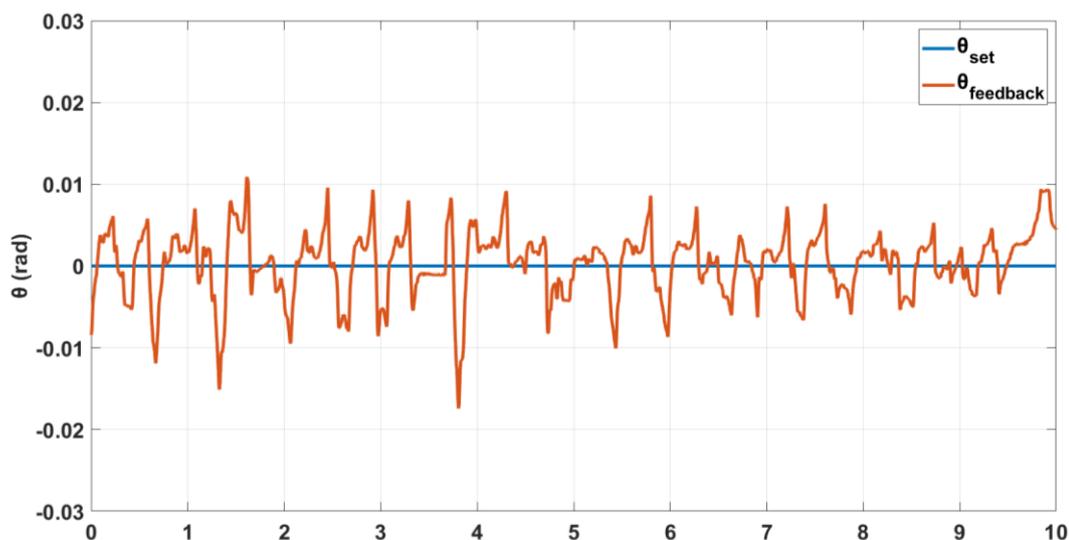


Grafico 9.1 Stabilizzazione del solo pendolo

A questo punto si esegue ancora un passaggio intermedio, mantenendo il processo di taratura dell'angolo sempre attivo, si fanno variare i parametri del regolatore PIDx in modo tale da ottenere un'oscillazione attorno alla posizione di set. Mantenere la taratura sempre attiva significa avere un pendolo idealmente stabile, questo ci permette di lavorare solo sui parametri del PIDx e intuirne il contributo di ciascuno. Nel Grafico 9.2 è riportato l'andamento della posizione del carrello ottimizzato con un pendolo idealmente stabile.

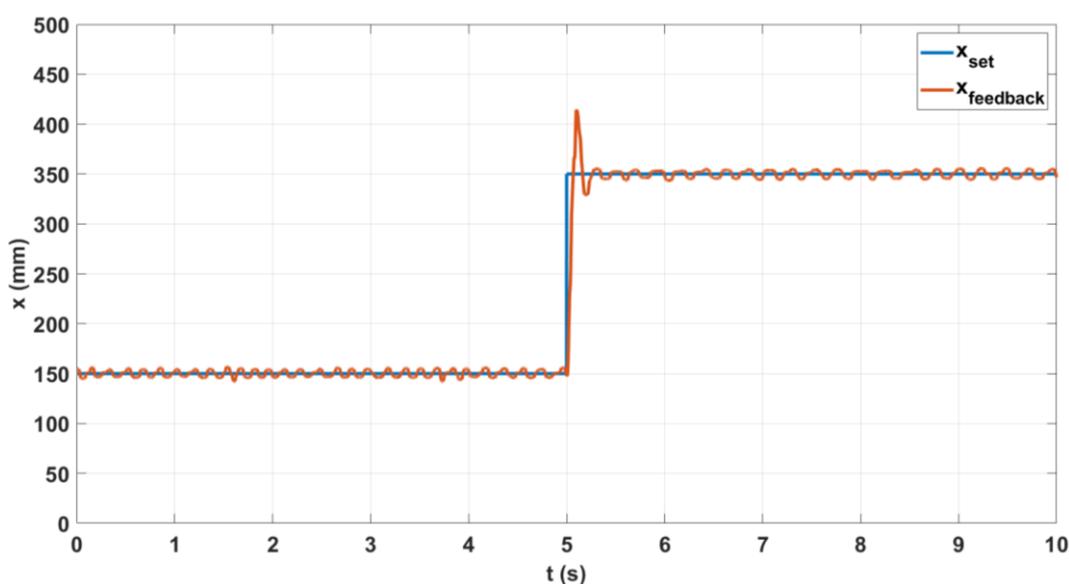


Grafico 9.2 Controllo posizione con un pendolo idealmente stabile

Infine si è disattivato il blocco per la taratura intervenendo su entrambi i regolatori contemporaneamente. I parametri del PID, però non si sono rivelati immediatamente buoni, infatti è stato necessario modificare i parametri per garantire una buona stabilizzazione. In Tabella 9.1 sono riportati i parametri utilizzati per eseguire le prove descritte nel paragrafo successivo.

Parametri PID utilizzati per le Matrix 224		
	PID _x	PID _θ
K_P	0.0016	17.0
T_I [s]	9.0	0.9
T_D [s]	0.006	0.0005

Tabella 9.1 Parametri dei PID utilizzati

9.3 Risultati delle prove sperimentali

Per studiare la stabilità del pendolo, sono state eseguite due prove differenti: la prima mantenendo il valore della posizione costante, il secondo fornendo un segnale a gradino di ampiezza pari a 200 mm . Entrambe le prove sono state eseguite con un pendolo lungo 550 mm ed una massa di 80 g .

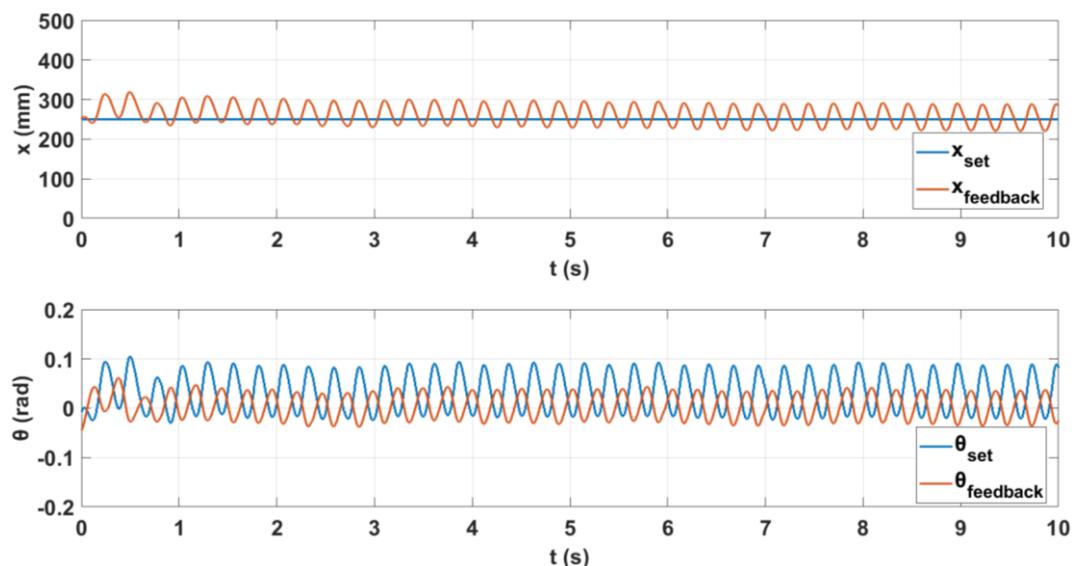


Figura 9.3 Risposta del sistema ad un segnale costante

In Figura 9.3 è riportata la risposta del sistema ad un segnale di posizione costante pari a 250 mm. Come si può notare le oscillazioni attorno alla valore di set sono minime, circa di 100 mm ma necessarie per mantenere il pendolo in posizione verticale. Per quanto riguarda l'angolo, invece, l'ampiezza del segnale di set è più ampia rispetto a quella di feedback, inoltre è leggermente in anticipo.

La risposta al segnale a gradino, invece, è stata effettuata partendo da una posizione di 150 mm. Ciò è dovuto al fatto che carrello necessita di un minimo di spazio per oscillare per mantenere il pendolo in verticale. In Figura 9.4 è riportata la risposta del sistema, si può notare si verifica la sottoelongazione necessaria per spostare il pendolo nel verso dello spostamento. Il tempo di salita è di 1.3 s e la sovralongazione è del 14,3%

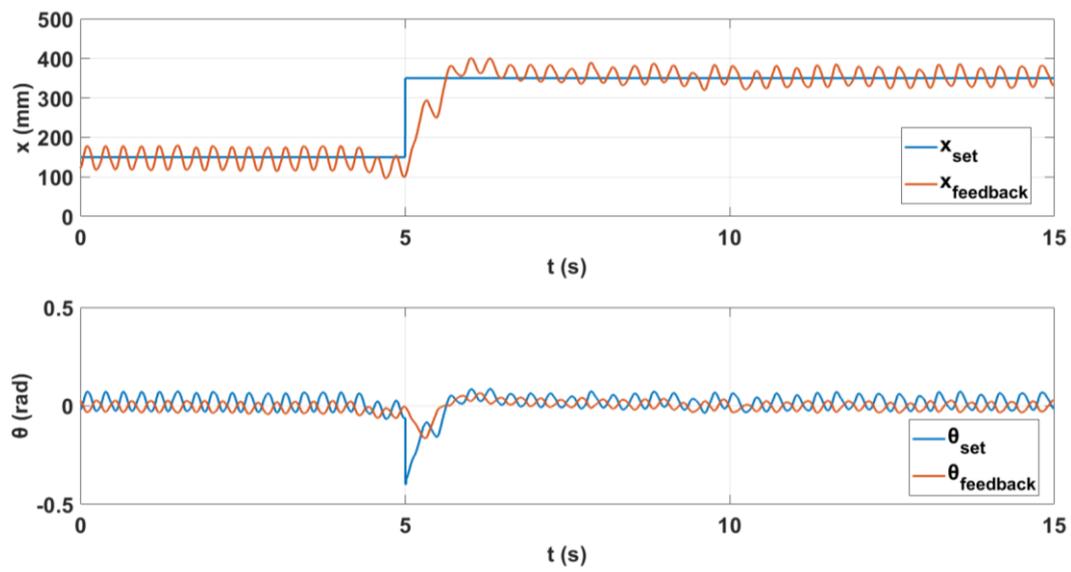


Figura 9.4 Risposta della sistema ad un segnale a gradino

Per quanto riguarda la risposta dell'angolo, invece, si può notare come, nel momento in cui si cambia il valore di X_{SET} , θ_{SET} raggiunge il valore di minimo. L'ampiezza delle oscillazioni è circa la stessa della prova con un comando costante.

10 Conclusioni e prospettive di sviluppo

A conclusione di questo elaborato di tesi è possibile effettuare un confronto tra il modello realizzato su Amesim e quello ottenuto sperimentalmente. In Figura 10.1 sono riportate le risposte per il sistema reale (x_{feedback}) e quello simulato (x_{amesim}). La risposta del sistema reale presenta un maggior numero di oscillazioni, mentre quello simulato present oscillazioni più ampie ma ridotte in numero. Nella fase iniziale, inoltre, il sistema simulato differisce molto da quello reale in quanto si ipotizza, nel sistema simulato, che il pendolo possa rimanere in equilibrio quando il carrello è fermo nelle condizioni iniziali. Questo comporta una sottoelongazione maggiore per far iniziare l'oscillazione del pendolo.

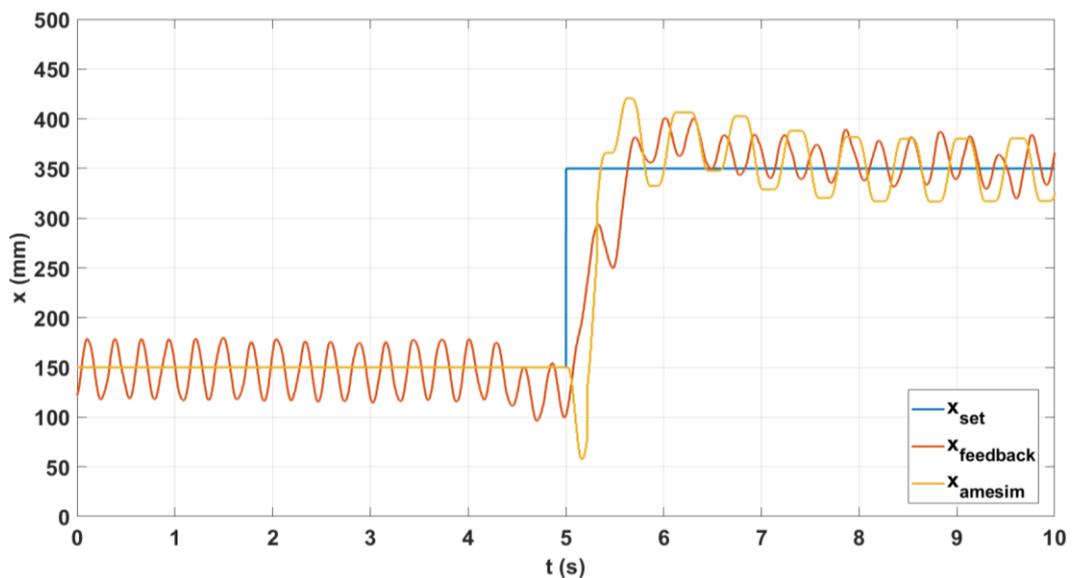


Figura 10.1 Confronto del sistema reale e di quello simulato (posizione)

Quanto detto trova conferma anche nell'andamento dell'angolo riportato in Figura 10.2. Come si può notare, infatti, le oscillazioni dell'angolo sono più ampie rispetto a quelle del sistema reale, tuttavia oscillazioni così ampie sarebbero difficili da compensare con il pendolo.

Possiamo, quindi, affermare come il modello sviluppato sia in linea con la realtà, anche se i controllori implementati differiscono.

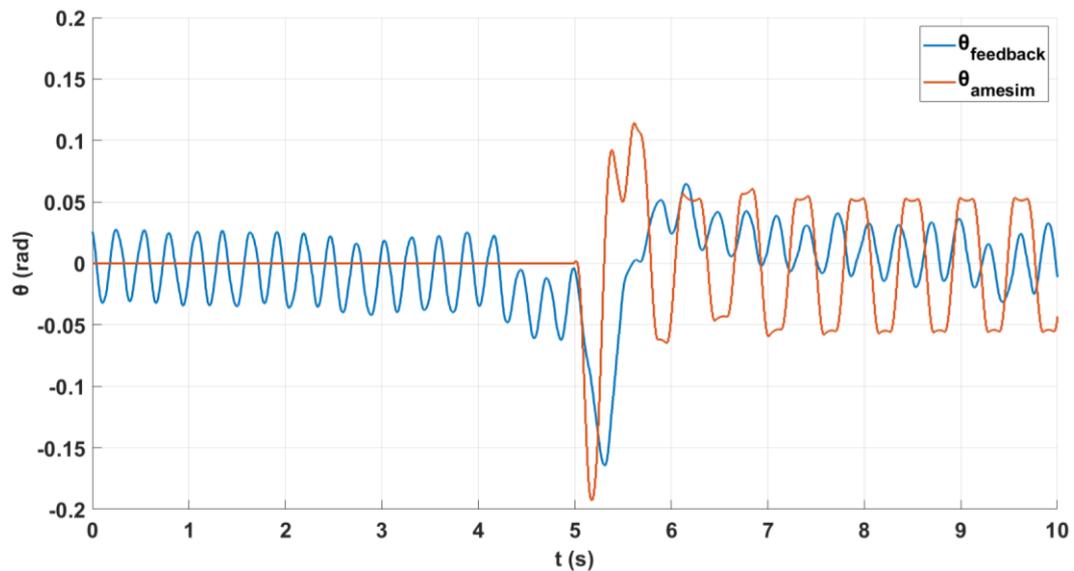


Figura 10.2 Confronto del sistema reale e quello simulato (angolo)

Nella presente sezione si ipotizzano alcune idee per un futuro sviluppo dell'attività.

Per quanto riguarda la configurazione hardware è possibile trovare una configurazione stabile e fissa dell'HMI affinché possa essere utilizzato comodamente anche durante le prove.

Successivamente, è necessario effettuare la stabilizzazione del sistema anche nelle altre configurazioni (valvole Matrix 2KK e 3KK) ed affinare quella con le valvole della Matrix 224. In questo modo è possibile fare un confronto diretto tra le valvole del banco di prova. Inoltre si potrebbe implementare un input diverso oltre al segnale a gradino, come ad esempio un input sinusoidale o ad onda quadra.

È necessario, inoltre, implementare un modello Amesim più completo. Agendo inizialmente sulle valvole, tenendo conto della conduttanza, rapporto critico e banda passante. Inoltre, è possibile implementare un comando PWM per simulare le valvole digitali anche su Amesim. Avere un modello quanto più simile a quello reale permette di effettuare un tuning del sistema reale più rapido.

Uno studio interessante, infine, potrebbe essere quello di non utilizzare un controllore PID, ma passare a funzioni più complesse per ottenere prestazioni migliori da parte del sistema controllato.

