POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica



Tesi di Laurea Magistrale

Studio e progettazione di un banco per la misura dei tempi di risposta di valvole pneumatiche

Relatori: Candidato:

Prof. Terenziano Raparelli

Prof. Andrea Trivella

Ing. Luigi Lentini

Ing. Giuseppe Pepe

Enrico Filippi

Dicembre 2020

Indice

In	ndice				
Indice figure					
Indice tabelle				12	
1	Int	rodu	14		
2 Valvol			pneumatiche	16	
	2.1 Valvole regolatrici di direzione			18	
	2.1	l.1	Valvola a due vie	19	
	2.1	1.2	Valvole a tre vie	19	
	2.1	1.3	Valvole a 4 vie	20	
	2.2	Pos	izioni di lavoro	21	
	2.3	Val	vole a cassetto e ad otturatore	24	
	2.4	Val	vole a centri aperti e a centri chiusi	26	
	2.5	Azio	onamenti delle valvole	29	
3	Te	mpo	di risposta delle valvole pneumatiche	38	
	3.1	Nor	rmativa ISO 12238	39	
	3.1	1.1	Circuito per una valvola ad azionamento elettrico	40	
	3.1	1.2	Circuito per una valvola ad azionamento pneumatico	43	
	3.1.3		Tubi per la misura della pressione	47	
	3.1	1.4	Trasduttori di pressione	47	
	3.1	1.5	Serbatoio	48	
	3.1	1.6	Segnale di controllo	48	
	3.1	1.7	Sistema di acquisizione dati	48	
	3.1	1.8	Accuratezza del test	49	
	3.1	1.9	Procedura di test	49	

	3.2	Nor	mativa ISO 6358-1 2013	50
4	De	scrizi	one componenti impianto	53
	4.1	Prir	mo banco	54
	4.1	1.1	Valvola di prova	58
	4.1	1.2	Elettrovalvola di pilotaggio	59
	4.1	1.3	Solenoide elettrovalvola	60
	4.1	1.4	Gruppo FRL	60
	4.1	1.5	Serbatoio	61
	4.1	1.6	Tubi di misura della pressione	62
	4.1	1.7	Trasduttore di pressione	64
	4.1	1.8	Componenti elettrici	64
	4.1	1.9	Raccordi	66
	4.1	1.10	Staffe e flangie	68
	4.1	1.11	Tubo in PE	69
	4.2	Sec	ondo banco	70
	4.2	2.1	Valvola di prova	74
	4.2	2.2	Tubi di misura della pressione	75
	4.3	Ter	zo banco	77
	4.3	3.1	Valvola di prova	81
	4.3	3.2	Solenoide elettrovalvola	82
	4.3	3.3	Tubi di misura della pressione	82
	4.3	3.4	Trasduttore di pressione	83
5	An	alisi a	a parametri concentrati	84
	5.1	Val	vola 1/4" pilotata in pressione	88
	5.2	Val	vola 1/2" pilotata in pressione	90
	5.3	Elet	ttrovalvola 1/4"	92

6	I	Modello statico				
7	I	Mo	odello dinamico			
	7.1	L	Mod	dello 1: Solo valvola di prova	99	
	-	7.1.	1	Equilibrio meccanico sul cassetto	99	
	-	7.1.	2	Equazioni di portata	101	
	-	7.1.	3	Equazione di continuità	103	
	7.2	2	Sec	ondo modello: Valvola di prova e Elettrovalvola di pilotaggio	107	
	•	7.2.	1	Equilibrio meccanico	109	
	-	7.2.	2	Equazioni di portata	112	
	-	7.2.	3	Equazione di continuità	114	
8	I	Pro	ve sp	perimentali	116	
	8.1	L	Cur	ve di portata	117	
	8.2	<u> </u>	Tara	atura dei trasduttori	123	
	8.3	3	Tem	npo di risposta	127	
9	I	Risu	ıltati		133	
	9.1 Prove sperimentali			ve sperimentali	133	
9.2		<u>)</u>	Mod	Iodello 1: solo valvola di prova		
		9.2.1		Attivazione valvola di prova	140	
	9.2.2		2	Disattivazione valvola di prova	143	
	9.3	3	Mod	dello 2: valvola di prova ed elettrovalvola	146	
		9.3.	1	Attivazione valvola di prova	146	
		9.3.	2	Disattivazione valvola di prova	154	
	9.4	ļ	Riep	pilogo	160	
1(10 Conclusioni 16				161	
1:	11 Bibliografia 16					
Αl	Allegati 16				167	

Indice figure

Figura 2.1 Valvola pneumatica regolatrice di direzione 3/2, monostabile,	controllo
manuale Fonte: Camozzi.com	18
Figura 2.2 Valvola a due vie: a) schema; b) simbolo Fonte: [1]	19
Figura 2.3 Valvola a 3 vie: a) schema; b) simbolo Fonte: [1]	20
Figura 2.4 Valvola a 4 bocche a) schema; b) simbolo Fonte: [1]	20
Figura 2.5 Valvola a 5 bocche a) schema; b) simbolo Fonte: [1]	21
Figura 2.6 Valvola 4/3 Fonte: Slanzi oleodinamica	22
Figura 2.7 Valvola 4/3 Fonte: Irsara	22
Figura 2.8 Esempio applicazione valvola 4/3 Fonte: [1]	23
Figura 2.9 Valvola a cassetto Fonte: RITM Industry	24
Figura 2.10 Valvola ad otturatore Fonte: ScienceDirect	25
Figura 2.11 Valvola a cassetto a centri aperti Fonte: [1]	27
Figura 2.12 Valvola a cassetto a centri chiusi Fonte: [1]	28
Figura 2.13 Valvola ad otturatore a tre bocche a centri chiusi Fonte: [1]	28
Figura 2.14 Esempi di azionamenti muscolari diretti Fonte: [1]	30
Figura 2.15 Esempio di azionamento meccanico Fonte: [1]	31
Figura 2.16 Esempi di valvole ad azionamento pneumatico Fonte: [1]	32
Figura 2.17 Valvola con comando a depressione Fonte: [1]	33
Figura 2.18 Valvole ad azionamento elettrico Fonte: [1]	33
Figura 2.19 Esempio di valvola a comando pneumatico Fonte: Janatics	34
Figura 2.20 Esempio di elettrovalvola monostabile Fonte: Airtac	34
Figura 2.21 Esploso di una valvola pneumatica Fonte: [1]	35
Figura 2.22 Valvola con servopilotaggio Fonte: [1]	36
Figura 2.23 Simboli di comandi con amplificazione Fonte: [1]	37
Figura 3.1 Circuito valvola ad azionamento elettrico Fonte: [1]	40
Figura 3.2 Risposta ad un gradino positivo e negativo con valvole a comando	elettrico
Fonte: [1]	42
Figura 3.3 Circuito per una valvola ad azionamento pneumatico Fonte: [1]	43
Figura 3.4 Risposta a un gradino positivo e negativo con valvola a	comando
pneumatico Fonte: [1]	44

Figura 3.5 Tempi di attivazione e disattivazione per una valvola bistabile	45
Figura 3.6 Tempi di commutazione di valvole pneumatiche Fonte: [1]	46
Figura 3.7 Sezione tubo di misura della pressione Fonte: [3]	50
Figura 3.8 Sezione del connettore Fonte: [3]	52
Figura 4.1 Schema circuito banco 1	54
Figura 4.2 Assieme banco 1, Vista dall'alto	55
Figura 4.3 Assieme banco 1, Vista isometrica	56
Figura 4.4 Valvola di prova Fonte: Metalwork	58
Figura 4.5 Rappresentazione valvola di prova Solidworks	58
Figura 4.6 Elettrovalvola di pilotaggio Fonte: Metalwork	59
Figura 4.7 Elettrovalvola di pilotaggio Solidowork	59
Figura 4.8 Solenoide Metalwork e rappresentazione in Solidworks	60
Figura 4.9 Gruppo FRL Metalwork e rappresentazione Solidworks	61
Figura 4.10 Serbatoio Baglioni e rappresentazione Solidworks	62
Figura 4.11 Tubo di misura 1/4" Solidworks	63
Figura 4.12 Tubo di misura 1/8" Solidworks	63
Figura 4.13 Trasduttore di pressione Honeywell e rappresentazione Solidworks	64
Figura 4.14 Dettaglio componenti elettrici	65
Figura 4.15 Alimentatore utilizzato in laboratorio	65
Figura 4.16 Interruttore switch utilizzato in laboratorio	66
Figura 4.17 Principali raccordi utilizzati (Metalworks/Solidworks)	67
Figura 4.18 Cavallotto Gia e rappresentazione Solidworks	68
Figura 4.19 Staffa elettrovalvola	68
Figura 4.20 Tubo in PE Festo	69
Figura 4.21 Schema circuito banco 1	70
Figura 4.22 Assieme banco 2, Vista dall'alto	71
Figura 4.23 Assieme banco 2, Vista isometrica	72
Figura 4.24 Valvola di prova Fonte: Metalwork	74
Figura 4.25 Rappresentazione valvola di prova Solidworks	74
Figura 4.26 Tubo di misura 1/2" Solidworks	75
Figura 4.27 Tubo di misura 1/8" Solidworks	76
Figura 4.28 Riduttore ISO 6358 Solidworks	76