Indice delle figure

Figura 2.1 Messa in tavola dell'asta	5
Figura 2.2 Asta del pendolo	5
Figura 2.3 Gruppo carrello	6
Figura 2.4 Assieme pendolo e carrello	6
Figura 2.5 Cilindro pneumatico Camozzi	7
Figura 2.6 Valvola 2/2 Camozzi con relativo simbolo ISO	8
Figura 2.7 Configurazione valvole Matrix	8
Figura 2.8 Valvola Matrix MX720 3/2	9
Figura 2.9 Schema valvola Matrix 820 2/2	10
Figura 2.10 Driver Speed Up	11
Figura 2.11 Driver Camozzi della Serie 130-222	12
Figura 2.12 Trasduttore angolare Penny Giles	12
Figura 2.13 Trasduttore lineare LVDT	13
Figura 2.14 PLC S7 -1200 con due moduli OUT/IN analogici	14
Figura 2.15 Pannello HMI Comfort TP700	15
Figura 2.16 Schema sinottico del banco di prova	16
Figura 2.17 Schema del circuito pneumatico	17
Figura 2.18 Schema del sistema meccanico	18
Figura 2.19 Modello del sistema meccanico realizzato sul software <i>GIM</i> ® ..	19
Figura 3.1 Banco di prova allo stadio iniziale	20
Figura 3.2 Componentistica riutilizzabile del banco di prova	21
Figura 3.3 Banco prova stadio 3	22
Figura 3.4 Banco di prova con valvole della Matrix	22
Figura 3.5 Taratura del trasduttore angolare	23
Figura 3.6 HMI sul banco di prova	23
Figura 3.7 Switch LAN Ethernet	24
Figura 3.8 Configurazione finale del banco di prova	24
Figura 3.9 Pulsanti fisici del PLC	25
Figura 4.1 Andamento della variabile di controllo con tecnica PWM [16] ...	26

Figura 4.2 Valor medio della variabile dopo l'intergazione in funzione del DC [16].....	27
Figura 4.3 Procedura modulazione PWM [14]	27
Figura 4.4 Flusso logico della modulazione PWM [14]	28
Figura 4.5 Risposta di un sistema ad un gradino [14].....	28
Figura 4.6 Comando PWM in caso di full behavior [14].....	29
Figura 4.7 Comando PWM in caso di partial behavior [14]	29
Figura 4.8 PWM non lineare [14]	30
Figura 4.9 Andamento del dc in assenza dell'intervallo di regolazione.....	31
Figura 4.10 Andamento del dc con un intervallo di regolazione pari a 50mm	31
Figura 4.11 Generatore di impulsi della CPU 1214C DC/DC/DC	32
Figura 4.12 Parametrizzazione del generatore di impulsi.....	32
Figura 4.13 Uscite hardware del generatore di impulsi	33
Figura 4.14 Indirizzi I/O del generatore di impulsi.....	33
Figura 4.15 Codice Ladder per l'utilizzo del blocco CTRL_PWM	34
Figura 4.16 Schema a blocchi di controllore PID	35
Figura 4.17 Azione proporzionale, derivativa e integrativa [16].....	36
Figura 4.18 Schema di un sistema con saturazione sull'uscita del regolatore [16]	38
Figura 4.19 Andamento nel tempo dell'errore, del controllo calcolato e del controllo effettivo [16]	38
Figura 4.20 Schema di controllo classico divisibile in due processi.....	39
Figura 4.21 Schema di un controllore PID in cascata.....	39
Figura 4.22 Schema a blocchi del PID_Compact	40
Figura 4.23 Blocco PID_Compact su TIA Portal	41
Figura 4.24 Impostazioni di base del blocco PID_Compact.....	41
Figura 4.25 Limiti del valore istantaneo PID_Compact	42
Figura 4.26 Scala del valore istantaneo dell'Input_PER	43
Figura 4.27 Controllo del valore istantaneo del PID.....	43
Figura 4.28 Limitazione PWM del PID	44
Figura 4.29 Limiti del valore di uscita	44
Figura 4.30 Parametri PID del PID_Compact.....	45

Figura 4.31 Blocco dati del PID compact	46
Figura 5.1 Segmento 1: attivazione del PID per il controllo posizione	49
Figura 5.2 Segmento 2: determinazione del valore di x_{SET}	49
Figura 5.3 Segmento 3: importare valore di x_{set} e di $x_{feedback}$	49
Figura 5.4 Segmento 4: PID Compact X	50
Figura 5.5 Segmento 5: attivazione merker delle valvole e InvertControl	51
Figura 5.6 Segmento 6: azionamento delle uscite delle valvole dispari	51
Figura 5.7 Segmento 6: azionamento delle uscite digitali delle valvole	52
Figura 5.8 Segmento 7: chiusura del PID di posizione	52
Figura 5.9 Segmento 1: attivazione del PID completo	53
Figura 5.10 Segmento 2: scelta del valore di x_{set} tramite pulsante	53
Figura 5.11 Segmento 4: spostamento della variabile $\theta_{feedback}$	53
Figura 5.12 Segmento 5: PID di posizione e PID angolare	55
Figura 5.13 Segmento 6: attivazione dei merker per il CTRL_PWM	55
Figura 5.14 Segmento 7: calcolo del duty cycle per le valvole dispari	56
Figura 5.15 Segmento 8: calcolo del duty cycle per le valvole pari	56
Figura 5.16 Segmento 9: comando valvole Matrix 224	56
Figura 5.17 Segmento 10: comando valvole Camozzi	57
Figura 5.18 Segmento 11: ripristino del termine integrale	57
Figura 5.19 Segmento 10: merker chiusura PID Completo	57
Figura 5.20 Segmento 1: importare i dati acquisiti	58
Figura 5.21 Segmento 2: calcolo dell'errore	58
Figura 5.22 Segmento 3: calcolo del duty cycle	59
Figura 5.23 Segmento 4: calcolo del duty cycle	59
Figura 5.24 Segmento 5: comando valvole dispari	59
Figura 5.25 Segmento 6: comando valvole pari	60
Figura 5.26 Segmento 7: azionamento valvole della Camozzi	60
Figura 5.27 Segmento 8: azionamento valvole Matrix 224	61
Figura 5.28 Segmento 1: acquisizione segnale trasduttore di posizione	62
Figura 5.29 Segmento 2: taratura dell'angolo zero	63
Figura 5.30 Segmento 3: acquisizione segnale trasduttore angolare	63
Figura 5.31 Segmento 2: inserimento automatico dei parametri del PID	64

Figura 5.32 Segmento 1: spostamento a sinistra del carrello.....	65
Figura 5.33 Segmento 2: spostamento a destra del carrello.....	65
Figura 6.1 HMI: pagina base.....	69
Figura 6.2 HMI: pagina delle istruzioni.....	70
Figura 6.3 HMI: pagina scelta delle valvole.....	71
Figura 6.4 HMI: avviso scelta delle valvole errata.....	71
Figura 6.5 HMI: schermata per la scelta del metodo di controllo.....	72
Figura 6.6 Pagina di visualizzazione ed azionamento.....	73
Figura 6.7 Pagina di visualizzazione in funzione.....	74
Figura 6.8 Ladder per l'inserimento del timer sull'HMI.....	74
Figura 6.9 HMI:pagina per la visualizzazione di x_{set} e $x_{feedback}$	75
Figura 6.10 HMI:pagina per la visualizzazione di θ_{set} e $\theta_{feedback}$	76
Figura 6.11 HMI: pagina per il controllo manuale.....	76
Figura 7.1 Componenti della libreria dei segnali utilizzati.....	79
Figura 7.2 Componenti pneumatici presenti nel circuito.....	80
Figura 7.3 Componenti della libreria "Pneumatic Component Design".....	81
Figura 7.4 Componenti della meccanica 1D utilizzati nel circuito.....	81
Figura 7.5 Componenti della meccanica 2D utilizzati nel circuito.....	82
Figura 7.6 Modello del banco in controllo posizione realizzato su <i>Amesim</i> ®	83
Figura 7.7 Componente PID Tuning su <i>Amesim</i> ®.....	87
Figura 7.8 Modello completo con controllo posizione e angolo.....	90
Figura 8.1 Risposta ad un segnale a gradino.....	93
Figura 9.1 Schema a blocchi del banco di prova.....	108
Figura 9.2 Logica di controllo.....	109
Figura 9.3 Risposta del sistema ad un segnale costante.....	111
Figura 9.4 Risposta della sistema ad un segnale a gradino.....	112
Figura 10.1 Confronto del sistema reale e di quello simulato (posizione)....	113
Figura 10.2 Confronto del sistema reale e quello simulato (angolo).....	114

Indice dei grafici

Grafico 7.1 Risposta del modello ad un segnale a gradino al variare di K_P	84
Grafico 7.2 Errore della risposta al variare di K_P	85
Grafico 7.3 Risposta del modello ad un segnale a gradino al variare di K_I	85
Grafico 7.4 Errore della risposta al variare di K_I	86
Grafico 7.5 Risposta del modello ad un segnale a gradino al variare di K_D ...	86
Grafico 7.6 Errore della risposta al variare di K_D	87
Grafico 7.7 Risposta del sistema al variare del PID utilizzato.....	88
Grafico 7.8 Errore del sistema al variare del PID utilizzato.....	89
Grafico 7.9 Risposta in controllo traslazione ad un segnale a gradino.....	91
Grafico 7.10 Risposta in controllo rotazione ad un segnale a gradino.....	91
Grafico 8.1 Risposta a gradino - Matrix 224 - Frequenza 20 Hz.....	94
Grafico 8.2 Risposta a gradino - Matrix 224 - Frequenza 10 Hz.....	94
Grafico 8.3 Risposta a gradino - Matrix 224 - Frequenza 6,67 Hz.....	95
Grafico 8.4 Risposta a gradino - Matrix 224 - Frequenza 5 Hz.....	95
Grafico 8.5 Risposta a gradino - Camozzi - Frequenza 20 Hz.....	96
Grafico 8.6 Risposta a gradino - Camozzi - Frequenza 10 Hz.....	97
Grafico 8.7 Risposta a gradino - Camozzi - Frequenza 6,67 Hz.....	97
Grafico 8.8 Risposta a gradino - Camozzi - Frequenza 5 Hz.....	98
Grafico 8.9 Confronto valvole Matrix 224 e Camozzi con CTRL_PWM.....	99
Grafico 8.10 Tuning con metodo Ziegler Nichols con $K_P = 1.45$	100
Grafico 8.11 Tuning con il metodo Ziegler Nichols con Matrix 224.....	101
Grafico 8.12 Controllo posizione al variare di K_P	102
Grafico 8.13 Controllo posizione al variare di K_I con $K_P=1.2$	102
Grafico 8.14 Controllo posizione al variare di K_D con $K_P=1.2$ e $K_I=0.4\text{ s}^{-1}$.	103
Grafico 8.15 Confronto tuning manuale e metodo di Ziegler Nichols.....	104
Grafico 8.16 Risposta del sistema con le Camozzi.....	105
Grafico 8.17 Risposta del sistema con le Matrix 2KK.....	106
Grafico 8.18 Risposta del sistema con le Matrix 3KK.....	106
Grafico 8.19 Risposta del sistema con le Matrix 244.....	107

Grafico 9.1 Stabilizzazione del solo pendolo.....	110
Grafico 9.2 Controllo posizione con un pendolo idealmente stabile	110

Indice delle tabelle

Tabella 2.1 Caratteristiche del cilindro	7
Tabella 2.2 Caratteristiche valvola MX720	9
Tabella 2.3 Caratteristiche valvole 820.....	10
Tabella 2.4 Caratteristiche tecniche driver Camozzi	12
Tabella 2.5 Caratteristiche tecniche PLC S7-1200	14
Tabella 2.6 Caratteristiche tecniche HMI	15
Tabella 5.1 Caratteristiche PID Compact.....	50
Tabella 5.2 Caratteristiche PIDX	54
Tabella 5.3 Caratteristiche PID θ	54
Tabella 5.4 Variabili del blocco dati "Dati input"	66
Tabella 5.5 Variabili del blocco dati "PID"	67
Tabella 5.6 Variabili del blocco dati "PWM"	68
Tabella 7.1 Valori utilizzati nei due PID	88
Tabella 7.2 Parametri del PID di traslazione e di rotazione.....	90
Tabella 8.1 Parametri caratterizzanti la risposta con le Matrix 224.....	96
Tabella 8.2 Parametri caratterizzanti la risposta con le Camozzi	98
Tabella 8.3 Parametri del PID con metodo Ziegler Nichols	99
Tabella 8.4 Parametri per il confronto metodi di tuning.....	104
Tabella 8.5 Parametri caratterizzanti la risposta al variare delle valvole.....	107
Tabella 9.1 Parametri dei PID utilizzati	111

Bibliografia

- [1] Beater, P. (2007). *Pneumatic Drivers*. Soest: Springer.
- [2] Belforte, G. (2005). *Manuale di Pneumatica II edizione*. Milano: Tecniche nuove S.p.A.
- [3] Bolton, W. (2015). *Programmable Logic Controllers*. Oxford: Elsevier.
- [4] Calignano, F. (2020). *Slide del corso Sistemi Integrati di Produzione*. Torino.
- [5] Goodwin, G. C., Graebe, S. F., & Salgado, M. E. (2000). *Control System Design*. Valparaisio: Pearson Education.
- [6] ISO 1219-1. (2012). *Fluid power systems and components - Graphical symbols and circuit diagrams*.
- [7] Krupke, & Wang. (2015). *Modelling and robust control of an inverted pendulum driven by a pneumatic cylinder*.
- [8] Petric, Josko, & Situm. (2003). *Inverted Pendulum Driven by Pneumatics*. TEMPUS Publications.
- [9] Piraglia, G. (2015). *Programmare con i nuovi PLC S7-1200 e S7-1500*. Milano: Ulrico Hoepli Editore S.p.A.
- [10] Piraglia, G. (2018). *Programmazione avanzata con PLC S7-1200/1500, HMI, I/O analogici e orologio HW*. Milano: Ulrico Hoepli Editore S.p.A.
- [11] Pontin, M. (2018). *Modellazione, realizzazione e controllo mediante PLC di un sistema a pendolo inverso ad attuazione pneumatica*. Torino.
- [12] Siemens. (2021). *Simcenter Amesim Help*. Tratto da <https://www.plm.automation.siemens.com/>
- [13] Siemens. (2021). *TIA Portal - Tutorial Center*. Tratto da <https://cache.industry.siemens.com>
- [14] Sorli, M. (2020). *Slide del corso di Meccatronica*. Torino.

- [15] Sorli, M., & Quaglia, G. (1996). *Applicazioni di mecatronica*. Torino: CLUT.
- [16] Viktorov, V., & Colombo, F. (2016). *Automazione dei sistemi meccanici, IV edizione*. Torino: CLUT.
- [17] Zilic, Tihomir, & Pavkovic. (2009). *Modelling and control of a pneumatically actuated inverted pendulum*. Elsevier.

Appendice 1

In questa appendice vengono riportate le schede tecniche dei componenti incontrati e discussi all'interno dell'elaborato di tesi.

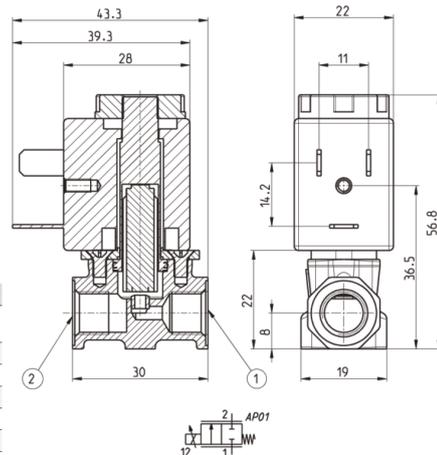
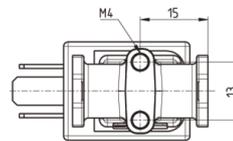
Appendice 1-A

Valvole proporzionali della serie AP – 22 mm dell'azienda Camozzi

Valvole proporzionali Serie AP - 22 mm, corpo con attacchi filettati



Per funzionamento con il vuoto collegare la linea alla connessione 2.



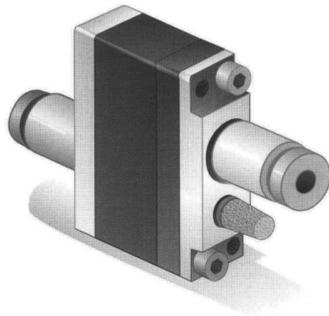
Mod.	Conn. 1	Conn. 2	Funzione	Orifizio Ø (mm)	kv (l/min)	Pressione max (bar)	Portata max (Nl/min)
AP-7211-FR2-U7°	G1/8	G1/8	2/2 NC	1	0.5	10	75
AP-7211-HR2-U7°	G1/8	G1/8	2/2 NC	1.2	0.7	8	85
AP-7211-LR2-U7°	G1/8	G1/8	2/2 NC	1.6	1.2	6	110
AP-7211-NR2-U7°	G1/8	G1/8	2/2 NC	2	1.7	5	135
AP-7211-QR2-U7°	G1/8	G1/8	2/2 NC	2.4	1.7	4	113
AP-7211-FW2-U7°OX2	G1/8	G1/8	2/2 NC	1	0.5	10	75
AP-7211-HW2-U7°OX2	G1/8	G1/8	2/2 NC	1.2	0.7	8	85
AP-7211-LW2-U7°OX2	G1/8	G1/8	2/2 NC	1.6	1.2	6	110
AP-7211-NW2-U7°OX2	G1/8	G1/8	2/2 NC	2	1.7	5	135
AP-7211-QW2-U7°OX2	G1/8	G1/8	2/2 NC	2.4	1.7	4	113

* scegliere la tensione desiderata

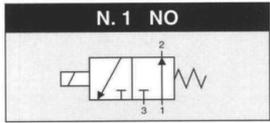
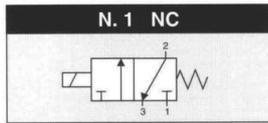
Appendice 1-B

Elettrovalvola digitale serie 720 dell'azienda Matrix S.p.A.

721 • 3/2 **NC** **NO**



CONTROL: **DIRECT**



GENERAL CHARACTERISTICS

FLUID	Non-lubricated dry air, neutral gases (-10 + 50°C)		
FILTRATION RATING	Min 40 micron		
TEMPERATURE	- 10 + 50°C (Standard version)		
RESPONSE TIME IN OPENING	12 / 24 < 7 ms	JJ < 5 ms	XX / KK < 2 ms
RESPONSE TIME IN CLOSING	12 / 24 < 3 ms	JJ < 2 ms	XX / KK < 2 ms
MAXIMUM FREQUENCY	100 Hz	200 Hz	300 Hz
WEIGHT	35 g		
PRODUCT LIFE EXPECTANCY	≥ 500 M/s cycles		
IP RATING	IP 62		

IDENTIFICATION CODE

	H	X	7	2	1	1	0	2	C	3	24
--	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------

• FLOW RATE (at 6 bar)

H	50 Nl / min
B	80 Nl / min
M	100 Nl / min (control tension [JJ] [XX] [KK])

• VERSION

	Body ported
H	Body ported - HNBR Shutters
F	Manifold
J	Manifold - HNBR Shutters

• No. ELECTRICAL CONTROLS

1	1 Control
----------	-----------

• PORT CONNECTION

0	Integrated cables IP 62 L = 500 mm
1	Integrated cables IP 62 L = 100 mm

• OUTLETS

1	1 Outlet
----------	----------

• FUNCTION

A	NO
C	NC

• TYPE

3	3/2
----------	-----

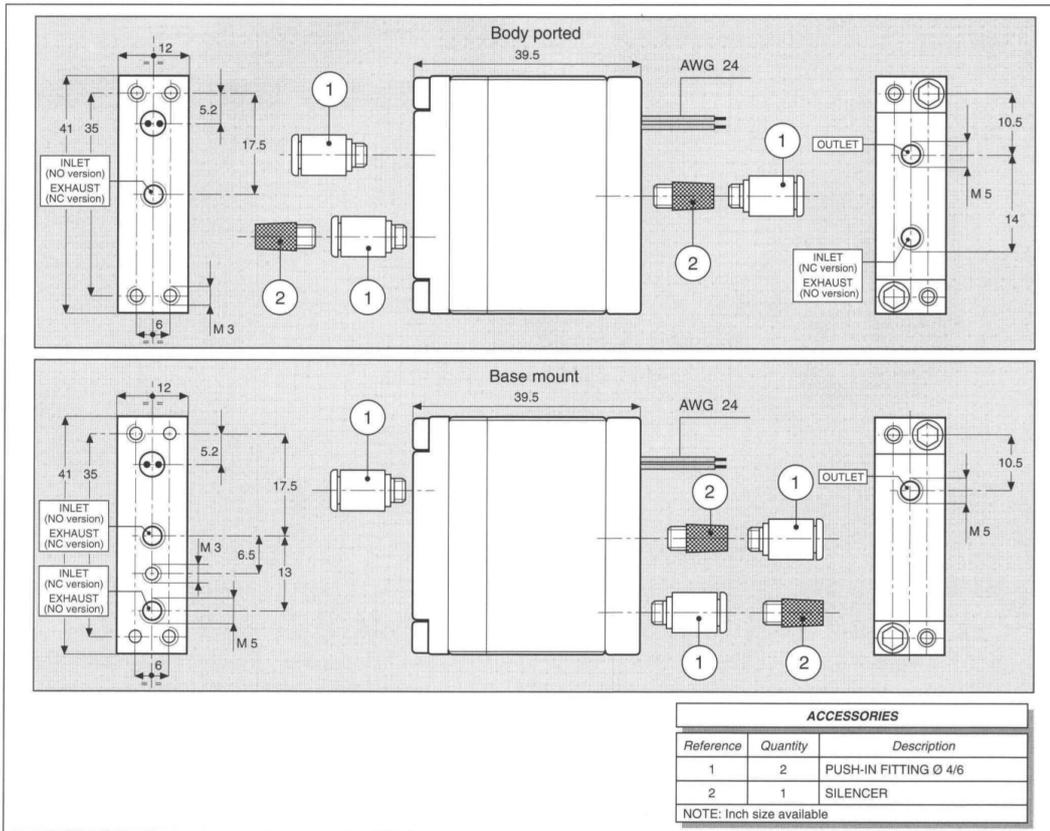
• CONTROL TENSION

12	12 VDC ± 10 %	ED 100 %	1.4 W
24	24 VDC ± 10 %	ED 100 %	1.2 W
JJ	24 VDC ± 10 %	ED 100 % ⁽¹⁾	1.9 W
XX	Speed-up in current	ED 100 % ⁽¹⁾	—
KK	Speed-up in tension	ED 100 % ⁽¹⁾	—

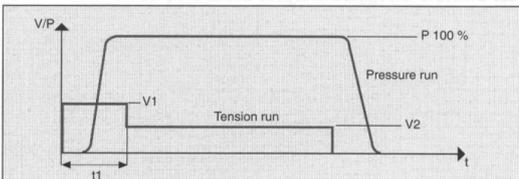
(1) Only with Electronic Driver Boards PRB or UDB

• OPERATING PRESSURE

	RANGE	MODELS
1	0 - 4 bar	All
2	4 - 8 bar	All
3	0 - 8 bar [XX] / [KK]
8	2 - 6 bar	All



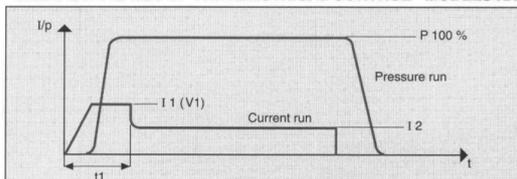
CHARACTERISTICS OF THE ELECTRICAL CONTROL - MODELS KK



N.B. KK MODELS ARE CONTROLLED IN TENSION

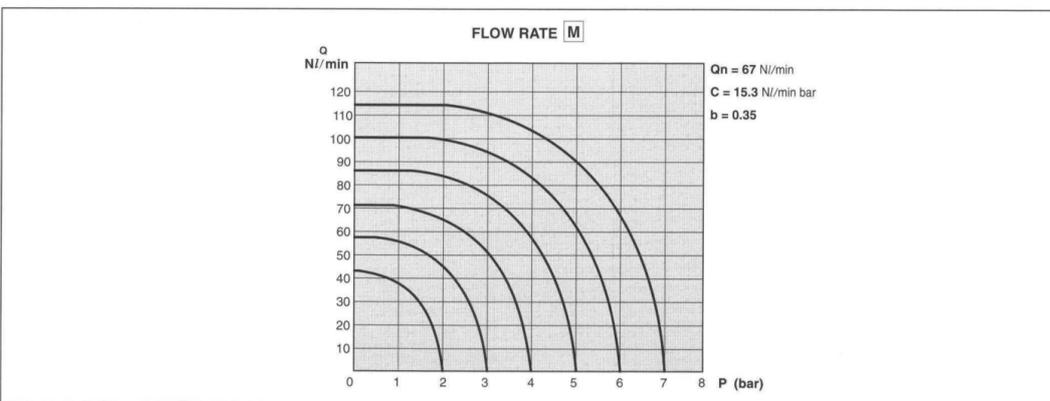
V1 = 24 VDC	t1 = 2 ms	V2 = 5 VDC
-------------	-----------	------------

CHARACTERISTICS OF THE ELECTRICAL CONTROL - MODELS XX



N.B. XX MODELS ARE CONTROLLED IN CURRENT

I1 = 0.7 A	t1 = 2 ms	I2 = 0.3 A
------------	-----------	------------

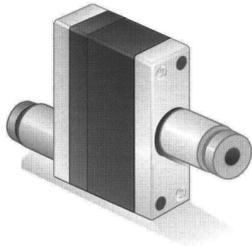


Appendice 1-C

Elettrovalvola digitale serie 820 dell'azienda Matrix S.p.A.

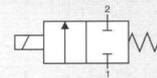
821 • 2/2

NC



CONTROL: DIRECT PFM PWM

N. 1 NC



GENERAL CHARACTERISTICS

FLUID	Non-lubricated dry air, neutral gases(-10 + 50°C)	
FILTRATION RATING	Min 40 micron	
TEMPERATURE	- 10 + 50°C (Standard version)	
RESPONSE TIME IN OPENING	24 < 5 ms	XX / KK < 1 ms
RESPONSE TIME IN CLOSING	24 < 2 ms	XX / KK < 1 ms
MAXIMUM FREQUENCY	200 Hz	500 Hz
WEIGHT	25 g	
PRODUCT LIFE EXPECTANCY	≥ 500 M/s cycles	
IP RATING	IP 62	

IDENTIFICATION CODE

	M	X	8	2	1	1	0	0	C	2	24
--	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

● **OUTLETS**

1	1 Outlet
---	----------

● **FLOW RATE** (at 6 bar)

M	100 NI/min
N	140 NI/min (control tension XX KK)
O	180 NI/min (control tension XX KK)

● **VERSION**

	Body ported
D	Manifold

● **No. ELECTRICAL CONTROLS**

1	1 Control
---	-----------

● **PORT CONNECTION**

0	Integrated cables IP 62 L = 500 mm
1	Integrated cables IP 62 L = 100 mm

● **FUNCTION**

C	NC
---	----

● **TYPE**

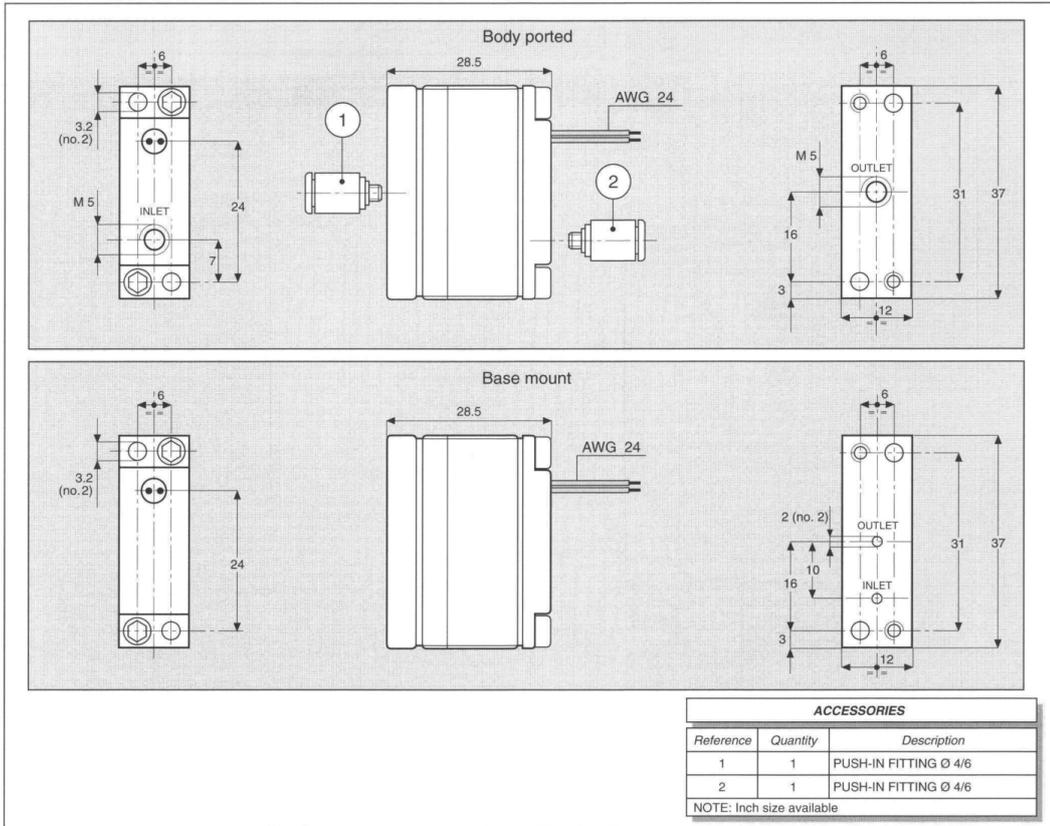
2	2/2
---	-----

● **CONTROL TENSION**

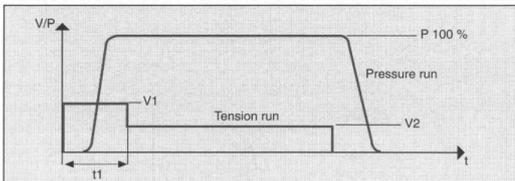
24	24 VDC ± 10 %	2.9 W
XX	Speed-up in current (24 VDC)	1.3 W
KK	Speed-up in tension (24 VDC)	0.8 W

● **OPERATING PRESSURE**

	RANGE	MODELS
0	2 - 8 bar	All
3	0 - 8 bar	M XX / KK
4	0 - 6 bar	All



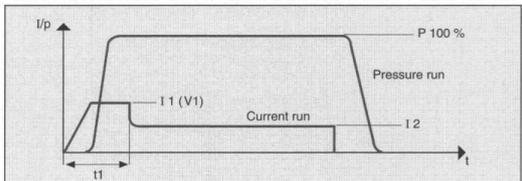
CHARACTERISTICS OF THE ELECTRICAL CONTROL - MODELS KK



N.B. KK MODELS ARE CONTROLLED IN TENSION

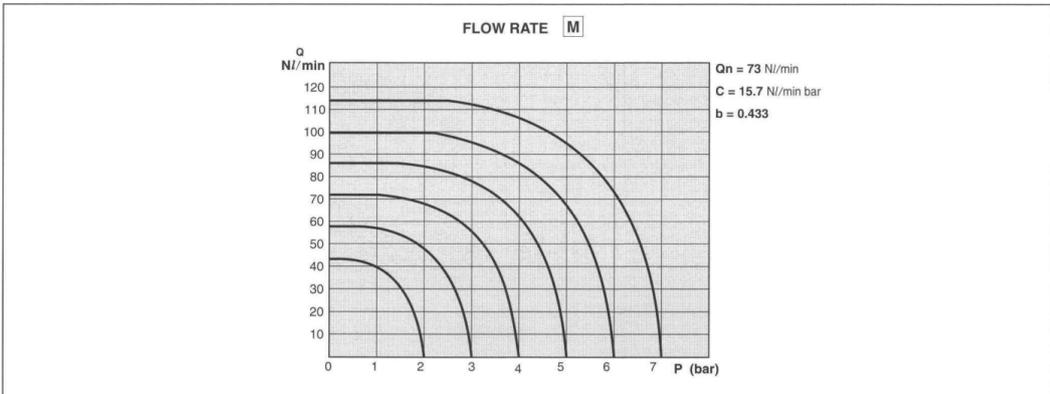
	V1 = 24 VDC	t1 = 2.0 ms	V2 = 5 VDC
M	V1 = 24 VDC	t1 = 2.0 ms	V2 = 5 VDC
N	V1 = 24 VDC	t1 = 2.0 ms	V2 = 5 VDC
O	V1 = 24 VDC	t1 = 2.5 ms	V2 = 5 VDC

CHARACTERISTICS OF THE ELECTRICAL CONTROL - MODELS XX



N.B. XX MODELS ARE CONTROLLED IN CURRENT

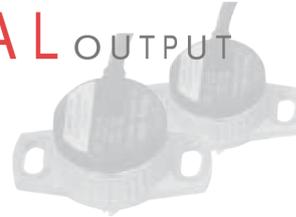
	I1 = 0.7 A	t1 = 2 ms	I2 = 0.3 A
M	I1 = 0.7 A	t1 = 2 ms	I2 = 0.3 A
N	I1 = 0.8 A	t1 = 2 ms	I2 = 0.3 A
O	I1 = 0.9 A	t1 = 2 ms	I2 = 0.3 A



Appendice 1-D

Trasduttore rotativo SRH280DP dell'azienda Penny Giles

SRH280DP DUAL OUTPUT contactless rotary sensor



PERFORMANCE

ELECTRICAL

Measurement range	°	20 to 360 in 1° increments
Supply voltage	Vdc	9 to 30 (unregulated) and 5 ±0.5 (regulated)
Over voltage protection	Vdc	Up to 40 (-40 to +60°C)
Maximum supply current	mA	<25
Reverse polarity protection		Yes
Short circuit protection		
Output to GND		Yes
Output to supply		In 5V regulated mode only
Power-on settlement time	S	<1
Resolution	%	0.025 of measurement range (12 bit)
Non-linearity*	%	<±0.4
Temperature coefficient	ppm/°C	<±30 in 5V supply mode; <±90 in 9-30V supply mode

* Non-linearity is measured using the least-squares method on a computerised calibration system

Analog Output (order code A1, A4) – see graph on page 31

Voltage output range		
9-30V supply	Vdc	Absolute voltage, 0.5 to 4.5 (A1) or 0.1 to 4.9 (A4) over measurement range (±3%)
5V supply	Vdc	Ratiometric output voltage - 10 to 90% (A1) or 2 to 98% (A4) of Vs over measurement range (±1%)
Monotonic range		
	Vdc	0.25 (5%) and 4.75 (95%) nominal (A1)
	Vdc	0.05 (1%) and 4.95 (99%) nominal (A4)
Load resistance	Ω	10k minimum (resistive to GND)
Output noise	mVrms	<1
Input/output delay	mS	<2