Figura 4.29 Schema circuito banco 1	77
Figura 4.30 Assieme banco 3, Vista dall'alto	78
Figura 4.31 Assieme banco 3, Vista isometrica	79
Figura 4.32 Valvola di prova Fonte: Metalwork	81
Figura 4.33 Rappresentazione valvola di prova Solidworks	81
Figura 4.34 Solenoide Metalwork e rappresentazione in Solidworks	82
Figura 4.35 Tubo di misura 1/4" Solidworks	82
Figura 4.36 Trasduttore di pressione Honeywell e rappresentazione Solidworks	83
Figura 5.1 Resistenza pneumatica: a) schema; b) simbolo Fonte: [4]	85
Figura 5.2 Capacità pneumatica Fonte: [4]	86
Figura 5.3 Simbolo della capacità pneumatica Fonte: [4]	86
Figura 5.4 Induttanza pneumatica: a) schema; b) simbolo Fonte: [4]	87
Figura 5.5 Vista dall'alto del banco 1 e 2	88
Figura 5.6 Schema a parametri concentrati banco 1 e 2	89
Figura 5.7 Banco con elettrovalvola	92
Figura 5.8 Banco con elettrovalvola a parametri concentrati	92
Figura 6.1 Curve di portata Metalwork	96
Figura 6.2 Curve di portata modello statico	96
Figura 7.1 Modello Simulink della valvola di prova	99
Figura 7.2 Equilibrio meccanico valvola di prova	99
Figura 7.3 Equilibrio meccanico cassetto Simulink	100
Figura 7.4 Equazione di portata Simulink	102
Figura 7.5 Calcolo conduttanza	102
Figura 7.6 Equazione di continuità Simulink	104
Figura 7.7 Equilibrio meccanico disattivazione	104
Figura 7.8 Equilibrio meccanico disattivazione valvola di prova	105
Figura 7.9 Calcolo portata disattivazione valvola di prova	105
Figura 7.10 Calcolo conduttanza disattivazione	105
Figura 7.11 Equazione di continuità disattivazione valvola di prova	106
Figura 7.12 Rappresentazione Simulink del banco prova	107
Figura 7.13 Modello simulink valvola di prova	107
Figura 7.14 Rappresentazione elettrovalvola Simulink	108

Figura 7.15 Schema forze elettrovalvola	109
Figura 7.16 Equilibrio meccanico Simulink	110
Figura 7.17 Schema elettrico solenoide	110
Figura 7.18 Modello solenoide Simulink	111
Figura 7.19 Equazione di portata Simulink	113
Figura 7.20 Calcolo conduttanza	113
Figura 7.21 Equazione di continuità Simulink	115
Figura 8.1 Valvola di prova utilizzata in laboratorio	117
Figura 8.2 Circuito prima prova portata	118
Figura 8.3 Flussimetro digitale	119
Figura 8.4 Circuito seconda prova portata	120
Figura 8.5 Curve di portata	121
Figura 8.6 Trasduttore montato sul tubo di misura della pressione	123
Figura 8.7 Circuito taratura trasduttori	124
Figura 8.8 Curve pV trasduttori di pressione	125
Figura 8.9 Banco prova sperimentale	127
Figura 8.10 Alimentazione banco	127
Figura 8.11 Sistema di acquisizione dati	128
Figura 8.12 Esempio di risultato sperimentale	131
Figura 9.1 Attivazione valvola di prova	133
Figura 9.2 Esempio tempo di attivazione valvola	134
Figura 9.3 Disattivazione valvola di prova	135
Figura 9.4 Esempio tempo di disattivazione valvola	135
Figura 9.5 Esempio misura ton e ton1	136
Figura 9.6 Esempio misura ton2 e toff	136
Figura 9.7 Esploso valvola di prova	139
Figura 9.8 Spostamento e velocità attivazione cassetto	141
Figura 9.9 Attivazione valvola	142
Figura 9.10 Spostamento e velocità disattivazione valvola	144
Figura 9.11 Disattivazione valvola di prova	145
Figura 9.12 Dati solenoide attivazione	148
Figura 9.13 Spostamento e velocità cassetto elettrovalvola	149

Figura 9.14 Spostamento e velocità cassetto valvola di prova	150
Figura 9.15 Ritardo attivazione valvola	151
Figura 9.16 Confronto attivazione prova sperimentale e simulata	152
Figura 9.17 Dati solenoide elettrovalvola	156
Figura 9.18 Spostamento e velocità cassetto elettrovalvola	156
Figura 9.19 Spostamento e velocità cassetto valvola di prova	157
Figura 9.20 Ritardo disattivazione valvola di prova	158
Figura 9.21 Confronto disattivazione simulato e sperimentale	159

Indice tabelle

Tabella 3.1 Accuratezza del test Fonte: [2, 3]	49
Tabella 3.2 Dimensioni tipiche dei tubi di misura Fonte: [3]	51
Tabella 4.1 Descrizione elementi banco prova	55
Tabella 4.2 Componenti banco 1	57
Tabella 4.3 Descrizione elementi banco prova	71
Tabella 4.4 Componenti banco 2	73
Tabella 4.5 Descrizione elementi banco prova	77
Tabella 4.6 Componenti banco 3	80
Tabella 5.1 Resistenze pneumatiche	89
Tabella 5.2 Capacità pneumatica	90
Tabella 5.3 Induttanze pneumatiche	90
Tabella 8.1 Dati interpolazione retta trasduttori	126
Tabella 8.2 Elenco componenti impianto	128
Tabella 9.1 Risultati sperimentali	137
Tabella 9.2 Dati modello 1 attivazione valvola	140
Tabella 9.3 Tempi di attivazione modello 1	142
Tabella 9.4 Dati modello 1 disattivazione valvola	143
Tabella 9.5 Dati disattivazione	145
Tabella 9.6 Dati valvola di prova attivazione	146
Tabella 9.7 Dati elettrovalvola di pilotaggio attivazione	147
Tabella 9.8 Dati attivazione valvola	151
Tabella 9.9 Dati disattivazione valvola di prova	154
Tabella 9.10 Dati elettrovalvola disattivazione	155
Tabella 9.11 Dati disattivazione	158
Tabella 9.12 Riepilogo risultati	160

1 Introduzione

Le valvole pneumatiche sono dispositivi utilizzati per il comando di attuatori e per la regolazione della portata e della pressione dell'aria compressa all'interno di sistemi pneumatici. Vengono, ormai, utilizzate in svariate applicazioni di tipo industriale per la loro versatilità, velocità e per il loro basso costo.

L'obiettivo di questa trattazione è quello di andare a studiare, progettare e realizzare un banco prova per la misura del tempo di risposta di attivazione e disattivazione di valvole pneumatiche di uso industriale.

Il tempo di risposta di una valvola pneumatica è diventato un fattore molto importante per la realizzazione di impianti automatici. Lo sviluppo di questa trattazione è la conferma di ciò che l'industria richiede. In fase di progettazione di un impianto automatico, i dati relativi alla frequenza di commutazione di una valvola, sono estremamente importanti e necessari per raggiungere il livello di automazione richiesto dall'azienda.

Lo studio riguarda una prima progettazione teorica del banco seguendo le normative di riferimento (in particolare la ISO 12238 e la ISO 6358), in seguito una simulazione statica e dinamica del banco con il supporto dei software Matlab e Simulink ed infine una realizzazione fisica del banco sul quale verranno effettuate diverse prove sperimentali.

I capitoli 2 e 3 riguardano la ricerca bibliografica, in particolare una classificazione completa delle valvole pneumatiche e una descrizione delle normative di riferimento. Nel capitolo 4 vengono presentati i componenti dei tre banchi prova progettati con le relative viste d'assieme. Il capitolo 5 illustra i componenti del banco utilizzando i parametri concentrati con il calcolo delle resistenze, capacità e induttanze di ogni componente. Il modello statico (capitolo 6) è necessario per verificare la veridicità delle formule di portata e dei valori di conduttanza e rapporto critico della valvola di prova. Negli ultimi capitoli vengono presentati i due modelli dinamici realizzati per simulare le valvole del banco e si confrontano i risultati con ciò che si ottiene sperimentalmente con il banco prova reale.

2 Valvole pneumatiche

Le valvole pneumatiche sono dispositivi utilizzati per il comando di attuatori e per la regolazione della portata e della pressione dell'aria compressa all'interno di sistemi pneumatici.

Le valvole pneumatiche possono essere classificate in base alla tipologia di fluido che utilizzano, in base alle funzioni che svolgono, al meccanismo interno di funzionamento, alle condizioni di equilibrio e all'azionamento utilizzato.

In base al tipo di fluido si hanno:

- Valvole di potenza: sono valvole generalmente di grande dimensione, in grado di distribuire aria compressa con elevata potenza in modo da alimentare gli attuatori.
- Valvole di controllo: hanno dimensioni più ridotte rispetto alle prime e agiscono solitamente all'interno dei circuiti di controllo (per es. valvole per il pilotaggio di valvole di potenza).

Negli impianti pneumatici, non si ha una vera e propria distinzione tra valvole di potenza e valvole di controllo in quanto, spesso, entrambe utilizzano lo stesso fluido. Come detto in precedenza presentano differenze sostanziali solo per quanto riguarda la loro taglia.

In base alla funzione svolta si hanno:

- Valvole regolatrici di direzione: sono valvole utilizzate per orientare il flusso all'interno del sistema pneumatico (per es. valvole utilizzate per alimentare cilindri pneumatici).
- Valvole di temporizzazione: sono in grado di legare l'ingresso o l'uscita di un segnale pneumatico con il tempo.
- Valvole di sequenza: nella quale l'attivazione o disattivazione dipende dall'entità del segnale in ingresso.
- Valvole regolatrici di flusso: in grado di regolare la portata in uscita.

In base alla tipologia di corpo mobile si hanno:

- Valvole a cassetto: formati da una spola che scorre all'interno di una sede.
- Valvole ad otturatore: dove l'organo mobile è formato da un disco che si muove in modo perpendicolare alla sezione di passaggio.

In base alla condizione di equilibrio si hanno:

- Valvole Monostabili (o Unistabili): aventi una posizione di equilibrio che corrisponde alla posizione di riposo. La posizione di riposo è mantenuta in assenza di alimentazione solitamente mediante l'utilizzo di una molla.
- Valvole Bistabili: nelle quali la posizione di riposo è l'ultima posizione raggiunta in fase di utilizzo.

In base al tipo di azionamento si hanno:

- Muscolare diretto
- Meccanico
- Pneumatico
- Elettrico

I vari tipi di azionamenti verranno descritti nello specifico in un paragrafo successivo.

In questa trattazione verranno presentate principalmente valvole regolatrici di direzione sia a cassetto che ad otturatore utilizzate come valvole di potenza (ma che possono anche svolgere funzioni di controllo).

Generalmente le pressioni di lavoro di queste valvole vanno dai 3 ai 10 bar, ma in alcuni casi particolari possono salire fino a valori massimi di 30 bar e minimi di 0,2 bar.



Figura 2.1 Valvola pneumatica regolatrice di direzione 3/2, monostabile, controllo manuale Fonte: Camozzi.com

2.1 Valvole regolatrici di direzione

Le valvole regolatrici di direzione hanno lo scopo di collegare i diversi condotti di un sistema pneumatico in modo diverso. Esse vengono classificate in base al numero di condotti con i quali si possa creare un collegamento. Avremo quindi:

- Valvole a due vie (due bocche).
- Valvole a tre vie (tre bocche).
- Valvole a quattro vie (quattro o cinque bocche).

Col termine bocca si fa riferimento al foro di un condotto che rappresenta fisicamente il collegamento tra l'alimentazione, l'atmosfera o tubi di connessione ad attuatori e le camere interne delle valvole. Con il termine "via" si intende un condotto funzionale che può essere di volta in volta l'alimentazione, un condotto di utilizzazione, uno scarico [1]. Nell'ultima revisione della normativa ISO 11727 si raccomanda di utilizzare unicamente il termine "bocca" per non causare equivoci, ciò nonostante la dicitura "via" è ancora accettata in quanto largamente utilizzata.

2.1.1 Valvola a due vie

La valvola a due vie è costituita da una bocca d'ingresso e una di uscita. L'elemento in grado di regolare la direzione del flusso è un otturatore sottoforma di organo traslante che può avere forma diversa. Nel caso in figura 2.2 l'otturatore ha la forma di un disco che si muove in modo perpendicolare alla bocca d'ingresso del fluido.

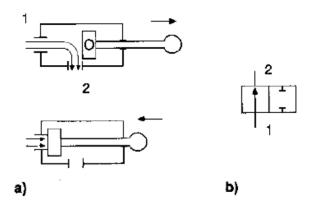


Figura 2.2 Valvola a due vie: a) schema; b) simbolo Fonte: [1]

L'area di passaggio del fluido dipende dal diametro del foro 1 e dallo spostamento dell'otturatore. Il condotto 1 viene generalmente collegato all'alimentazione e il condotto 2 allo scarico. Questo tipo di valvola viene utilizzata per avviare un processo e non prevedono la possibilità di scaricare l'impianto.

2.1.2 Valvole a tre vie

Le valvole a tre vie presentano tre bocche e possono essere sia a cassetto che ad otturatore. In figura 2.3 è rappresentata una valvola a 3 vie dotata di un elemento interno scorrevole (cassetto) costituito da una serie di dischi collegati da un'asta comune, che trasla in una sede fissa cilindrica su cui sono praticati i fori di ingresso e di uscita. La commutazione della valvola avviene per scorrimento del cassetto che collega in maniera diversa i condotti.

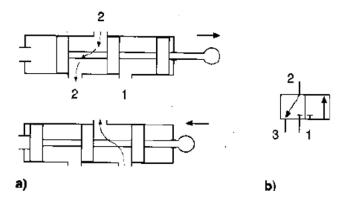


Figura 2.3 Valvola a 3 vie: a) schema; b) simbolo Fonte: [1]

Le valvole a 3 vie vengono utilizzate principalmente per movimentare un cilindro a semplice effetto; in questo caso si collega la bocca 1 con l'alimentazione, la bocca 2 con il cilindro e la bocca 3 con lo scarico. In questo modo commutando la valvola (cioè muovendo il cassetto) si può scegliere se alimentare il cilindro o metterlo a scarico per farlo tornare nella posizione iniziale di riposo.

In alternativa si potrebbe alimentare la porta 2 e collegare le porte 1 e 3 con due differenti utenze. In questo caso specifico però l'impianto non potrebbe scaricarsi.

2.1.3 Valvole a 4 vie

La valvola a 4 vie può essere realizzata costruttivamente a 4 bocche (figura 2.4) o a 5 bocche (figura 2.5). La valvola a 4 bocche non presenta fisicamente la bocca 5 anche se internamente esiste un condotto che si ricollega alla bocca 3.

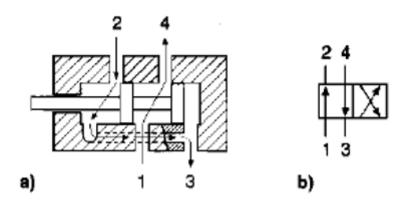


Figura 2.4 Valvola a 4 bocche a) schema; b) simbolo Fonte: [1]

La valvola a 5 bocche invece presenta due bocche separate per lo scarico la 3 e la 5 come si può osservare dalla figura sottostante. Siccome i due scarichi svolgono la stessa operazione la valvola a 5 bocche è una valvola a 4 vie.

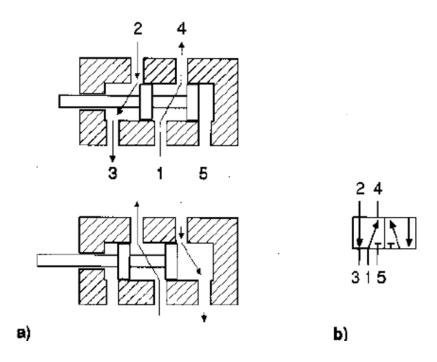


Figura 2.5 Valvola a 5 bocche a) schema; b) simbolo Fonte: [1]

Le valvole a 4 vie vengono utilizzate principalmente per alimentare cilindri a doppio effetto collegando la bocca 1 con l'alimentazione, le bocche 2 e 4 con le due bocche di comando del cilindro e le bocche 3 e 5 con lo scarico. Queste valvole permettono quindi l'alimentazione di una camera del cilindro e contemporaneamente lo scarico della camera opposta del cilindro.

2.2 Posizioni di lavoro

Tutte le valvole viste finora presentano due posizioni di lavoro, cioè due configurazioni possibili durante il loro funzionamento. Prendendo l'esempio della valvola in figura 2.5, si può vedere dal simbolo il collegamento dei vari condotti nelle due configurazioni. Nello specifico quindi le due configurazioni vengono utilizzate per cambiare il verso del fluido all'interno dei condotti.

Esistono però, valvole a tre o più posizioni di lavoro, dove solitamente la posizione centrale viene utilizzata come chiusura delle bocche (vedi figura 2.6). Le valvole a tre, quattro e cinque bocche possono avere una terza posizione di funzionamento.

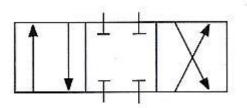


Figura 2.6 Valvola 4/3 Fonte: Slanzi oleodinamica

La posizione centrale può essere creata in modo da svolgere anche funzioni differenti. In figura 2.7 viene riportata una configurazione in cui la posizione centrale mette in scarico entrambi i rami di uscita della valvola e l'alimentazione risulta bloccata.



Figura 2.7 Valvola 4/3 Fonte: Irsara

Viene riportato un esempio di utilizzo di una valvola con tre posizioni di lavoro con differenti configurazioni: [1]

In figura 2.8 si può vedere una valvola 4/3 ad azionamento manuale con selettore. Nella prima configurazione (2.8a), la posizione centrale viene utilizzata per bloccare il cilindro nella posizione raggiunta; infatti tutte le bocche vengono oscurate.

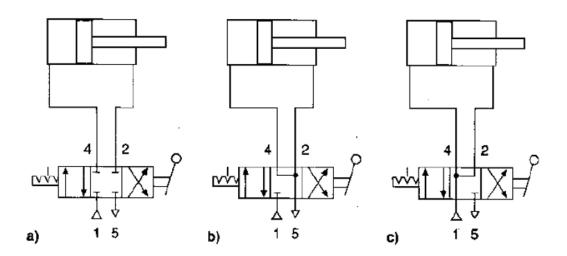


Figura 2.8 Esempio applicazione valvola 4/3 Fonte: [1]

Nella seconda configurazione (2.8b), la posizione centrale serve per collegare entrambe le uscite allo scarico e consente di svuotare tutte e due le camere del cilindro, per poter effettuare, ad esempio, operazioni di registrazione della posizione dello stelo.

Nella terza configurazione (2.8c), quando la valvola si trova in posizione centrale, vengono alimentate entrambe le uscite. Sulle due superfici dello stantuffo agirà la stessa pressione, ma siccome le due superfici hanno area differente ne risulterà che il cilindro si muoverà ma con velocità ridotta.

2.3 Valvole a cassetto e ad otturatore

Come visto nell'introduzione al capitolo 1, le valvole pneumatiche si possono dividere in base alla tipologia di corpo mobile. Avremo quindi valvole a cassetto e valvole ad otturatore.