PWM Output (order code Pn) – see output characteristics on page 31

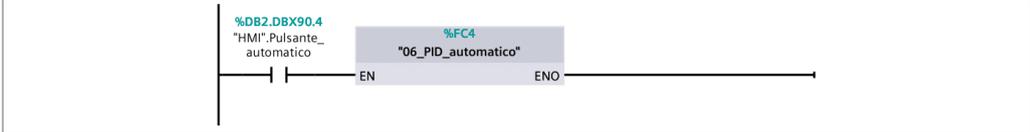
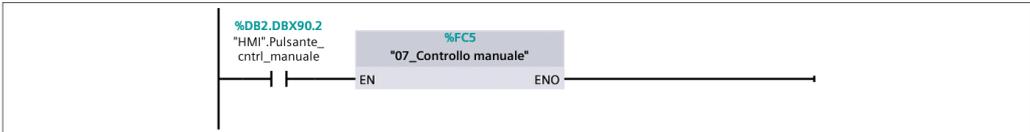
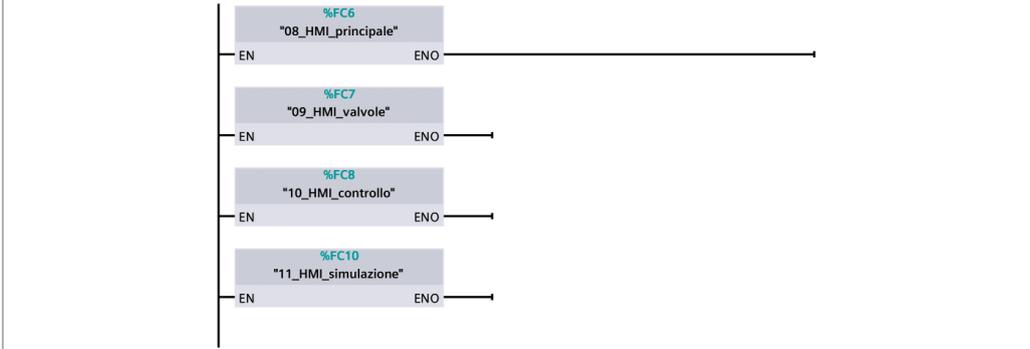
PWM frequency	Hz	244 (P1); 500 (P2); or 1000 (P3) ±20% over temperature range
PWM levels		
9-30V supply	Vdc	0 and 5 nominal (±3%)
5V supply	Vdc	0 and Vs (±1%)
Duty cycle	%	10 to 90 over measurement range
Monotonic range	%	5 and 95 nominal
Load resistance	Ω	10k minimum (resistive to GND)
Rise/fall time	µS	<15

MECHANICAL

Mechanical angle	°	360, continuous
Operating torque - maximum		
sealed shaft IP68	g-cm	120
unsealed shaft IP50	g-cm	100
Shaft velocity maximum	°/sec	3600
Weight	g	<35
Mounting		Use 2 x M4 socket head cap screws and M4 washer - maximum tightening torque 2Nm
Phasing		When shaft flat (or shaft ident mark) is facing toward the cable exit, output is at mid travel. The sensor housing allows for ±10° adjustment via the mounting flange slots.

Appendice 2

Totally Integrated Automation Portal					
00_Main [OB1]					
00_Main Proprietà					
Generale					
Nome	00_Main	Numero	1	Tipo	OB
Linguaggio	KOP	Numerazione	Automatico		
Informazioni					
Titolo	"Main Program Sweep (Cycle)"	Autore		Commento	In questo blocco sono riportate tutti i blocchi funzioni con relativi comandi per l'azionamento.
Famiglia		Versione	0.1	ID definito dall'utente	
Nome					
Tipo di dati					
Valore di default					
Commento					
▼ Input					
Initial_Call	Bool			Initial call of this OB	
Remanence	Bool			=True, if remanent data are available	
Temp					
Constant					
Segmento 1: Azionamento controllo CTRL_PWM					
Il controllo posizione può essere azionato o premendo gli appositi pulsanti sull'HMI o tramite il pulsante fisico legato all'input digitale IO.1. Il contatto "HMI.Luce" diventa ON dopo aver premuto il tasto "Start" sull'HMI.					
Segmento 2: PWM w/driver					
Per utilizzare i driver della camozzi e quindi le valvole con comando analogico è necessario abbassare il pulsante fisico sullo sportello del banco di prova e attivare dal PC il merker M0.2 presente sul seguente segmento.					
Segmento 3: Acquisizione dati					
In questo segmento viene riportato il blocco funzione per l'acquisizione dei dati					

Totally Integrated Automation Portal		
Segmento 4: Blocco PID automatico		
In questo segmento si attiva il blocco funzione per l'inserimento automatico dei parametri del PID. Per attivarlo è necessario premere l'apposito pulsante sull'HMI		
		
Segmento 5: Blocco controllo manuale		
In questo segmento si attiva il blocco funzione per il controllo manuale del carrello. Per attivarlo è necessario premere l'apposito pulsante sull'HMI		
		
Segmento 6: Blocchi funzione HMI		
In questo segmento vengono riportati tutti i blocchi funzione per il funzionamento dell'HMI		
		

01_PID_COMP [OB31]

01_PID_COMP Proprietà

Generale

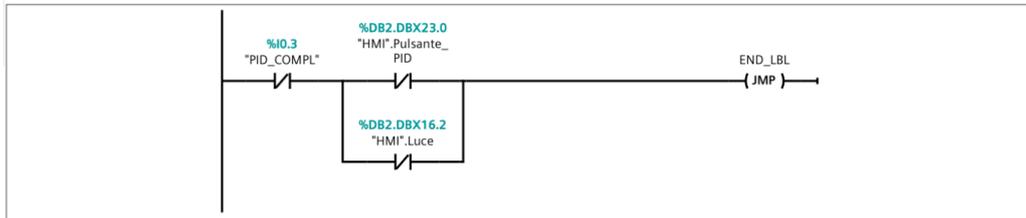
Nome	01_PID_COMP	Numero	31	Tipo	OB
Linguaggio	KOP	Numerazione	Manuale		

Informazioni

Titolo	PID per il controllo completo del banco di prova	Autore		Commento	Il seguente blocco funzionale viene utilizzato per effettuare un controllo completo sul banco di prova
Famiglia		Versione	0.1	ID definito dall'utente	

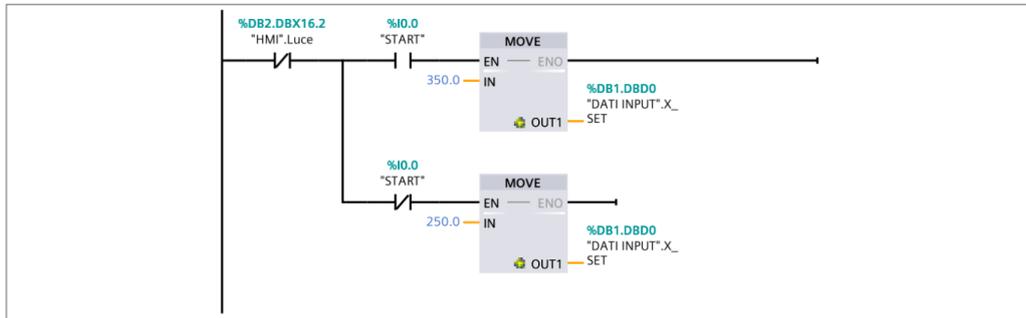
Segmento 1: Controllo dei consensi

Per utilizzare il blocco PID per il controllo completo si deve azionare il quarto pulsante sul PLC oppure gli appositi pulsanti sull'HMI



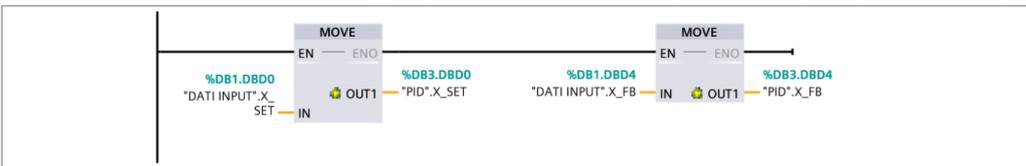
Segmento 2: Cambio X set

Il seguente segmento permette di cambiare il valore di x set utilizzando il primo pulsante sull'HMI



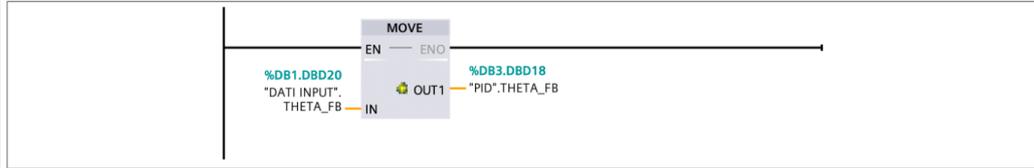
Segmento 3: Importa dati posizione

Importa i valori di xset e xfb nel blocco dati pid



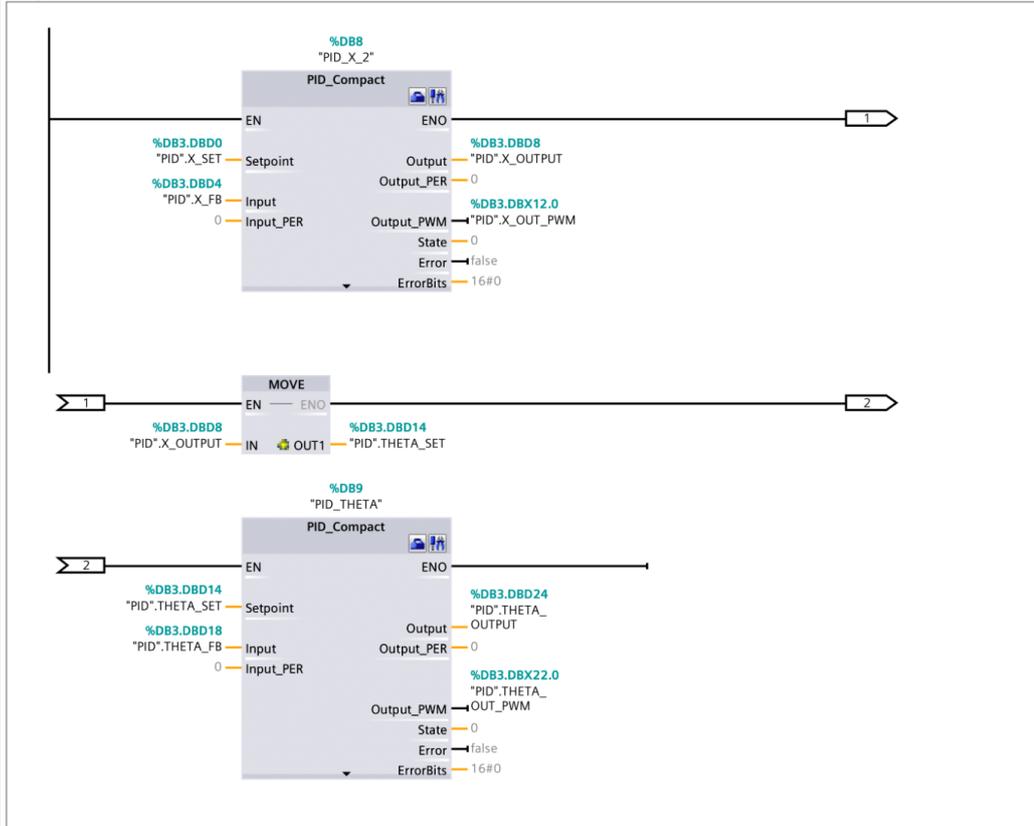
Segmento 4: Importa dati angolo

Importa il valore di theta_fb nel blocco dati pid

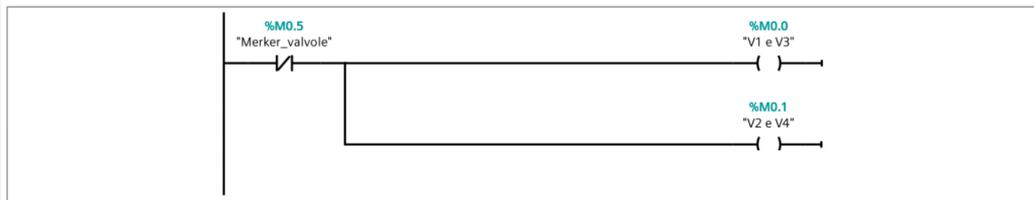


Segmento 5: PID a cascata

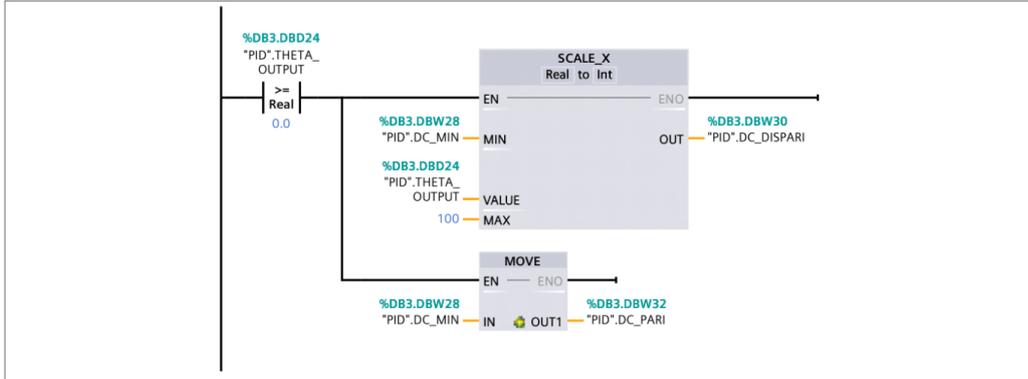
Inserimento dei due blocchi PID intermezzati da un blocco MOVE



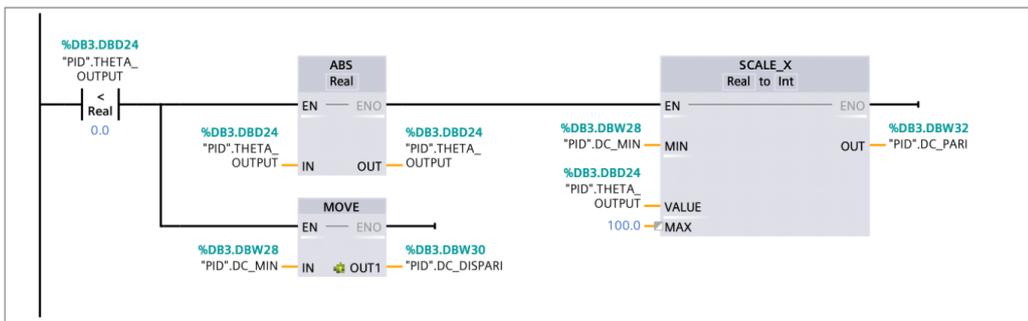
Segmento 6: Attivazioni merker valvole



Segmento 7: Comando alle valvole se thetaPID>0

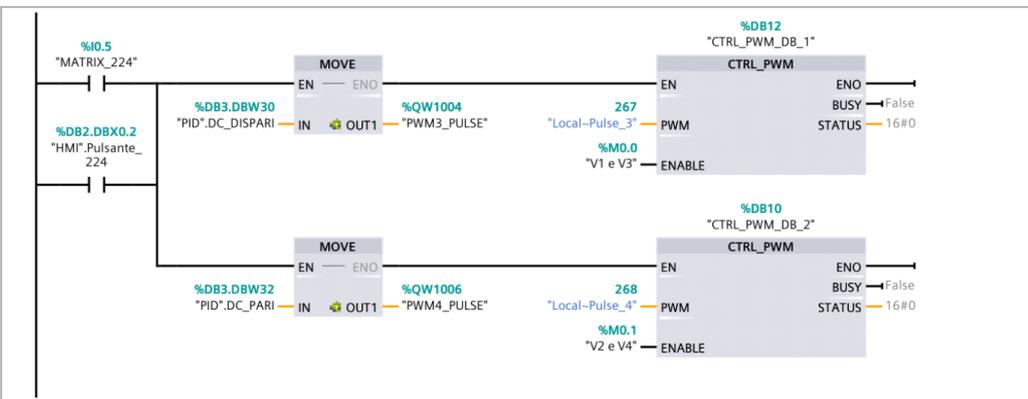


Segmento 8: Comando alle valvole se ThetaPID<0



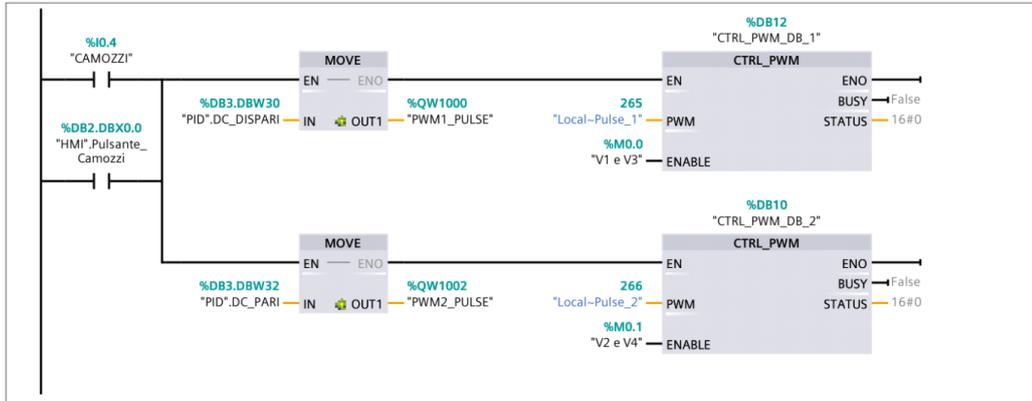
Segmento 9: Azionamento valvole Matrix 224

Questo segmento si attiva quando sono state scelte le valvole Matrix 224, il relè si attivano o tramite l'utilizzo dei pulsanti o tramite la scelta su HMI.