Nelle valvole a cassetto, l'elemento mobile è formato da uno o più stantuffi uniti da un unico stelo passante che scorre all'interno di una sede cilindrica in cui sono presenti delle luci di passaggio collegate con le bocche esterne della valvola. Tra la superficie laterale dello stantuffo e la superficie del cilindro sono presenti delle tenute in grado di limitare le fughe d'aria, così come tra stelo e testata del cilindro. Un esempio di valvola a cassetto è visibile in figura 2.9.

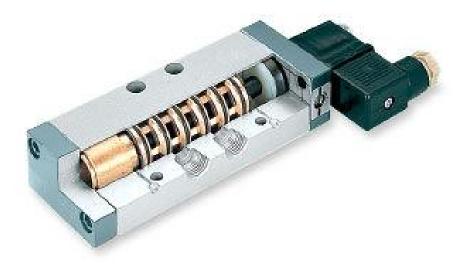
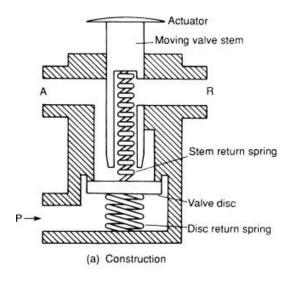


Figura 2.9 Valvola a cassetto Fonte: RITM Industry

In figura si può notare il cassetto che è in grado di scorrere all'interno della sede cilindrica e sono ben visibili le guarnizioni tra stantuffo e sede cilindrica.

Nelle valvole ad otturatore, l'elemento mobile è formato principalmente da uno stantuffo che si muove in direzione perpendicolare alla bocca di passaggio del fluido.



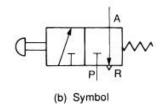


Figura 2.10 Valvola ad otturatore Fonte: ScienceDirect

Un esempio semplificato di valvola è visibile in figura 2.10. È rappresentata una valvola ad otturatore 3/2, monostabile, normalmente chiusa, ad azionamento manuale. Viene indicata con P l'alimentazione, R lo scarico e A l'utenza. Inizialmente l'utenza è collegata a scarico. Premendo sul pulsante si va prima a chiudere il passaggio tra utenza e scarico, quando il pulsante va a contatto con l'otturatore, e poi spostando verso il basso l'otturatore si va a mettere in collegamento l'alimentazione con l'utenza. Nel momento in cui viene tolta la pressione sul pulsante, il tutto ritorna in posizione iniziale grazie alla presenza delle molle.

L'otturatore può anche avere forma sferica, conica o troncoconica, in base alla tipologia di valvola e sede.

Come detto prima, la valvola in figura 2.10 è normalmente chiusa. I termini normalmente aperto e normalmente chiuso in pneumatica assumono significato diverso rispetto a ciò che rappresentano in campo elettrico. In pneumatica, il termine aperto indica un passaggio di aria e quindi trasmissione del segnale. In campo elettrico, un contatto si dice aperto quando rappresenta un'interruzione di segnale. Viceversa avviene per il termine "chiuso".

Le differenze principali tra valvole a cassetto e ad otturatore, stanno nelle diverse tipologie di tenuta. Nelle valvole a cassetto la pressione di alimentazione agisce in modo uniforme sulle facce dello stantuffo (si dice che sono bilanciate), in questo modo la commutazione può avvenire velocemente e in modo preciso. La forza di azionamento è praticamente costante e dipende solo dagli attriti delle guarnizioni. Uno dei difetti di queste valvole si ha nella forte usura delle guarnizioni che strisciano sulla superficie del cilindro.

Nelle valvole ad otturatore invece, la pressione di alimentazione agisce solo su un lato dello stantuffo, quindi per movimentare l'otturatore si avrà bisogno di forze più elevate che implicano anche una commutazione più difficoltosa. Variare la pressione di alimentazione significa variare le forze in gioco. Una dei vantaggi di queste valvole riguarda le guarnizioni; la tenuta avviene solo per contatto e non per strisciamento, quindi si usurano meno rispetto alle valvole a cassetto. Le valvole ad otturatore possono, inoltre, raggiungere dimensioni molto elevate con conseguente aumento della capacità di flusso. Nelle valvole a cassetto non si possono avere sezioni di passaggio troppo ampie perché altrimenti le guarnizioni durante lo strisciamento potrebbero danneggiarsi.

Dal punto di vista del tempo di risposta, le valvole ad otturatore possono essere più pronte se utilizzano una corsa molto breve.

2.4 Valvole a centri aperti e a centri chiusi

Una caratteristica importante delle valvole pneumatiche, indipendentemente dal fatto di essere a cassetto o ad otturatore, è quella di essere a centro aperto o a centro chiuso. In questo paragrafo ci concentriamo principalmente sui transitori, cioè sulle fasi di commutazione da una configurazione ad un'altra.

Supponiamo di avere una valvola a tre vie; si può dire che la valvola è a centri aperti se in un certo istante di tempo, durante il transitorio, le tre vie risultano tutte messe in collegamento. Viceversa, con una valvola a centri chiusi, durante la commutazione non avremo mai tutte e tre le vie collegate insieme.

Le prime hanno il problema principale che, essendoci un istante nel transitorio in cui l'alimentazione viene messa in scarico, si hanno delle perdite che devono essere compensate e il rischio che la perdita di pressione nell'utenza possa causare problemi di sicurezza. D'altro canto però queste valvole sono più semplici da realizzare e possono consentire passaggi di grandi portate d'aria.

In seguito vengono riportate una serie di valvole tratte dal Manuale di pneumatica, Belforte. [1]

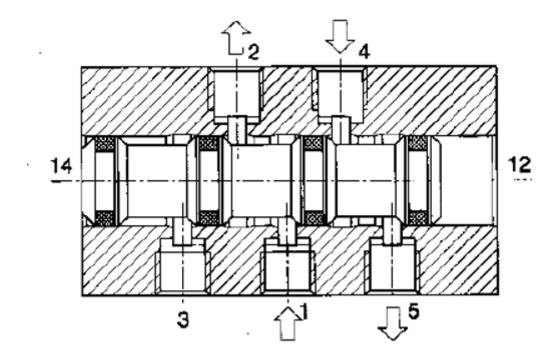


Figura 2.11 Valvola a cassetto a centri aperti Fonte: [1]

In figura 2.11 viene mostrata una valvola a cassetto a centri aperti. Si può notare infatti che la superficie laterale dello stantuffo è ridotta e di conseguenza, durante la commutazione della valvola, ci sarà un istante in cui l'alimentazione viene messa in collegamento con lo scarico 5 e l'utenza 4.

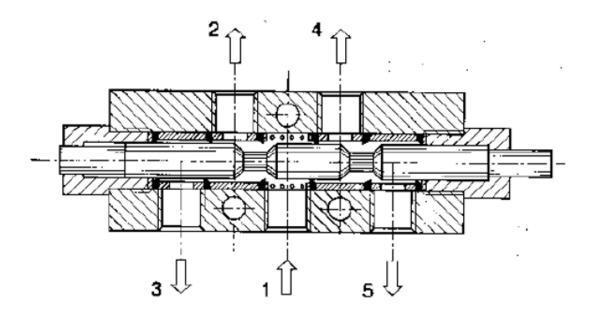


Figura 2.12 Valvola a cassetto a centri chiusi Fonte: [1]

In figura 2.12 invece abbiamo la stessa tipologia di valvola della precedente ma a centri chiusi. La valvola è a 5 bocche, monostabile ad azionamento meccanico tramite un'asta. Si può notare infatti la presenza di una superficie laterale dello stantuffo più elevata rispetto alla precedente, che evita quindi di mettere in collegamento più di due bocche contemporaneamente.

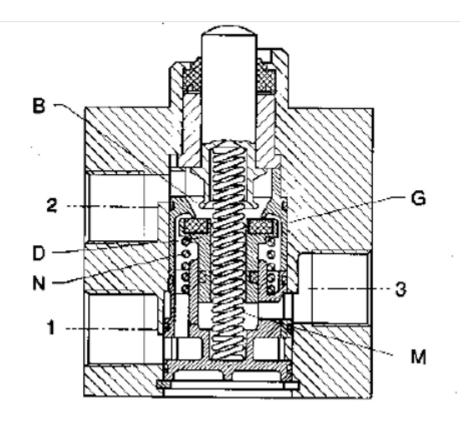


Figura 2.13 Valvola ad otturatore a tre bocche a centri chiusi Fonte: [1]

In figura 2.13 è presentata una valvola ad otturatore, normalmente chiusa e a centri chiusi. Indicando con 1 l'alimentazione, 2 l'utenza e 3 lo scarico, nella fase iniziale l'alimentazione è bloccata e l'utenza viene messa in scarico tramite il condotto all'interno del quale viene inserita la molla. Azionando la commutazione della valvola avremo una prima fase in cui il pulsante va a battuta con l'otturatore andando a chiudere il passaggio tra utenza e scarico. In questa fase tutte le bocche sono isolate. Premendo ancora il pulsante, verrà spostato verso il basso l'otturatore aprendo quindi il passaggio tra alimentazione e utenza.

2.5 Azionamenti delle valvole

Come riportato ad inizio capitolo, le valvole pneumatiche si possono suddividere in base alla tipologia di azionamento: muscolare diretto (effettuato da una persona fisica), meccanico, pneumatico, elettrico. Le valvole ad azionamento muscolare diretto vengono utilizzate quando è necessaria l'attivazione da parte di un operatore; ad esempio nel caso in cui ci siano pulsanti di emergenza, per lo scarico rapido del sistema.