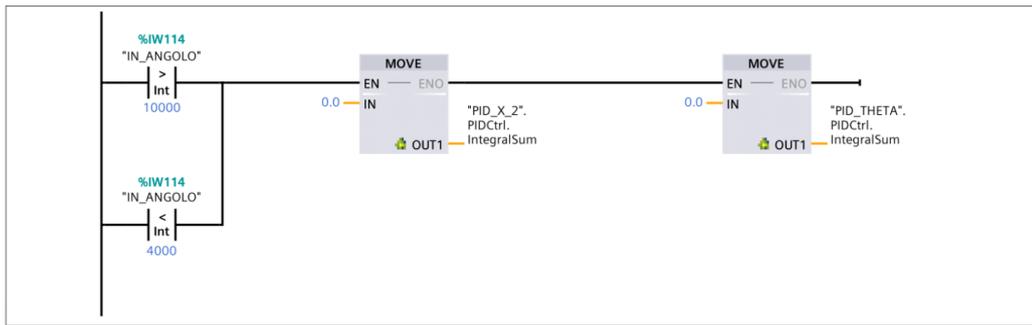


Segmento 10: Azionamento valvole della Camozzi

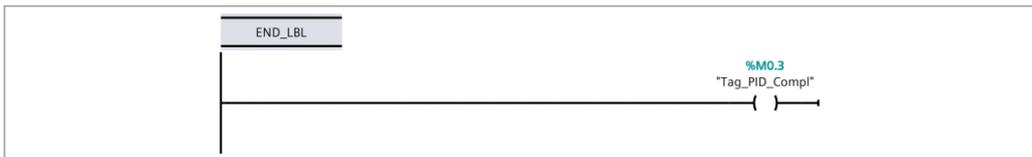
Questo segmento si attiva quando sono state scelte le valvole della Camozzi, il relè si attivano o tramite l'utilizzo dei pulsanti o tramite la scelta su HMI.



Segmento 11: Ripristino errore integrale



Segmento 12:



02_PID_X [OB32]

02_PID_X Proprietà

Generale

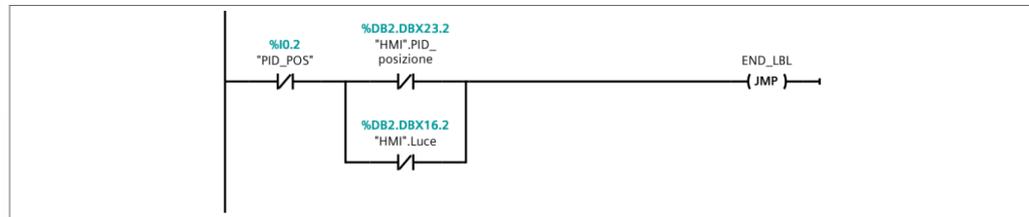
Nome	O2_PID_X	Numero	32	Tipo	OB
Linguaggio	KOP	Numerazione	Automatico		

Informazioni

Titolo	Controllo posizione mediante blocco PID	Autore		Commento	Il seguente blocco viene utilizzato per effettuare il controllo posizione mediante il controllore PID
Famiglia		Versione	0.1	ID definito dall'utente	

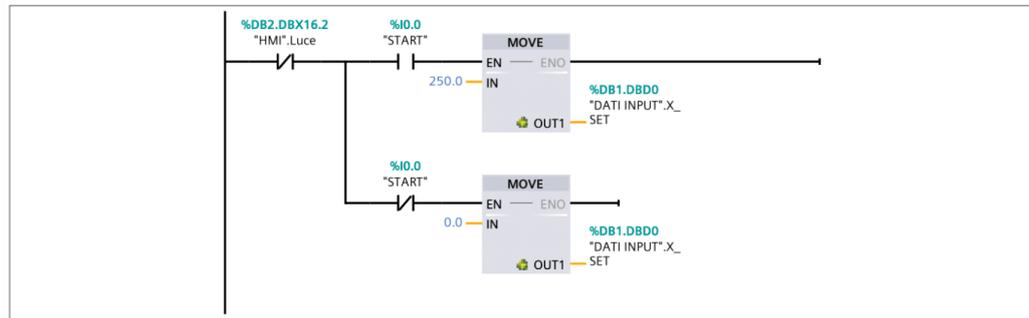
Segmento 1: Controllo dei consensi

I contatti necessari ad avviare il blocco organizzativo



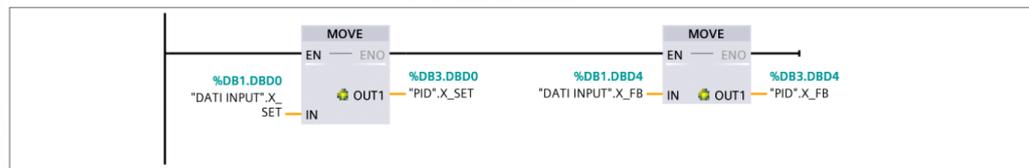
Segmento 2: Cambio X set

Il seguente segmento permette di cambiare il valore di x set utilizzando il primo pulsante sull'HMI



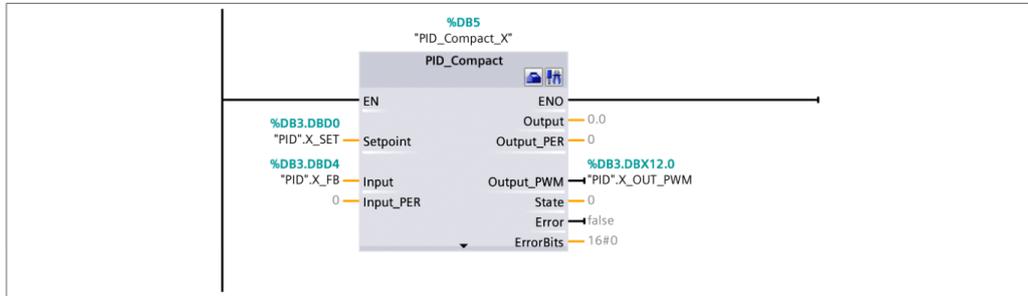
Segmento 3: Importa dati posizione

Importa i valori di xset e xfb nel blocco dati pid



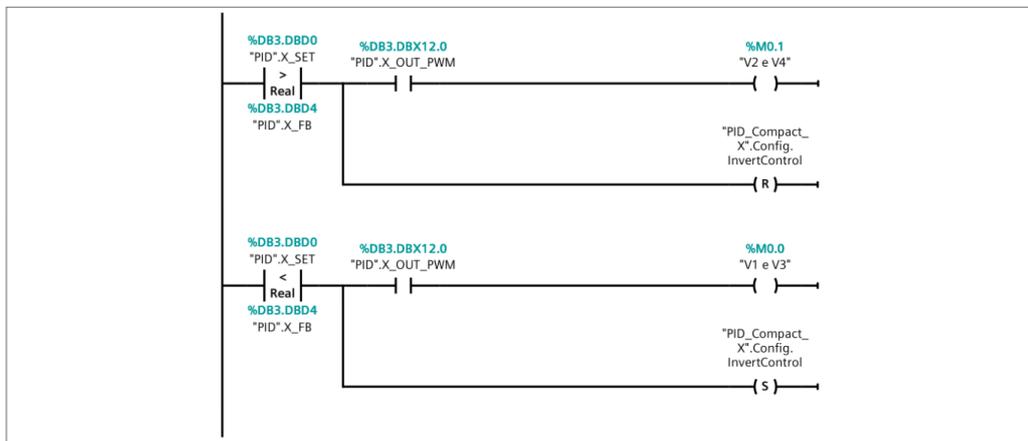
Segmento 4: PID

Inserimento del blocco PID per il controllo della posizione

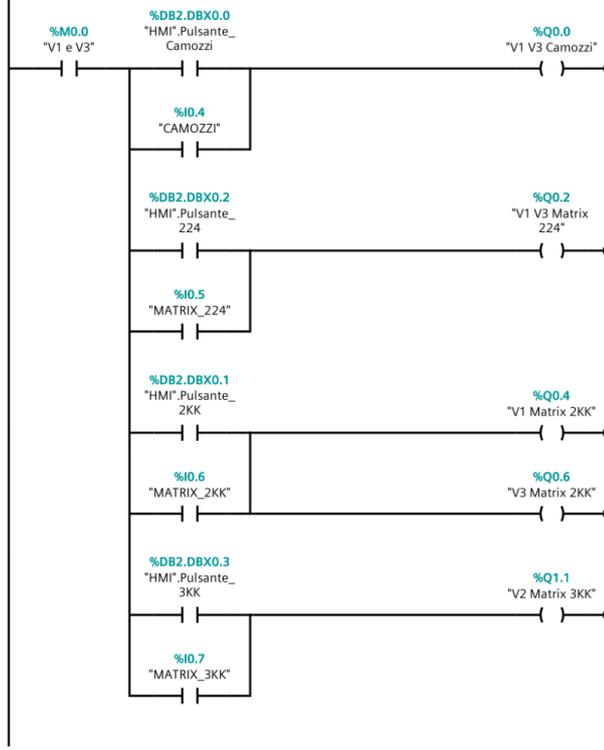


Segmento 5: Attivazione dei merker ed invertcontrol

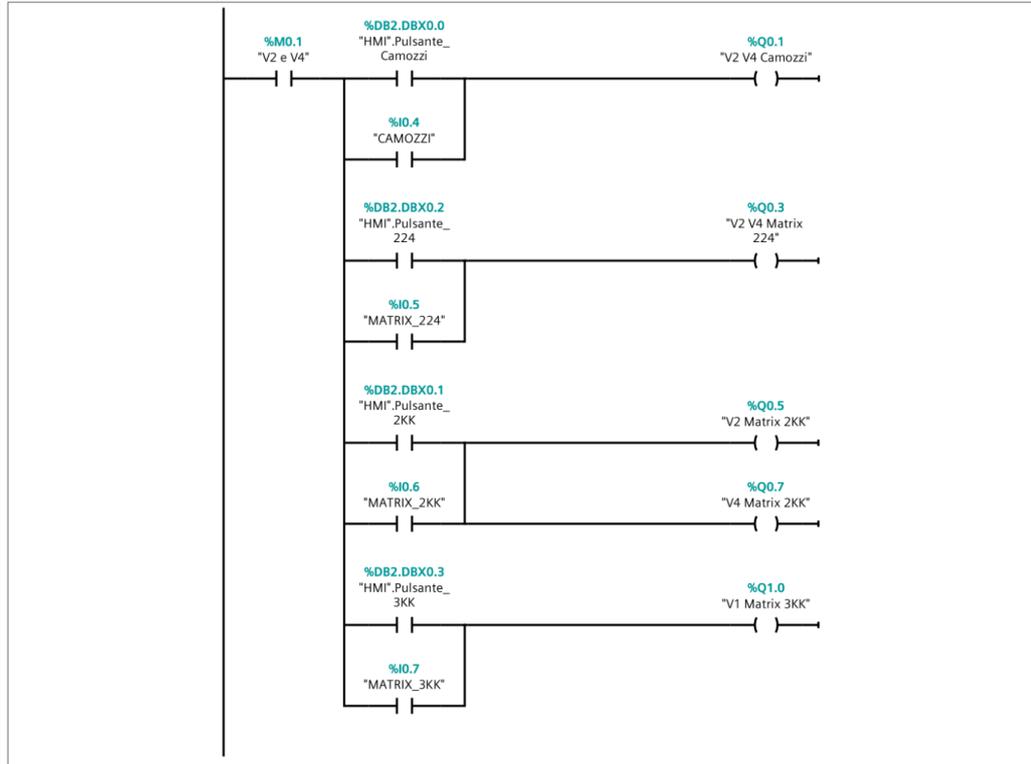
Il seguente blocco attiva i merker con l'intermittenza dell'output del PWM. In compenso si attiva l'invertcontrol quando il feedback supera il set



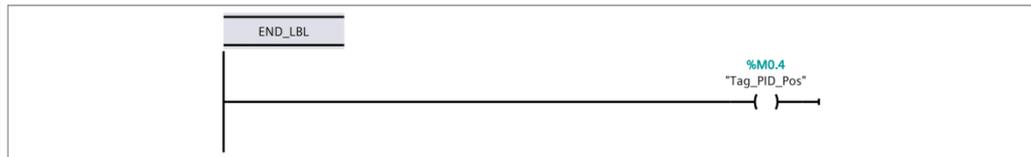
Segmento 6: Attivazione valvole dispari



Segmento 7: Attivazione valvole pari



Segmento 8:



03_CTRL PWM [FC1]

03_CTRL PWM Proprietà

Generale

Nome	03_CTRL PWM	Numero	1	Tipo	FC
Linguaggio	KOP	Numerazione	Automatico		

Informazioni

Titolo	Controllo posizione mediante blocco CTRL_PWM	Autore		Commento	Questo blocco funzione viene utilizzato per comandare le valvole per il controllo della posizione mediante il blocco CTRL_PWM e l'ausilio delle uscite veloci del PLC
Famiglia		Versione	0.1	ID definito dall'utente	

Nome	Tipo di dati	Valore di default	Commento
Input			
Output			
InOut			
Temp			
Constant			
Return			
03_CTRL PWM	Void		

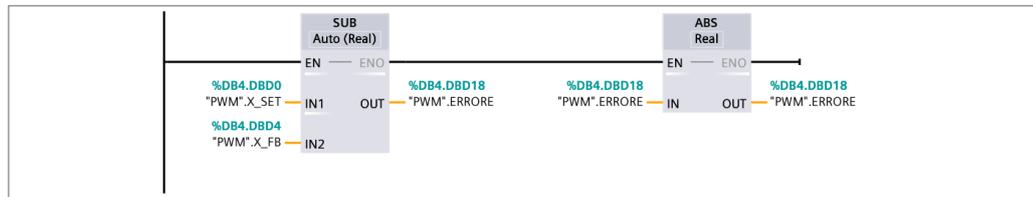
Segmento 1: Importare i dati acquisiti

In questo segmento, tramite il comando MOVE, si spostano i dati di X_SET ed X_FB nelle apposite variabili del blocco dati PWM.



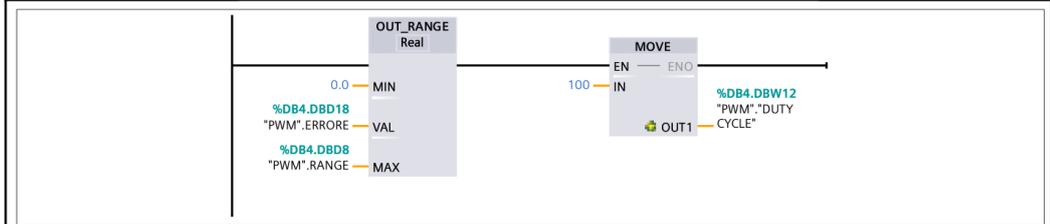
Segmento 2: Calcolo dell'errore

In questo segmento si determina il valore dell'errore effettuando la differenza tra x_set e x_fb e si calcola il valore assoluto.



Segmento 3: Calcolo del duty cycle

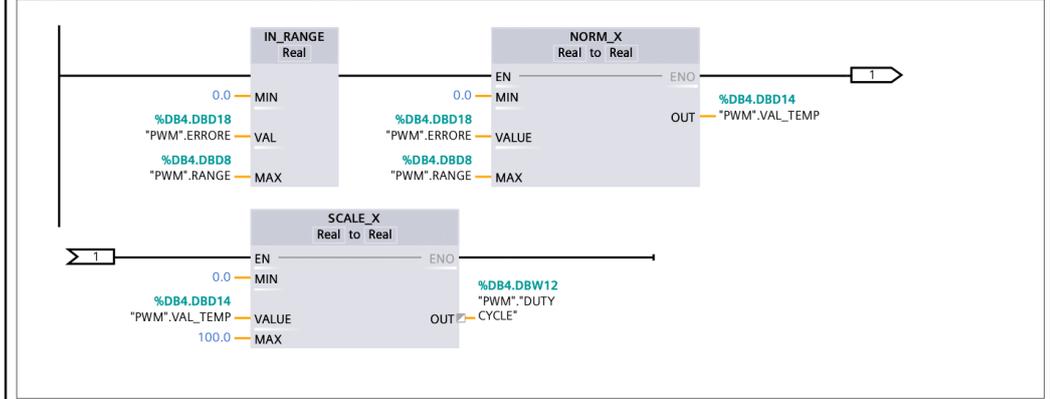
Per effettuare una regolazione più veloce, il dc viene modulato solo quando è all'interno di un certo range. Se il valore dell'errore è al di fuori del range di regolazione, si impone il massimo valore del duty cycle (100) tramite il comando MOVE.