Le valvole ad azionamento meccanico sono comandate da camme, leve, finecorsa, aste di cilindri, oggetti, ecc. Sono destinate a fornire segnali di consenso e di sicurezza indispensabili per lo svolgimento di cicli automatici. Le valvole a comando pneumatico hanno la caratteristica che la commutazione avviene in presenza di un segnale pneumatico con una certa pressione. Le valvole ad azionamento elettrico rappresentano un'interfaccia tra sistemi elettrici e pneumatici. Infatti la commutazione avviene in presenza di un segnale elettrico in ingresso. Sono molto utilizzate per sistemi automatici perché presentano tempi di commutazione ridotti e quindi frequenze di lavoro elevate.

In tutti questi azionamenti, la posiziona raggiunta è determinata da un equilibrio tra le forze di comando, le forze del fluido e le reazioni vincolari che vengono esercitate dagli organi traslanti.

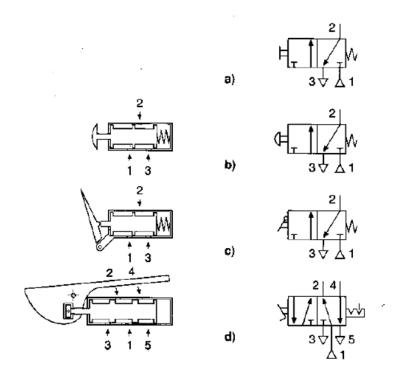


Figura 2.14 Esempi di azionamenti muscolari diretti Fonte: [1]

In figura 2.14 possiamo vedere alcuni esempi di valvole ad azionamento muscolare diretto. In particolare avremo un azionamento a pulsante (a e b), a leva (c) e a pedale (d). Nella colonna di sinistra sono visibili costruttivamente gli azionamenti sopra citati. Le valvole a, b e c sono di tipo monostabile perché presentano una molla che contrasta la forza esterna dell'operatore, riportando nella posizione iniziale la valvola una volta che viene a mancare la forza esterna. La valvola d, invece, presenta un selezionatore quindi sarà bistabile. Il simbolo di una valvola deve sempre rappresentare la posizione libera che si avrebbe inizialmente senza azionamento, in una valvola monostabile quindi i collegamenti con alimentazione, scarico e utenza dovranno essere disegnati sulla configurazione di riposo, cioè quella più vicina alla molla.

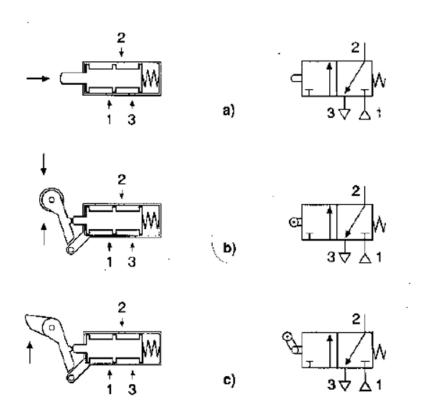


Figura 2.15 Esempio di azionamento meccanico Fonte: [1]

In figura 2.15 sono rappresentati alcuni esempi di valvole ad azionamento meccanico; nello specifico si ha azionamento a puntale (a), a leva e rullo (b) e a salterello (c). La differenza tra la configurazione b e c, sta nel fatto che con il rullo l'attivazione della valvola avviene in modo bidirezionale, invece con il salterello l'azionamento si ha con una direzione preferenziale.

In figura 2.16 sono presenti valvole ad azionamento pneumatico, nello specifico: monostabile con ritorno a molla (a), monostabile con ritorno pneumatico (b) e bistabile (c). Il comando può avvenire in tre modi: con segnale di pressione continuo, con impulsi di pressione e con svuotamento delle camere di comando (comando negativo o comando a mancanza di pressione). Il primo caso corrisponde all'azionamento di valvole monostabili (a e b), mentre il secondo corrisponde a quello di valvole bistabili (c). Il comando con scarico si realizza su apposite valvole i cui condotti di comando sono normalmente chiusi e vengono aperti all'atmosfera quando si vuole avere la commutazione.

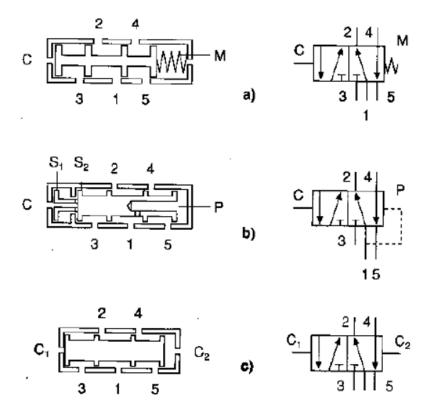


Figura 2.16 Esempi di valvole ad azionamento pneumatico Fonte: [1]

Come si vede in figura 2.16b, la pressione di alimentazione applicata al condotto 1 è riportata, attraverso un foro di collegamento interno al cassetto, alla camera di polarizzazione P. Per consentire il comando, il segnale C deve superare il segnale di polarizzazione. Il cassetto presenta allora sul lato del comando una doppia superficie di spinta; la pressione di comando agisce sia sulla superficie esterna dello stantuffo S1, sia sulla superficie anulare di S2 grazie a un foro di connessione praticato nel cassetto stesso.

Le valvole bistabili ad azionamento pneumatico possono essere con comando in pressione o in depressione. Le prime sono più utilizzate perché, in caso di guasto (rottura di tubazioni), non si hanno dei segnali di comando non voluti. Un esempio di valvola con comando in depressione si può vedere in figura 2.17.

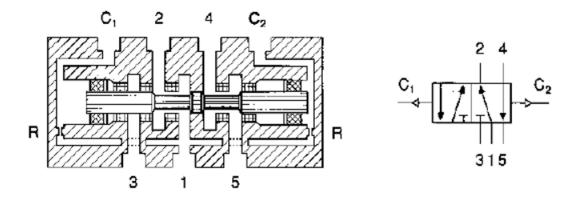


Figura 2.17 Valvola con comando a depressione Fonte: [1]

In questo tipo di valvola, solitamente i condotti C1 e C2 sono collegati ad una valvola 2/2 monostabile normalmente chiusa, in modo che il condotto venga messo a scarico (e quindi ci sia la commutazione della valvola in figura) nel momento in cui venga azionata la valvola a 2 vie. Le strozzature R, in figura, sono necessarie per evitare di collegare a scarico l'alimentazione una volta azionata la valvola 2/2, mettendo a scarico solo la camera tra R e C1 (o C2) e non tutto il condotto di alimentazione.

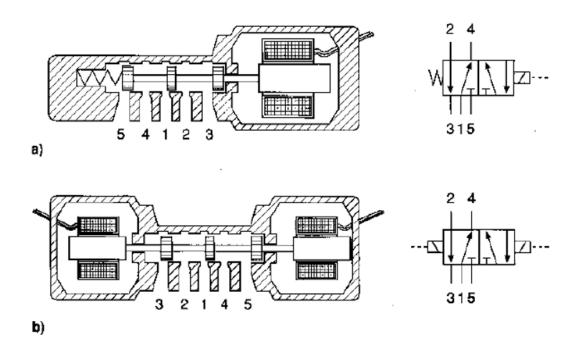


Figura 2.18 Valvole ad azionamento elettrico Fonte: [1]

In figura 2.18 sono presentate due valvole ad azionamento elettrico: monostabile (a) e bistabile (b). Le valvole ad azionamento elettrico, dette anche elettrovalvole, commutano, per lo più, mediante segnali elettrici che agiscono su elettromagneti in

grado di attrarre nuclei magnetizzabili collegati coi cassetti o gli otturatori delle valvole.



Figura 2.19 Esempio di valvola a comando pneumatico Fonte: Janatics



Figura 2.20 Esempio di elettrovalvola monostabile Fonte: Airtac

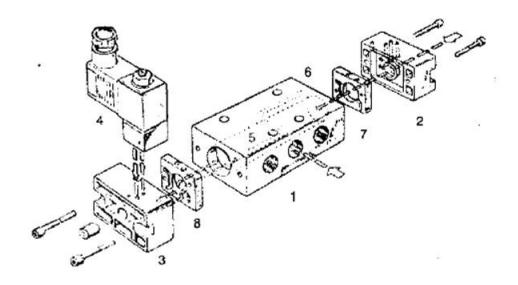


Figura 2.21 Esploso di una valvola pneumatica Fonte: [1]

In figura 2.21 è riportata la vista esplosa di una valvola il cui modulo centrale 1, che contiene il cassetto, è collegato a destra a una testata ad azionamento pneumatico 2 e a sinistra ad una testata ad azionamento elettrico 3. Quest'ultima comprende un'elettrovalvola pilota 4, utilizzata per ridurre le potenze elettriche in gioco e che richiede una propria linea di alimentazione. A tale scopo il nucleo centrale è predisposto con due linee 5 e 6 derivate dall'alimentazione e utilizzabili nelle testate. Le guarnizioni 7 e 8, fornite di opportune forature e centraggi, permettono l'adattamento del corpo base della valvola alle testate.

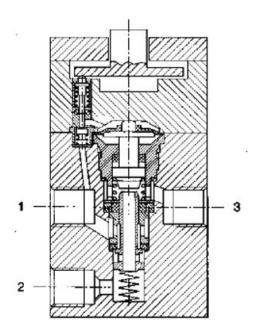


Figura 2.22 Valvola con servopilotaggio Fonte: [1]

In presenza di azionamenti a bassa potenza è necessario utilizzare delle interfacce che permettano di trasformare un segnale in bassa potenza in un segnale adatto a commutare una valvola. In figura 2.22 è mostrata la sezione di una valvola pneumatica a tre bocche con servopilotaggio costituito da una piccola valvola a tre bocche che aziona la camera di comando della valvola principale. Date le ridotte dimensioni della valvola pilota, sono richieste forze di comando (manuali o meccaniche) estremamente basse. La valvola è del tipo a centri chiusi. La presenza di un pilotaggio viene indicato con appositi simboli.

In figura 2.23a è mostrato il generico simbolo di amplificazione, che viene poi adattato al particolare tipo di azionamento: manuale (fig. 2.23b), meccanico (fig. 2.23c) pneumatico (fig. 2.23d) ed elettrico (fig. 2.23e).

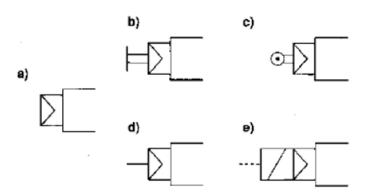


Figura 2.23 Simboli di comandi con amplificazione Fonte: [1]

3 Tempo di risposta delle valvole pneumatiche

Il tempo di risposta e la conseguente frequenza di lavoro di una valvola pneumatica è diventato un fattore molto importante per la realizzazione di impianti automatici. Lo sviluppo di questa trattazione è la conferma di ciò che l'industria richiede. In fase di progettazione di un impianto automatico, i dati relativi alla frequenza di commutazione di una valvola, sono estremamente importanti e necessari per raggiungere il livello di automazione richiesto dall'azienda.

Per valutare il tempo di risposta di una valvola pneumatica è necessario disporre di un banco prova realizzato seguendo le corrette normative disponibili. La normativa presa in considerazione in questa trattazione sarà la norma ISO 12238 (Pneumatic fluid power — Directional control valves — Measurement of shifting time), in cui è definito il tempo che deve essere misurato, il circuito di prova e le modalità di esecuzione. Il contenuto specifico di questa normativa, verrà illustrato nel paragrafo seguente.

Il tempo di risposta di una valvola pneumatica si ottiene mediante prove di comando con segnale a gradino in ingresso; dando, o togliendo, segnale all'azionamento di una valvola, si registra il tempo di ritardo di attivazione, o disattivazione, della valvola stessa. Ovviamente il tempo di risposta sarà strettamente legato con la frequenza massima di lavoro in modo inversamente proporzionale; infatti minore sarà il tempo di risposta, maggiore sarà la frequenza di lavoro.

3.1 Normativa ISO 12238

La normativa ISO 12238 definisce il significato di tempo di risposta (shifting time) di una valvola pneumatica e stabilisce una modalità di test accurata e ripetibile in modo da ottenere una misura univoca. La normativa può essere applicata a valvole monostabili o bistabili, con 2 o 3 posizioni di lavoro e azionate in modo elettrico o pneumatico.

La normativa ISO 12238 prende spunto dalle seguenti normative:

- ISO 1000, SI units and recommendations for the use of their multiples and of certain other units.
- ISO 1219-1, Fluid power systems and components Graphical symbols and circuit diagrams — Part 1: Graphical symbols for conventional use and dataprocessing applications.
- ISO 5598, Fluid power systems and components Vocabulary.
- ISO 6358-1:2013, Pneumatic fluid power Determination of flow-rate characteristics of components using compressible fluids — Part 1: General rules and test methods for steady-state flow

Il tempo di risposta di una valvola pneumatica viene definito come l'intervallo di tempo che intercorre tra il cambiamento del segnale di controllo (elettrico o pneumatico) e l'istante in cui la pressione di uscita associata cambia del 10% rispetto a un valore specificato. La misura deve essere fatta mediante trasduttori di pressione di adeguate caratteristiche dinamiche.

In base all'azionamento della valvola avremo quindi due diverse tipologie di circuito di prova per la misura del tempo di risposta.

3.1.1 Circuito per una valvola ad azionamento elettrico

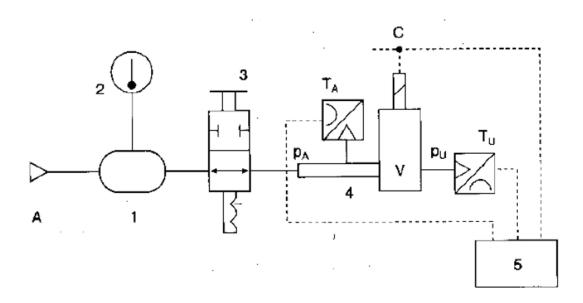


Figura 3.1 Circuito valvola ad azionamento elettrico Fonte: [1]

Nel circuito mostrato in figura 3.1, vengono presentati i seguenti componenti:

- 1. Serbatoio
- 2. Termometro
- 3. Valvola 2/2 a comando manuale (opzionale)
- 4. Tubo di misura di pressione previsto dalla norma ISO 6358
- 5. Sistema di acquisizione dati

La valvola di prova V è comandata elettricamente dal segnale C. Particolarmente importante è garantire che la pressione di alimentazione non vari troppo durante la prova. In corrispondenza dell'apertura della valvola questa pressione può, infatti, abbassarsi disturbando i segnali di controllo e alterando le condizioni di prova. Viene pertanto richiesta la presenza di un serbatoio 1 di dimensioni adeguate, la cui temperatura è misurata dal termometro 2. Vi è poi una valvola di intercettazione 3, opzionale, che può facilitare la gestione del circuito. Il trasduttore di pressione Ta posto a monte della valvola, misura la pressione di alimentazione durante la prova e serve a verificare che questa non scenda oltre il 3% del valore fissato. Naturalmente il trasduttore deve essere collocato su un apposito tubo di misura 4; a tale scopo, si usano gli stessi tubi di misura della pressione previsti dalla norma 1SO 6358.

La pressione di uscita pu è misurata dal trasduttore Tu collegato sulla bocca di uscita della valvola in prova. Il segnale di comando C, il segnale di uscita pu e la pressione di alimentazione pA sono registrate da un sistema di acquisizione 5. Se il segnale è in corrente alternata, occorre garantire che il segnale di comando inizi dal valore di tensione nulla, per cui è necessario un apposito sistema di gestione elettrico; con corrente continua non è necessario alcun particolare accorgimento.

I trasduttori di pressione, gli amplificatori e i dispositivi di registrazione insieme devono avere una banda passante non minore dei 2000 Hz e un tempo di lettura inferiore a 0,1 ms. Inoltre gli errori del tempo di risposta causati da picchi di tensione negativi dovuti all'apparecchiatura di test non devono superare 0,1 ms.

La temperatura del fluido all'interno del serbatoio deve stare tra i 18°C e i 30°C.

In figura 3.2 si possono osservare i risultati ottenuti durante la prova eseguita con il circuito illustrato in figura 3.1. Vengono mostrati gli andamenti della tensione di comando Vc (caso di corrente continua e con corrente alternata), della pressione in uscita dalla valvola di prova pu e della pressione di alimentazione pa. Viene applicato un segnale di comando a gradino positivo e negativo, per calcolare sia il tempo di attivazione che di disattivazione. Si può notare che nel caso di corrente alternata, l'istante iniziale di misura deve corrispondere ad una tensione Vc pari a zero.

Dal grafico si può osservare che nel momento in cui la valvola si attiva o disattiva si ha una piccola caduta di pressione di alimentazione, che si stabilisce quando la pressione di uscita raggiunge il regime.

Il tempo di riempimento, o tempo di attivazione t1, è definito come l'intervallo di tempo tra l'applicazione del segnale elettrico e l'istante in cui la pressione d'uscita pu raggiunge il 10% del regime, cioè la pressione di alimentazione pa.

Il tempo di svuotamento, o tempo di disattivazione t2, è definito come l'intervallo di tempo tra la rimozione del segnale di comando e l'istante di tempo in cui la pu raggiunge il 90% del regime pa.

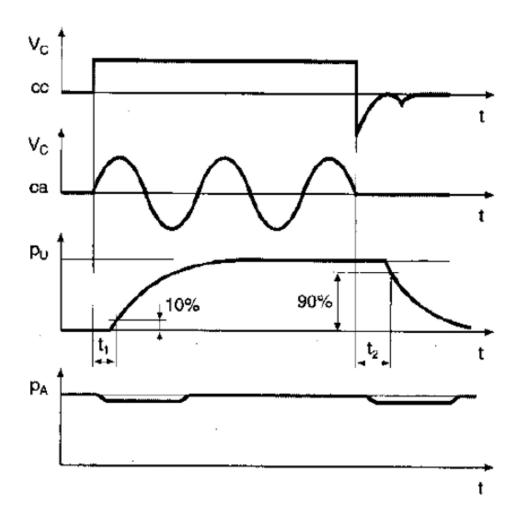


Figura 3.2 Risposta ad un gradino positivo e negativo con valvole a comando elettrico Fonte: [1]

3.1.2 Circuito per una valvola ad azionamento pneumatico

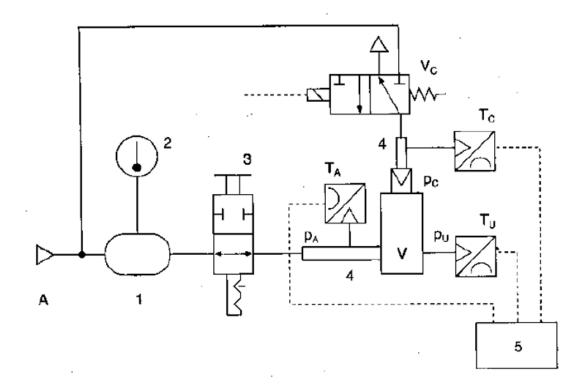


Figura 3.3 Circuito per una valvola ad azionamento pneumatico Fonte: [1]

Nel circuito mostrato in figura 3.3, vengono presentati i seguenti componenti:

- 1. Serbatoio
- 2. Termometro
- 3. Valvola 2/2 a comando manuale (opzionale)
- 4. Tubo di misura di pressione previsto dalla norma ISO 6358
- 5. Sistema di acquisizione dati

Rispetto al circuito precedente, la valvola di prova V è azionata in pressione da una elettrovalvola Vc ON/OFF monostabile normalmente chiusa che riceve un comando elettrico esterno. L'alimentazione dell'elettrovalvola che corrisponde alla pressione pc di comando della valvola V è la stessa dell'alimentazione della valvola di prova V. Inoltre la pressione pc deve essere molto più grande della pressione di commutazione minima della valvola di prova. La pressione di comando pc viene misurata da un trasduttore di pressione pc. I dati di pressione pa, pu e pc vengono elaborati dal sistema di acquisizione. Anche in questo caso si usano tubi di misura della pressione standardizzati (4) sia per la misura di pa che di pc.