Segmento 4: Calcolo del duty cycle

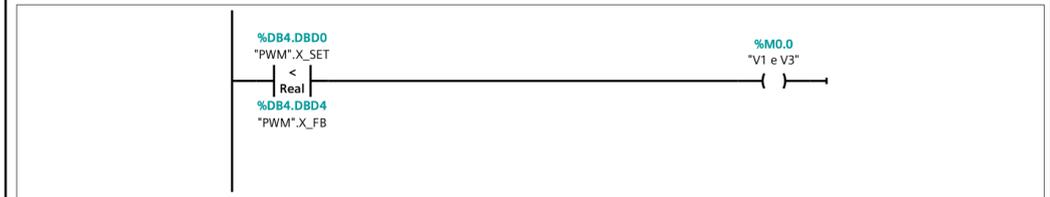
Se il valore dell'errore è all'interno del range, viene normalizzato e scalato da 0 a 100. Il valore finale viene quindi spostato nella variabile Duty_Cycle

Segmento 4: Calcolo del duty cycle



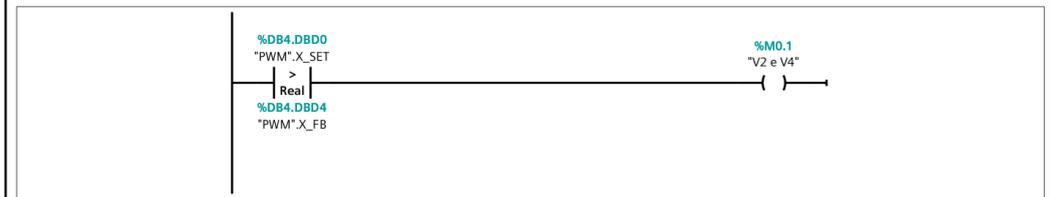
Segmento 5: Comando valvole dispari

Se il valore di X_Set è minore di X_Fb, si attiva il merker per l'attivazione delle valvole dispari



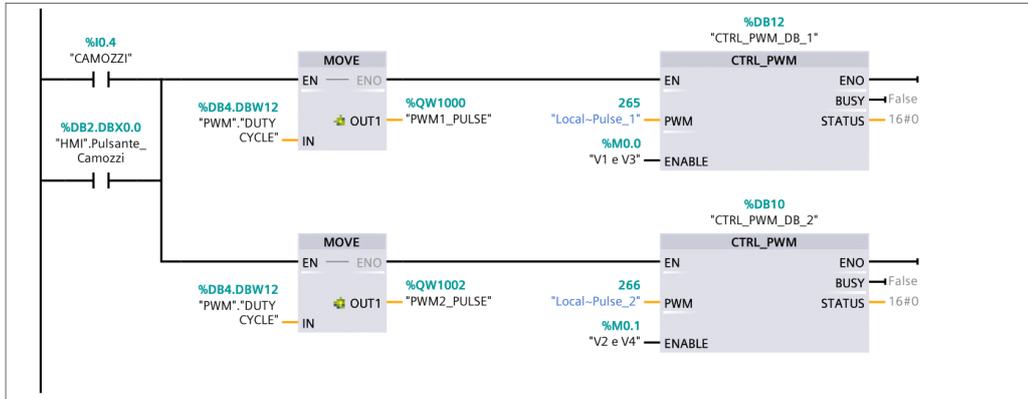
Segmento 6: Comando valvole pari

Se il valore di X_Set è maggiore di X_Fb, si attiva il merker per l'attivazione delle valvole pari



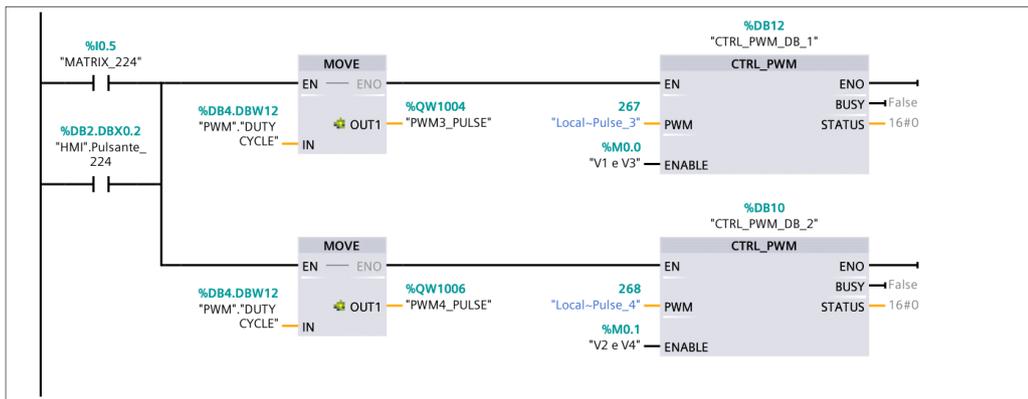
Segmento 7: Azionamento valvole della Camozzi

Questo segmento si attiva quando sono state scelte le valvole della Camozzi, il relè si attivano o tramite l'utilizzo dei pulsanti o tramite la scelta su HMI.



Segmento 8: Azionamento valvole Matrix 224

Questo segmento si attiva quando sono state scelte le valvole Matrix 224, il relè si attivano o tramite l'utilizzo dei pulsanti o tramite la scelta su HMI.



05_Acquisizione_dati [FC3]

05_Acquisizione_dati Proprietà

Generale

Nome	05_Acquisizione_dati	Numero	3	Tipo	FC
Linguaggio	KOP	Numerazione	Automatico		

Informazioni

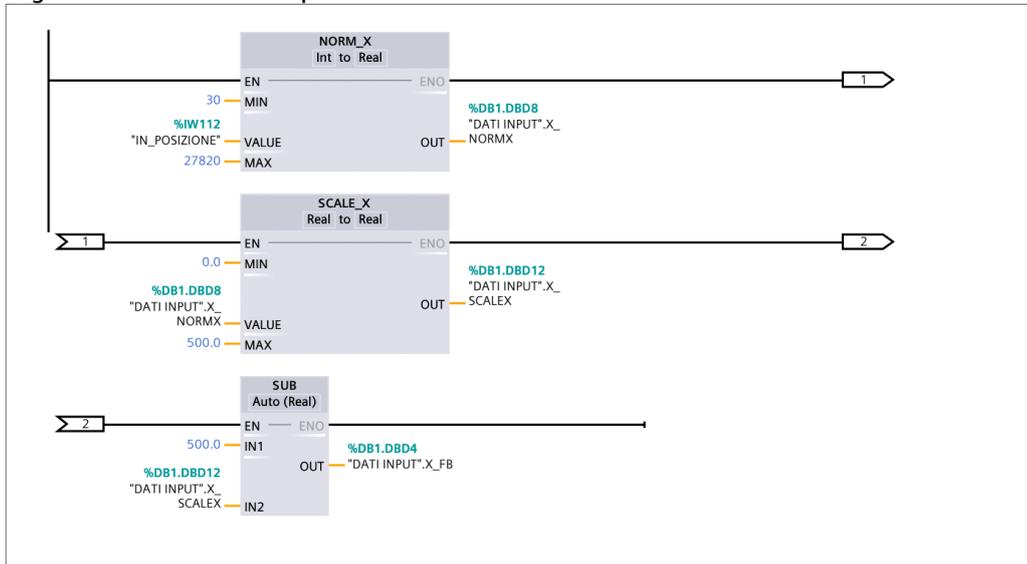
Titolo	Acquisizione dati	Autore		Commento	Il seguente blocco funzione acquisisce le informazioni dai trasduttori, rielabora il segnale analogico e lo sposta nelle opportune variabili.
Famiglia		Versione	0.1	ID definito dall'utente	

Nome	Tipo di dati	Valore di default	Commento
Input			
Output			
InOut			
Temp			
Constant			
▼ Return			
05_Acquisizione_dati	Void		

Segmento 1: Trasduttore di posizione

%IW112 è il segnale di input analogico del trasduttore di posizione, viene normalizzato e scalato da 0 a 500 mm. Il blocco Sub, invece, fa sì che il valore 0 corrisponda all'attuatore rientrato

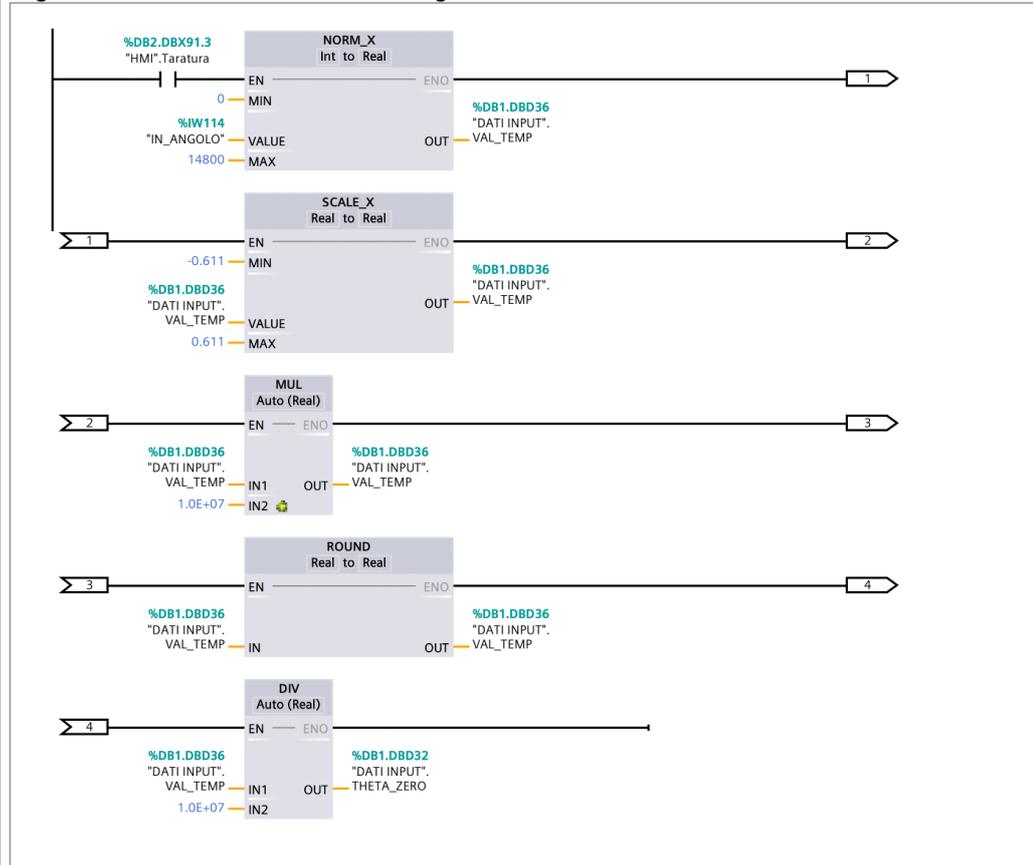
Segmento 1: Trasduttore di posizione



Segmento 2: Taratura del trasduttore angolare

Questo segmento permette di definire il valore analogico del trasduttore angolare in posizione verticale. Si attiva tramite il pulsante sull'HMI dopo aver sistemato manualmente il pendolo.

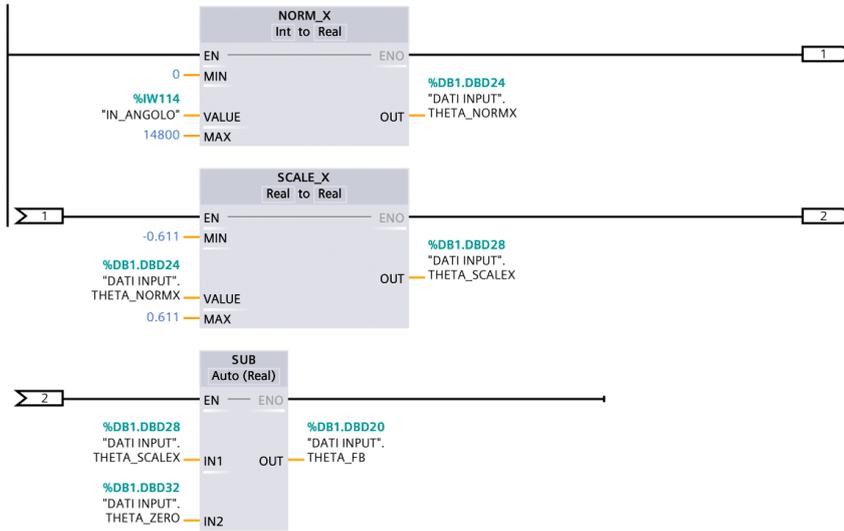
Segmento 2: Taratura del trasduttore angolare



Segmento 3: Trasduttore angolare

%IW114 è il segnale di input analogico del trasduttore angolare, viene normalizzato e scalato da -60 a 60°. Il blocco Sub, invece, sottrae il valore della taratura che corrisponde al pendolo verticale.

Segmento 3: Trasduttore angolare



06_PID_automatico [FC4]

06_PID_automatico Proprietà

Generale

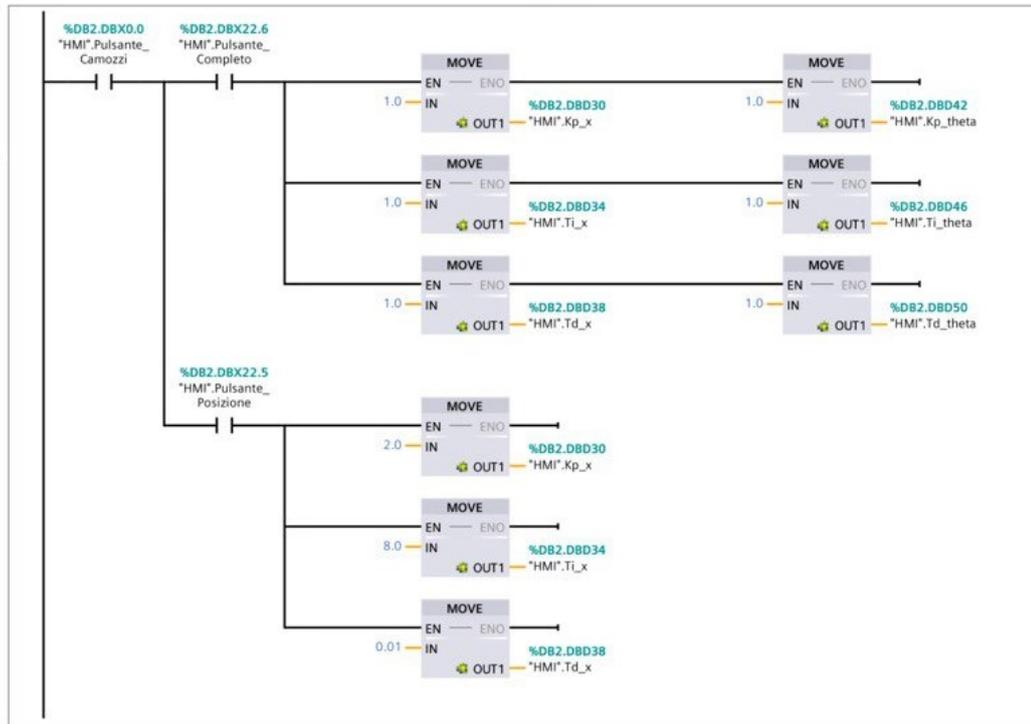
Nome	06_PID_automatico	Numero	4	Tipo	FC
Linguaggio	KOP	Numerazione	Automatico		

Informazioni

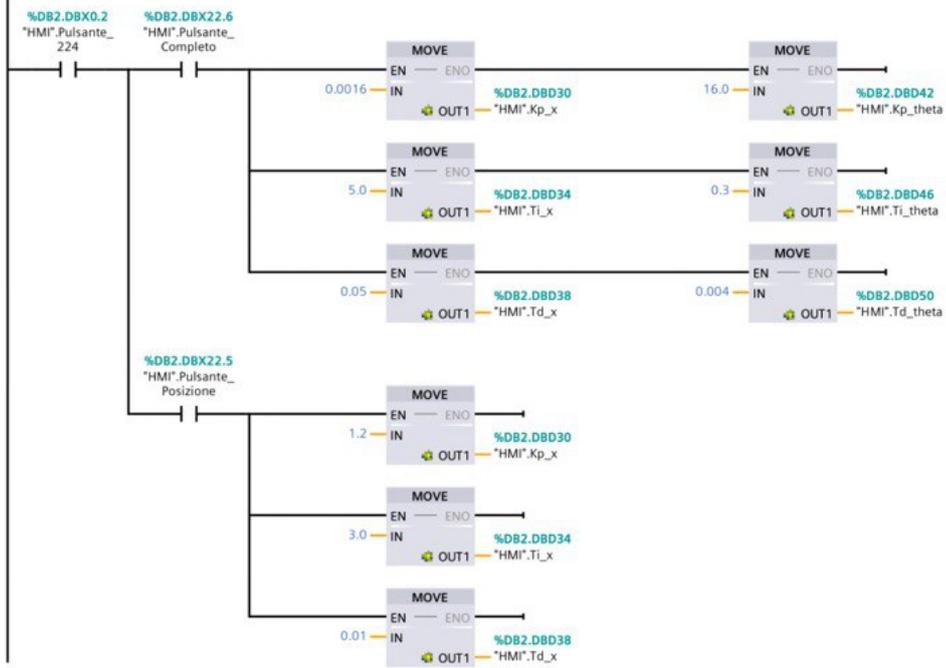
Titolo	Inserimento parametri PID	Autore		Commento	Il seguente blocco funzione, riporta automaticamente i valori dei controllori PID ottenuti nella fase sperimentale.
Famiglia		Versione	0.1	ID definito dall'utente	

Nome	Tipo di dati	Valore di default	Commento
Input			
Output			
InOut			
Temp			
Constant			
▼ Return			
06_PID_automatico	Void		