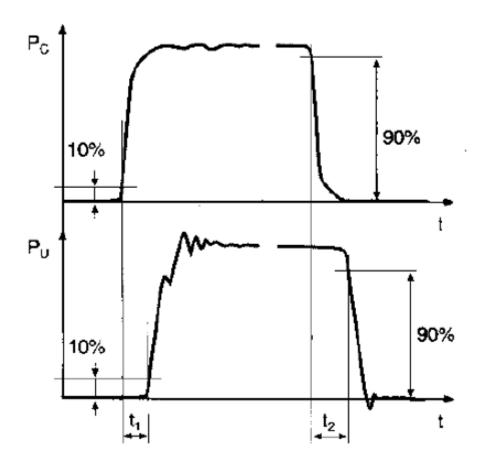


Figura 3.4 Risposta a un gradino positivo e negativo con valvola a comando pneumatico Fonte: [1] In figura 3.4 si possono osservare i risultati ottenuti dalla prova utilizzando il circuito in figura 3.3. Vengono rappresentati gli andamenti della pressione di comando della

valvola pc e della pressione in uscita dalla valvola pu.

Il tempo di riempimento t1, viene definito come l'intervallo di tempo che intercorre tra l'istante in cui la pressione pc raggiunge il 10% del regime (pari alla pressione pa per come è stato realizzato il circuito), e l'istante in cui la pressione pu raggiunge il 10% del regime pari a pa.

Analogamente, il tempo di svuotamento t2, viene definito come l'intervallo di tempo tra l'istante in cui la pressione pc raggiunge il 90% del regime e l'istante in cui la pressione pu raggiunge il 90% di pa.

È chiaro come, per entrambe le prove, sia necessario seguire le procedure illustrate dalla normativa, per ottenere dei risultati ottimali.

Per una valvola pneumatica bistabile occorre seguire una procedura diversa per il calcolo del tempo di disattivazione della valvola. Infatti esso viene definito come l'intervallo di tempo tra l'istante in cui la pressione pc raggiunge il 10% del regime e l'istante in cui la pressione pu raggiunge il 90% di pa., come visibile nella seguente figura.

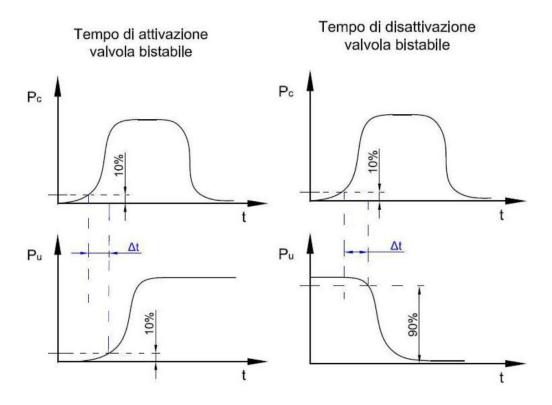


Figura 3.5 Tempi di attivazione e disattivazione per una valvola bistabile

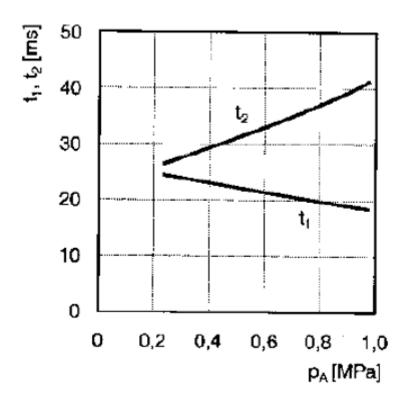


Figura 3.6 Tempi di commutazione di valvole pneumatiche Fonte: [1]

In figura 3.6 vengono riportati i tempi di attivazione t1 e disattivazione t2, al variare della pressione di alimentazione p_A per una valvola da 1/4" monostabile, con ritorno a molla e azionata in modo pneumatico. Si nota come con una pressione di alimentazione non elevata, i tempi t1 e t2 siano molto vicini tra loro; ma all'aumentare dell'alimentazione il tempo t1 diminuisce perché la pressione di comando è aumentata e quindi viene esercitata una forza maggiore sullo stantuffo in apertura, anche perché la molla esercita sempre la stessa forza. Di contro però, il tempo t2 sarà più elevato perché la molla farà più "fatica" a contrastare la pressione di comando p_C . Quindi nella progettazione di un impianto bisogna anche tener conto di come la pressione di comando influisce sulle caratteristiche dinamiche di una valvola. Valori tipici di tempi di risposta si aggirano intorno ai 20/30 ms; con valvole di piccole dimensioni si possono raggiungere anche i 5/10 ms.

Come detto in precedenza, il tempo di risposta è utile per valutare la frequenza di lavoro di una valvola. La frequenza di lavoro, però, può essere maggiore di quella calcolata utilizzando i tempi di risposta perché in ambiente lavorativo si potrebbe avere la necessità di commutare la valvola anche senza attendere il tempo necessario

a sviluppare per intero il segnale di uscita. In ogni caso è bene tenere presente che con i segnali di comando pneumatici le frequenze sono limitate dalla necessità di svuotare i tubi. Con le valvole a comando elettrico i problemi sono minori perché questo comando non è influenzato dal montaggio del circuito, come capita invece coi componenti a comando pneumatico, in cui allungare le lunghezze dei tubi di comando vuole dire aumentare i tempi di risposta. Le frequenze massime di lavoro delle valvole variano anche in rapporto alle loro dimensioni. In genere, poi, valvole col doppio azionamento sono più veloci delle valvole col ritorno a molla. Le frequenze di operazione di valvole a comando pneumatico variano da 250 cicli/min, per valvole di grossa dimensione, a valori medi di 400 - 600 cicli/min, fino a valori di circa 800-1000 cicli/min. [1]

In valvole a comando meccanico si raggiungono facilmente frequenze di lavoro di 1000 cicli/min. Con usuali elettrovalvole le frequenze di lavoro sono dell'ordine di 1000 - 2000 cicli/min. Con elettrovalvole ad alta dinamica si può operare con tempi di risposta dell'ordine del ms, utilizzando, in particolare, tecniche di comando che usano un segnale elettrico con corrente elevata (anche unità di A) per tempi molto ridotti (pochi ms) e riducendo subito dopo la corrente applicata (tecnica di comando con speed up). Con queste valvole si ottengono frequenze molto elevate, fino a circa 100 - 200 Hz. [1]

3.1.3 Tubi per la misura della pressione

Il tubo per la misurazione della pressione deve essere dritto e deve collegarsi direttamente alla porta di ingresso della valvola, realizzato secondo la norma 5.5 ISO 6358:1989. Le filettature dei tubi e della valvola devono corrispondere per poter effettuare un buon collegamento.

3.1.4 Trasduttori di pressione

I trasduttori di pressione devono essere applicati all'uscita e all'ingresso della valvola di prova. Nel caso di una valvola pilotata in pressione deve essere presente anche un trasduttore all'ingresso del pilotaggio. Il trasduttore viene montato sul tubo di misurazione collegato direttamente alla valvola. Utilizzare trasduttori di pressione,

amplificatori e dispositivi di registrazione che insieme hanno una risposta in frequenza entro i 2000Hz a -3 dB e un tempo di risoluzione minore di 0,1 ms.

I cambiamenti del tempo di risposta causati dalla limitazione dei picchi negativi di tensione dovuti all'apparecchiatura di prova non devono superare 0,1 ms.

3.1.5 Serbatoio

Il serbatoio deve avere una capacità sufficiente affinché la caduta di pressione nei tubi durante la prova non superi il 3% della pressione di alimentazione. È ammessa una caduta maggiore ma questo farà aumentare il tempo di commutazione della valvola. Il serbatoio deve predisporre una porta per la misurazione della temperatura.

Le valvole di pilotaggio e di alimentazione (opzionale) devono essere disposte il più vicino possibile all'uscita del serbatoio. È necessario utilizzare una valvola la cui area di flusso sia maggiore di quella del tubo di misurazione della pressione, perché una valvola più piccola può limitare il flusso e aumentare il tempo di risposta.

3.1.6 Segnale di controllo

Per elettrovalvole a corrente alternata, è necessario generare il segnale di controllo con un trigger impostato in modo che il segnale venga attivato con tensione nulla. Mantenere la tensione del segnale entro il ±5% della tensione nominale. Per elettrovalvole a corrente continua, la tensione di regime deve stare nell'intervallo di ±5% della tensione nominale.

Per valvole ad azionamento pneumatico (figura 3.3), mantenere la pressione di pilotaggio alla stessa pressione presente nel serbatoio di alimentazione o alla massima pressione di pilotaggio consentita dalla valvola a seconda di quale valore sia inferiore.

3.1.7 Sistema di acquisizione dati

Durante una prova è necessario registrare le variazioni di pressione in funzione del tempo di tutti i trasduttori presenti nel sistema.