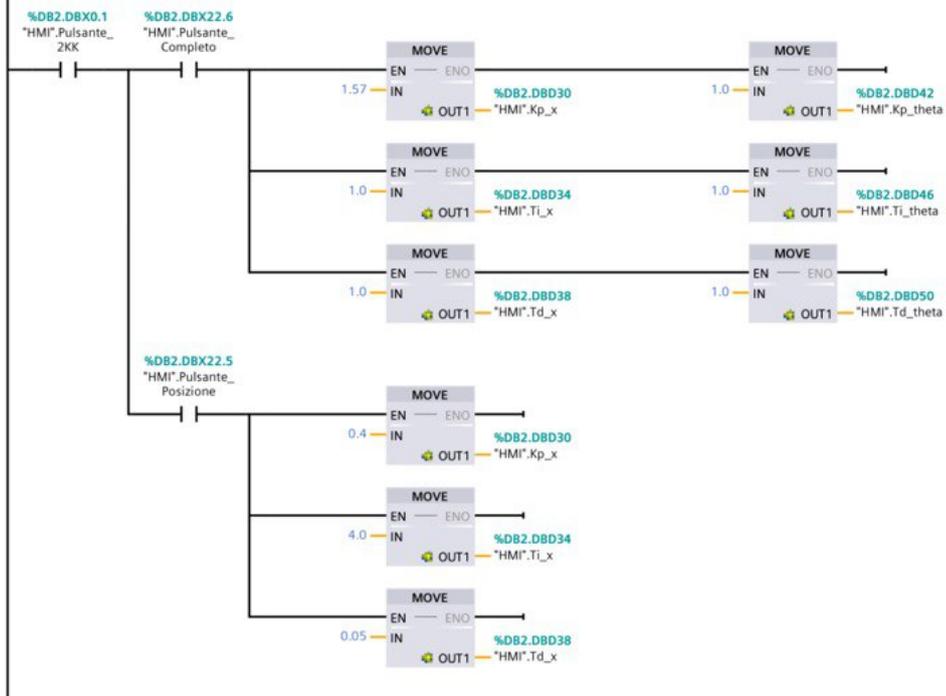
Segmento 1: Valvole Camozzi



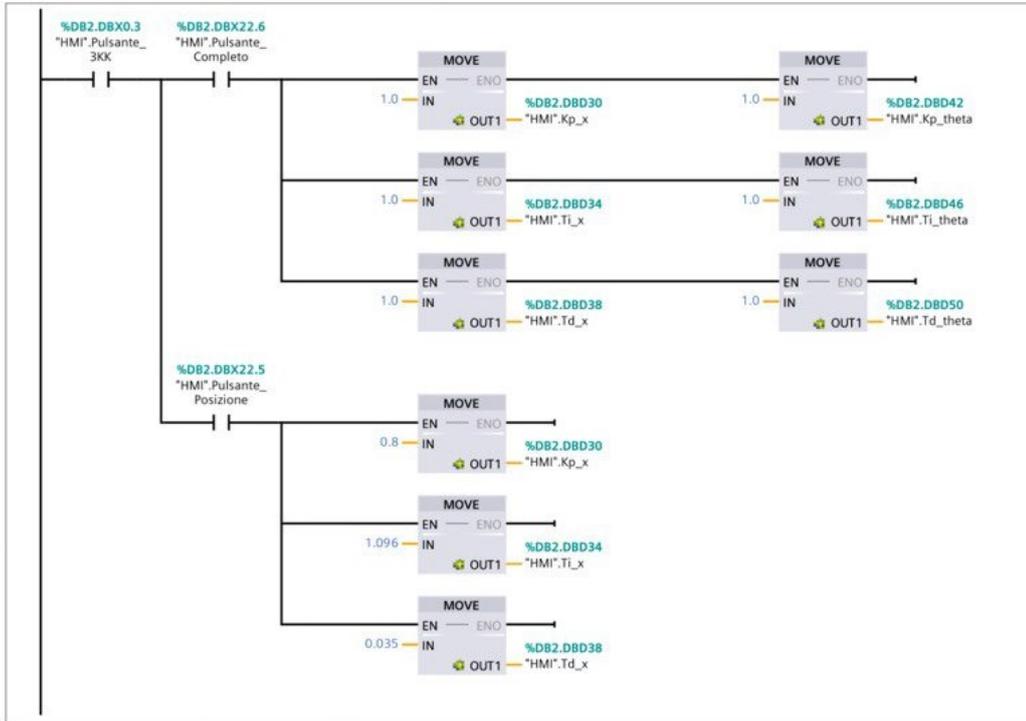
Segmento 2: Valvole Matrix 224



Segmento 3: Valvole Matrix 2KK



Segmento 4: Valvole Matrix 3KK



Totally Integrated Automation Portal		
--------------------------------------	--	--

07_Controllo manuale [FC5]

07_Controllo manuale Proprietà

Generale

Nome	07_Controllo manuale	Numero	5	Tipo	FC
Linguaggio	KOP	Numerazione	Automatico		

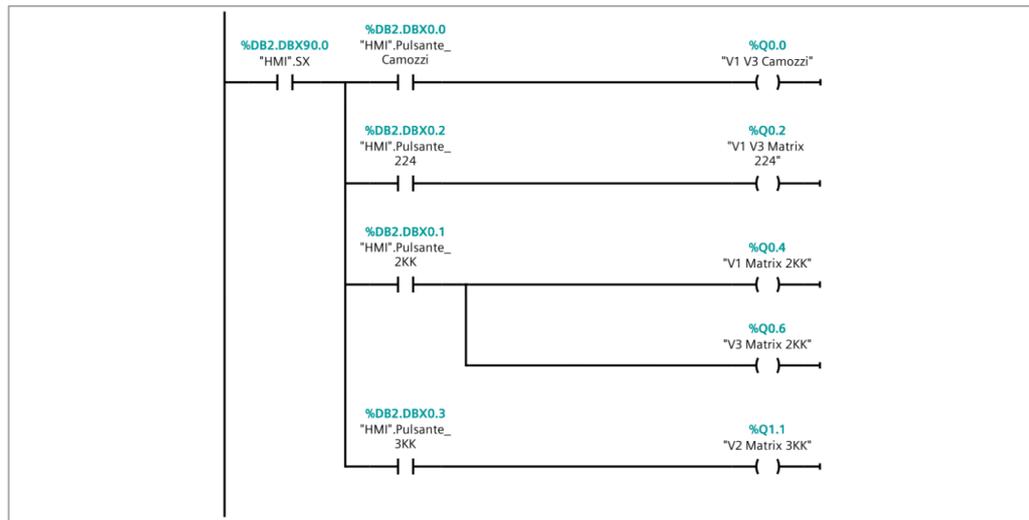
Informazioni

Titolo	Blocco per il controllo manuale	Autore		Commento	Questo blocco funzionale viene utilizzato per comandare manualmente le valvole tramite HMI
Famiglia		Versione	0.1	ID definito dall'utente	

Nome	Tipo di dati	Valore di default	Commento
Input			
Output			
InOut			
Temp			
Constant			
▼ Return			
07_Controllo manuale	Void		

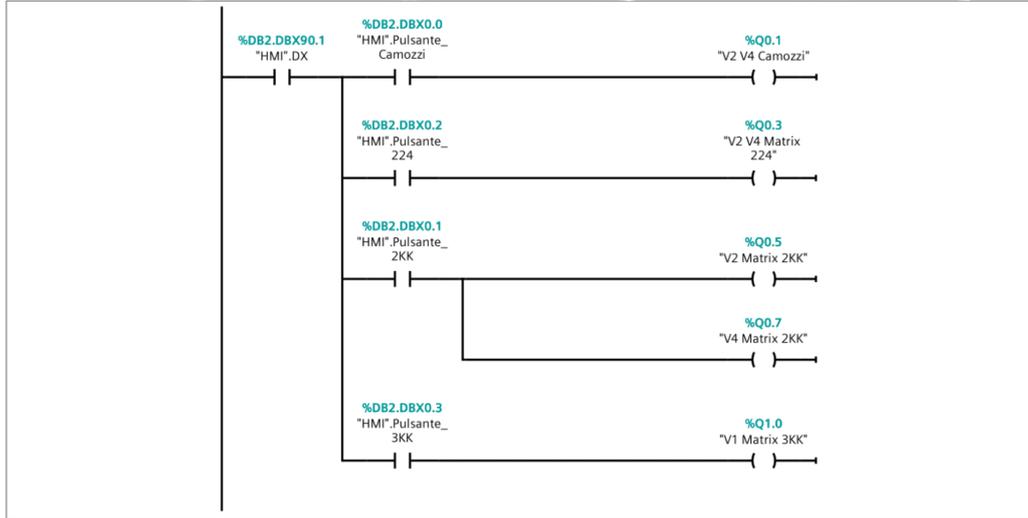
Segmento 1: Azionamento delle valvole dispari

Premendo la freccia a sinistra si attiva il contatto SX che aziona le valvole dispari



Segmento 2: Azionamento delle valvole pari

Premendo la freccia a destra si attiva il contatto DX che aziona le valvole pari



08_HMI_principale [FC6]

08_HMI_principale Proprietà

Generale

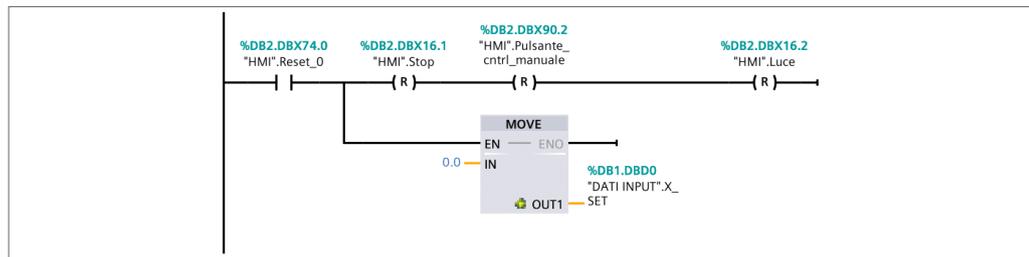
Nome	08_HMI_principale	Numero	6	Tipo	FC
Linguaggio	KOP	Numerazione	Automatico		

Informazioni

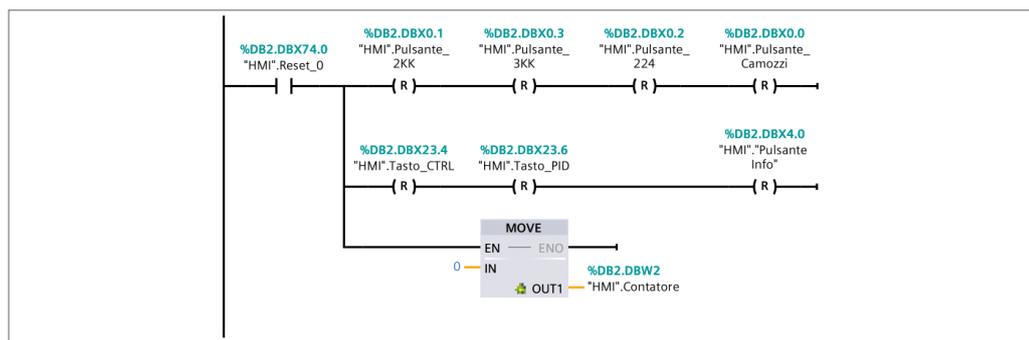
Titolo	HMI azionamento schermata principale	Autore		Commento	In questa schermata si riporta il contatto di reset per ripristinare tutte le impostazioni
Famiglia		Versione	0.1	ID definito dall'utente	

Nome	Tipo di dati	Valore di default	Commento
Input			
Output			
InOut			
Temp			
Constant			
Return			
08_HMI_principale	Void		

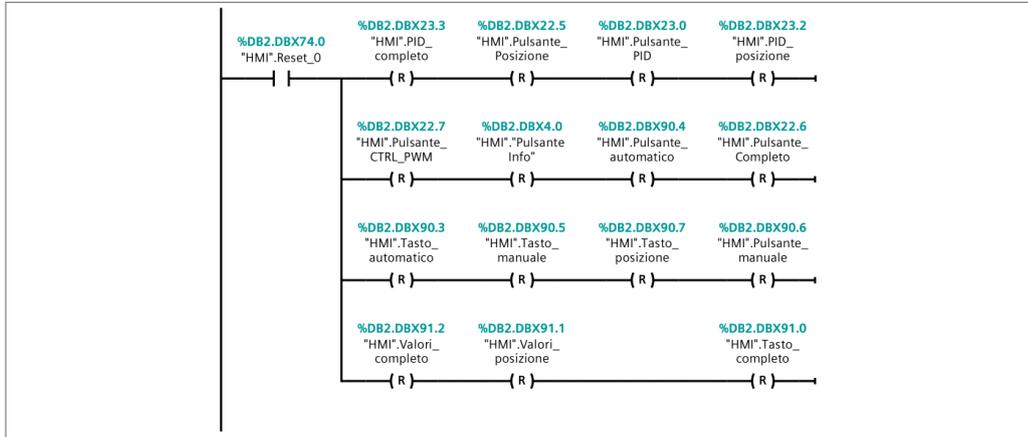
Segmento 1: Reset schermata di simulazione



Segmento 2: Reset schermata valvole



Segmento 3: Reset schermata di controllo



09_HMI_valvole [FC7]

09_HMI_valvole Proprietà

Generale

Nome	09_HMI_valvole	Numero	7	Tipo	FC
Linguaggio	KOP	Numerazione	Automatico		

Informazioni

Titolo	Blocco funzione HMI scelta valvole	Autore		Commento	Questa schermata viene utilizzata per controllare l'HMI per la scelta delle valvole
Famiglia		Versione	0.1	ID definito dall'utente	

Nome	Tipo di dati	Valore di default	Commento
Input			
Output			
InOut			
Temp			
Constant			
▼ Return			
09_HMI_valvole	Void		

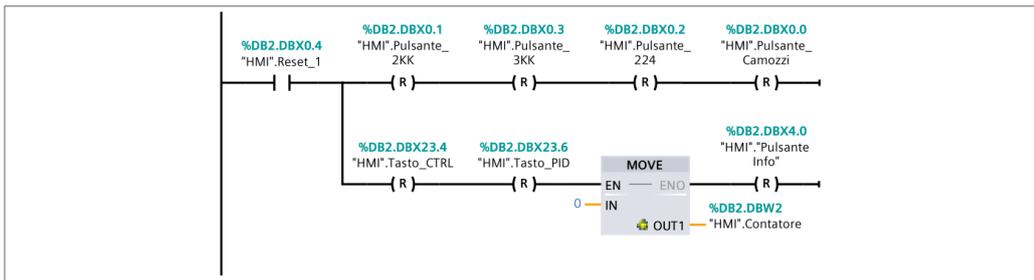
Segmento 1: Conta selezioni

Fornisce un messaggio di errore quando si selezionano più valvole



Segmento 2: Reset scelta valvole

Resetta tutte le scelte fatte sulla schermata in corso



Totally Integrated Automation Portal		
--------------------------------------	--	--

10_HMI_controllo [FC8]

10_HMI_controllo Proprietà

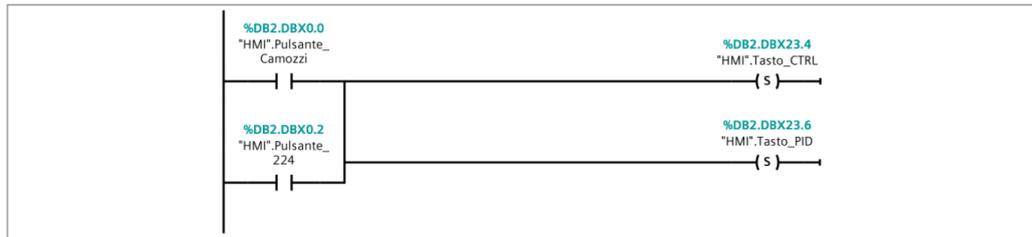
Generale

Nome	10_HMI_controllo	Numero	8	Tipo	FC
Linguaggio	KOP	Numerazione	Automatico		

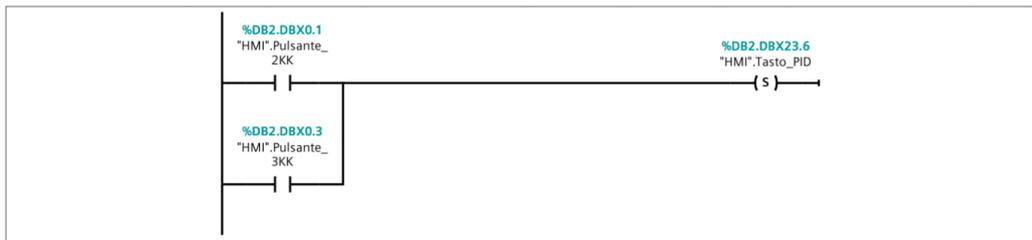
Informazioni

Titolo	Blocco funzionale per la scelta del tipo di controllo	Autore		Commento	Questo blocco funzionale serve a far comparire i pulsanti sulla schermata ed eventuali errori. Le variabili indicate con "Tasto" sono associate alla comparsa effettiva o meno del pulsante sullo schermo. Mentre quelle indicate con "Pulsante" sono le variabili associate all'effettiva attivazione del pulsante
Famiglia		Versione	0.1	ID definito dall'utente	

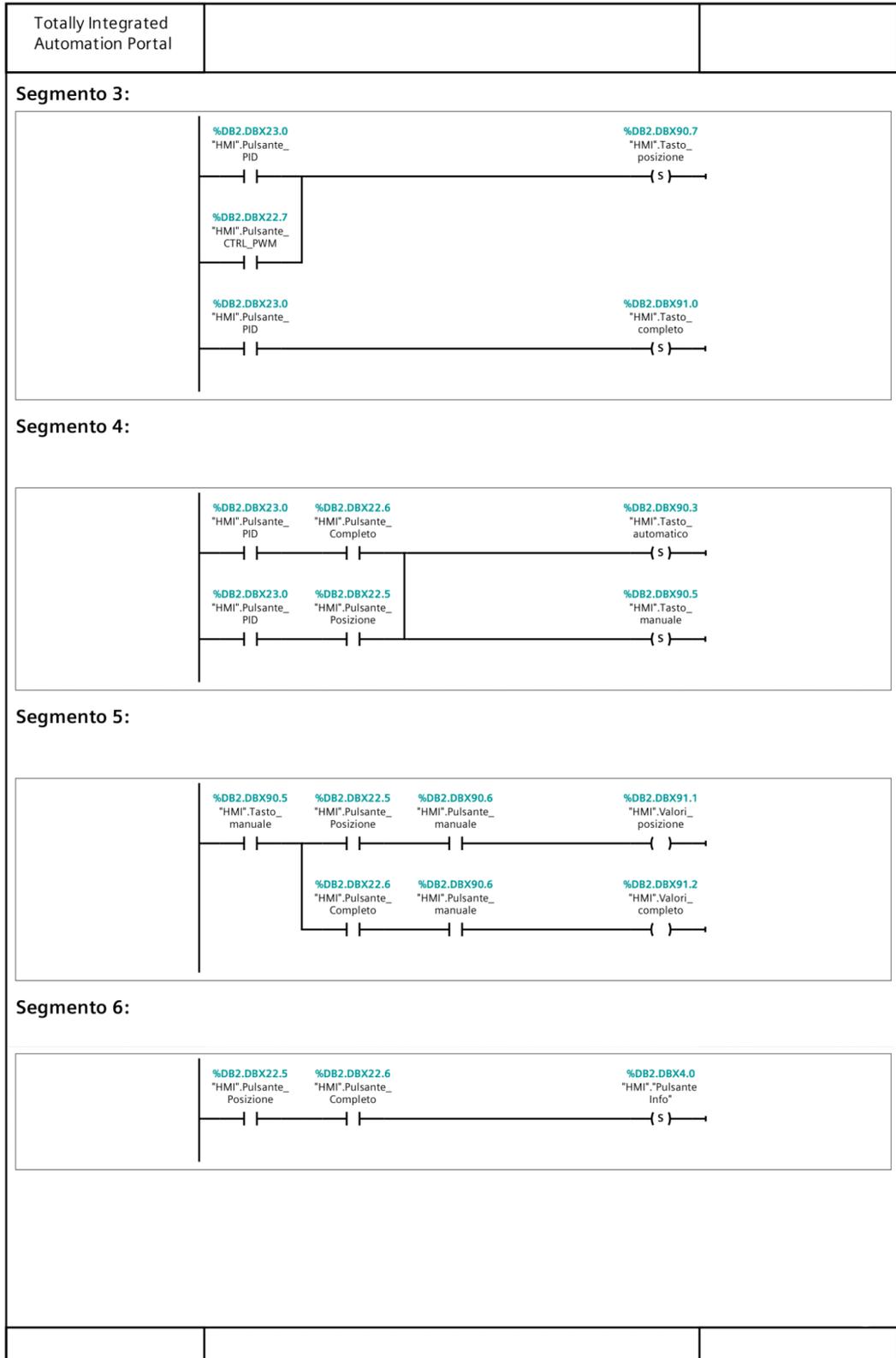
Segmento 1:

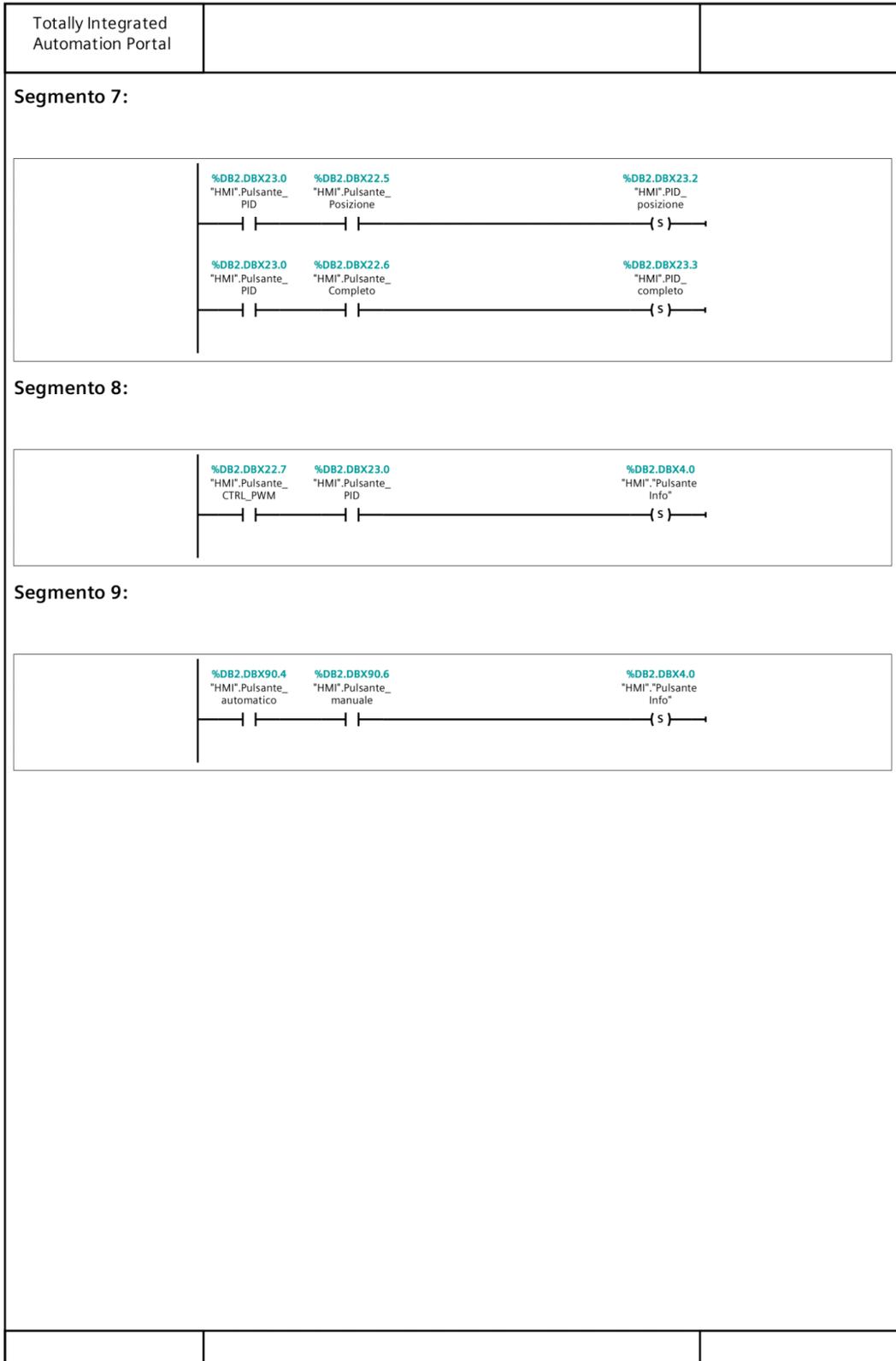


Segmento 2:



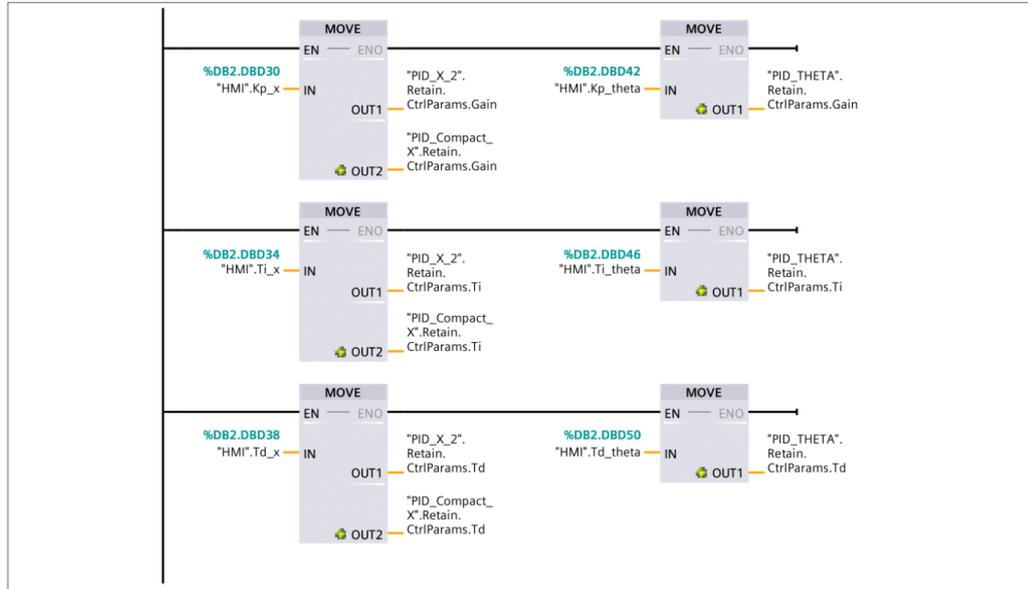
--	--	--





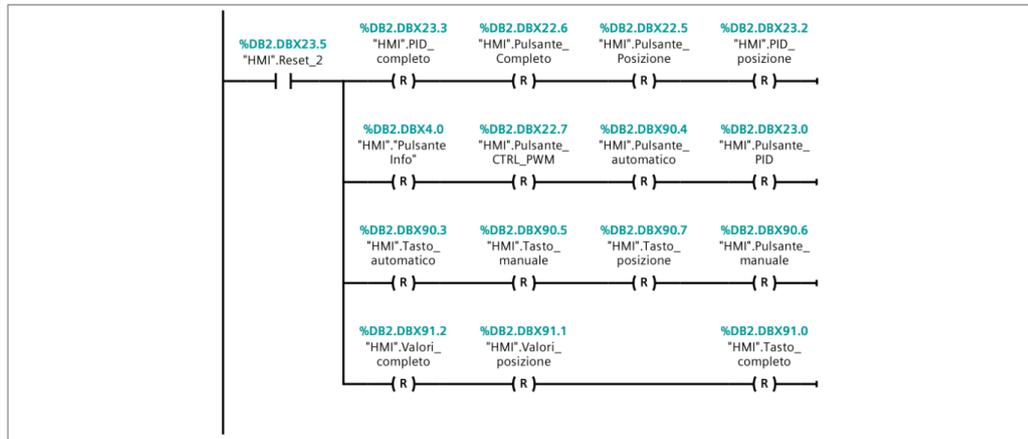
Segmento 10: Riportare i valori del PID

Questi tre segmenti riportano le variabili del PID nel blocco associato



Segmento 11: Pulsante di reset

Ripristina tutte le selezioni



11_HMI_simulazione [FC10]

11_HMI_simulazione Proprietà

Generale

Nome	11_HMI_simulazione	Numero	10	Tipo	FC
Linguaggio	KOP	Numerazione	Automatico		

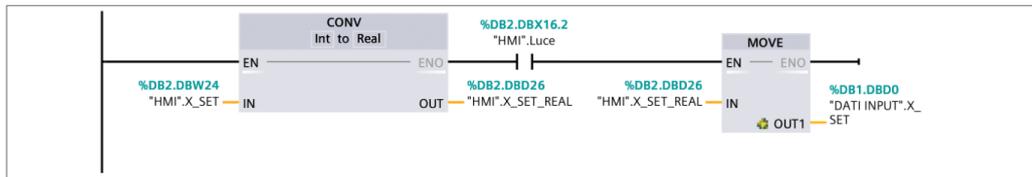
Informazioni

Titolo	Blocco funzione per il controllo della schermata di simulazione	Autore		Commento	Il seguente blocco funzionale viene utilizzato per riprodurre correttamente la schermata di simulazione
Famiglia		Versione	0.1	ID definito dall'utente	

Nome	Tipo di dati	Valore di default	Commento
Input			
Output			
InOut			
Temp			
Constant			
▼ Return			
11_HMI_simulazione	Void		

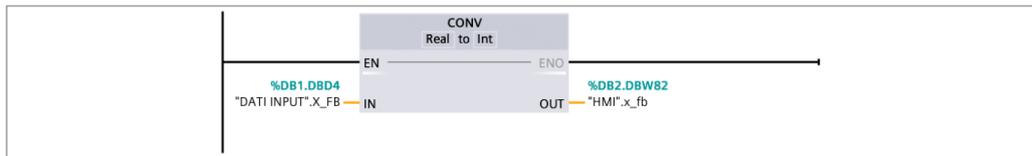
Segmento 1: Inserimento valore di x_Set

Con il blocco MOVE e quello CONV si riporta il valore di x_Set inserito da tastiera nell'apposita variabile



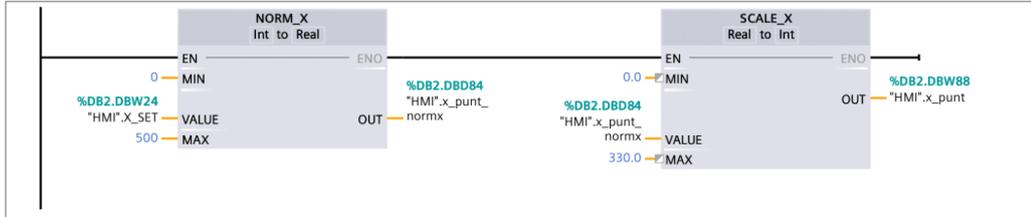
Segmento 2: Riportare valore di FB

In questo segmento si riporta il valore di X FB nel blocco dati HMI per riportarlo a schermo



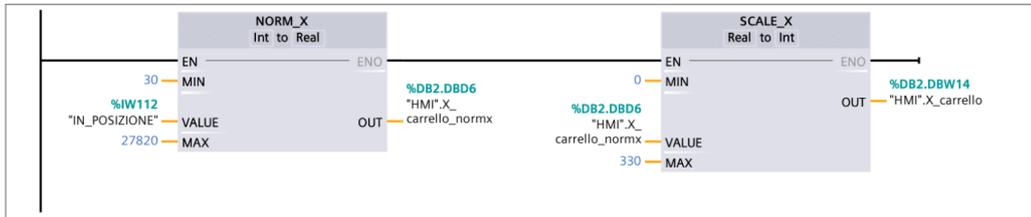
Segmento 3: Puntatore su HMI

Si riporta il valore di X_SET nella variabile associata al movimento del puntatore



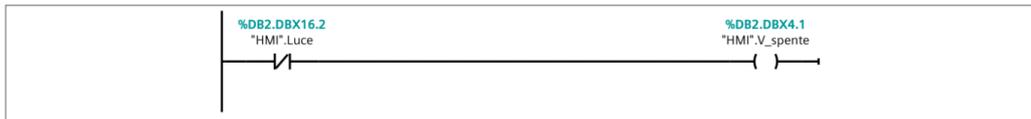
Segmento 4: Carrello

Si riporta il valore di x_Fb nella variabile associata al movimento del carrello



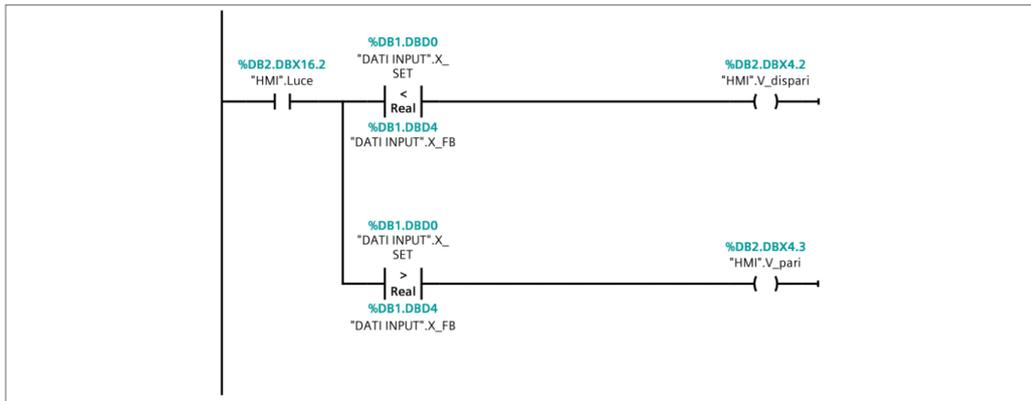
Segmento 5: Merker valvole spente

Se le valvole non sono attive, sulla schermata è riportato lo schema base del banco



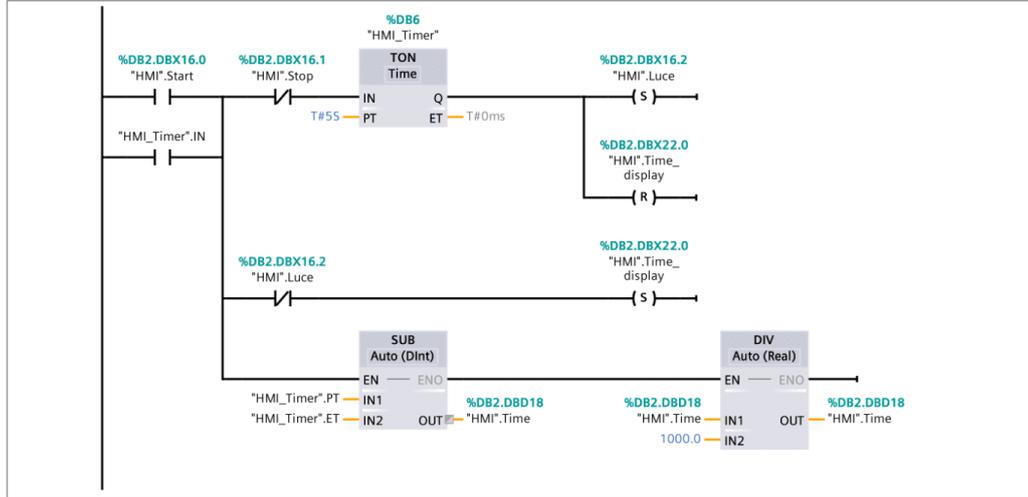
Segmento 6: Merker valvole accese

Quando le valvole sono attive, si colorano in base al quali sono in funzione



Segmento 7: Timer e attivazione

Questo segmento serve per riprodurre il timer su schermo



Segmento 8: Stop sistema

Premendo il pulsante di stop si disattiva la variabile Luce ed il sistema si ferma