3.1.8 Accuratezza del test

In tabella 3.1 vengono mostrati gli errori sistematici permessi dalla normativa per le diverse grandezze.

Parametri di misura	Errore sistematico	
Pressione	± 10 kPa (± 0,1 bar)	
Temperatura	± 2 °C	
Tempo	± 4 ms	

Tabella 3.1 Accuratezza del test Fonte: [2, 3]

3.1.9 Procedura di test

- Realizzare il circuito di figura 3.1 o 3.3, con i componenti specificati in precedenza.
- Per misurare il tempo di attivazione della valvola bisogna seguire la seguente procedura: mantenere il serbatoio ad una pressione di 630 kPa (6,3 bar) o alla massima pressione consentita dalla valvola (valore minore tra i due); collegare l'uscita della valvola alla pressione atmosferica; mantenere la temperatura del fluido nel serbatoio tra i 18 °C e i 30 °C; eseguire alcune commutazioni preliminari agendo sul solenoide o sul pilotaggio in pressione; eseguire tre prove di misura, sfiatando la porta di uscita ogni volta e aspettando almeno un minuto prima di seguire il test successivo per stabilizzare la pressione.
- Per misurare il tempo di disattivazione della valvola bisogna seguire la seguente procedura: mantenere il serbatoio ad una pressione di 630 kPa (6,3 bar) o alla massima pressione consentita dalla valvola (valore minore tra i due); mantenere la temperatura del fluido nel serbatoio tra i 18 °C e i 30 °C; eseguire alcune commutazioni preliminari agendo sul solenoide o sul pilotaggio in pressione; eseguire tre prove di misura, sfiatando la porta di uscita ogni volta e aspettando almeno un minuto prima di seguire il test successivo per stabilizzare la pressione.
- Le due prove di misura del tempo di attivazione e disattivazione della valvola possono essere eseguite in sequenza.

- Indicare con t₀ l'istante di tempo in cui c'è il cambiamento di tensione nelle elettrovalvole o l'istante in cui si raggiunge una variazione del 10% rispetto alla pressione di alimentazione nelle valvole pilotate in pressione.
- Il tempo di attivazione viene misurato come intervallo tra il tempo t₀ e
 l'istante in cui la pressione in uscita raggiunge il 10% della pressione del serbatoio. Eseguire diverse prove e calcolare la media dei tempi ottenuti.
- Il tempo di disattivazione viene misurato come intervallo tra il tempo t₀ e
 l'istante in cui la pressione in uscita raggiunge il 90% della pressione del serbatoio. Eseguire diverse prove e calcolare la media dei tempi ottenuti.

3.2 Normativa ISO 6358-1 2013

La normativa ISO 6358 viene utilizzata per definire la procedura di test per il calcolo della portata attraverso dei tubi sapendo le cadute di pressione all'interno dei tubi stessi. Il paragrafo 5.4 di questa normativa descrive le caratteristiche del tubo di misura della pressione che verrà utilizzato anche in questa trattazione. Viene utilizzato un tubo di misura come quello mostrato in figura 3.7.

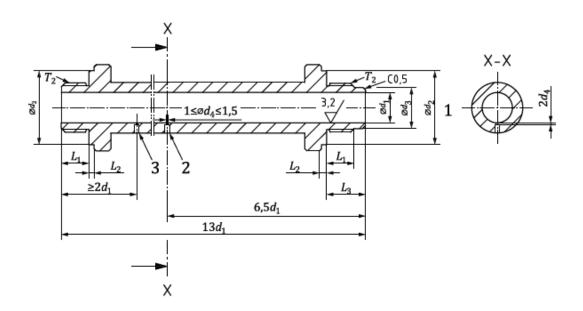


Figura 3.7 Sezione tubo di misura della pressione Fonte: [3]

- 1. Parte di tubo che si collega al connettore
- 2. Foro per l'inserimento del sensore di pressione
- 3. Foro per l'eventuale inserimento del sensore di temperatura

Il tubo deve essere dritto, con una superficie interna circolare liscia e un diametro costante per tutta la sua lunghezza. Gli assi dei fori, predisposti per l'utilizzo dei sensori, devono essere perpendicolari all'asse del tubo. Non devono esserci ostruzioni o collegamenti di derivazione diversa da quella indicata in figura 3.7.

T ₂	d ₁	d ₂		d ₃	L ₁		L ₁		L ₁ L ₂	L ₃	
"2	min	uz	nom	toll	nom	toll	LZ	nom	toll		
G 1/8	6	14.5	8	-0.040			5.5	0	1	7.5	0
G 1/8	0	14.5	0	-0.076	5.5	-0.2	1	7.5	-0.4		
G 1/4	0	9 18.5	11	-0.050	6.5	0	1.5	9.5	0		
01/4	9	10.5	11	-0.093	0.5	-0.4	1.5	9.5	-0.4		
G 3/8	125	22.5	14.5	-0.050 -0.093	75	0	1.5	10.5	0		
0 3/8	12.5	22.5			7.5	-0.4	1.5	10.5	-0.4		
G 1/2	16	26.5	18	-0.050	9	0	1.5	12	0		
01/2				-0.093	9	-0.4	1.5	12	-0.4		
G 3/4	22	32.5	24	-0.065	10.5	0	1.5	13.5	0		
0 3/4	22	32.3	24	-0.117		-0.4	1.5	13.5	-0.4		
G 1	28	39	30	-0.065	11.5	0	1.5	14.5	0		
G I	20	39	30	-0.117	11.5	-0.4			-0.4		
G 1 1/4	36	49	38	-0.080	16.5	0	2.5	21.5	0		
011/4	30	43	36	-0.142	10.5	10.5	16.5	-0.4	2.5	21.5	-0.4
G 1 1/2	42	55	44.5	-0.080	17.5	0	2.5	22.5	0		
011/2	42	33	44.5	-0.142	17.5	-0.4	2.5	22.5	-0.4		
G 2	53	68	56	-0.100	19.5	0	2.5	24.5	0		
G Z	J3	UO	50	-0.174	13.3	19.5	-0.4	2.5	24.5	-0.4	
G 2 1/2	68	80	72	-0.100	23	0	3	29	0		
0 2 1/2	00	30	/2	-0.174		23	-0.4	3	23	-0.4	
G 3	6.3	1 91 84.5	-0.120	25 5	25.5	0	3	31.5	0		
0.3	81	ЭΙ	04.3	-0.207		-0.4	.	31.3	-0.6		

Tabella 3.2 Dimensioni tipiche dei tubi di misura Fonte: [3]

In tabella 3.2 sono visibili alcune dimensioni caratteristiche del tubo di misura rappresentato in figura 3.7. Le grandezze sono espresse in millimetri.

Per collegare il tubo di misura della pressione ad altri componenti con filettature diverse, viene utilizzato un connettore/riduttore visibile in figura 3.8.

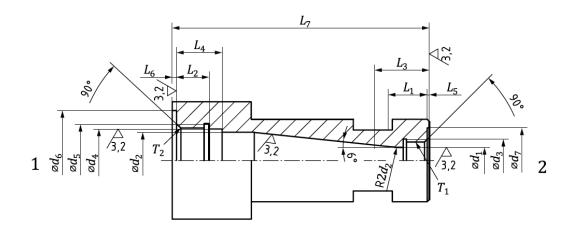


Figura 3.8 Sezione del connettore Fonte: [3]

- 1. Porta di collegamento con il tubo di misura
- 2. Porta di collegamento con la valvola

Il connettore deve essere realizzato in acciaio INOX o in acciaio al carbonio e la massima coppia applicata deve essere il doppio dei valori di coppia presenti nella normativa ISO 16030 (per filettature M3, M5 e M7 i valori di coppia dovranno essere rispettivamente 0.6 Nm, 1.6 Nm e 4 Nm). Per le dimensioni caratteristiche dei connettori si fa riferimento alla tabella 6 della normativa ISO 6358-1:2013.

4 Descrizione componenti impianto

Come detto in precedenza, in questo studio si andranno a progettare tre tipologie di banchi prova per la misura del tempo di risposta di una valvola pneumatica. Due banchi vengono utilizzati per la misura del tempo di risposta relativo ad una valvola pneumatica a comando pneumatico ma con dimensioni differenti (1/4" e 1/2"), il terzo banco invece utilizza come valvola di prova una valvola pneumatica a comando elettrico.

Si è scelto di progettare tre banchi con caratteristiche diverse per poter ottenere dei risultati sperimentali validi con ogni tipologia di valvola. Nei paragrafi seguenti si dimostra infatti che per passare da un banco ad un altro basta cambiare pochi componenti, quindi si ha una certa flessibilità nella sperimentazione.

La progettazione di ogni banco è stata eseguita seguendo le linee guida illustrate dalla normativa ISO 12238, descritta in modo esaustivo nei paragrafi precedenti.

In seguito verranno mostrati nello specifico i vari componenti di ogni impianto con una breve descrizione di essi ed una rappresentazione 3D realizzata con Solidworks. Per evitare inutili ripetizioni, i componenti comuni tra i vari impianti vengono illustrati solamente in una sola occasione.

Le tavole degli assiemi dei tre impianti sono disponibili in fondo nella sezione "Allegati".

4.1 Primo banco

Il primo banco è stato progettato per ospitare una valvola di prova di tipo pneumatico 5/2, a cassetto con pilotaggio pneumatico 1/4". Questa tipologia di impianto sarà poi effettivamente quella realizzata fisicamente in laboratorio, ma come illustrato in seguito, cambiando pochi componenti si possono realizzare banchi per la misura del tempo di risposta per svariate valvole.

Nella seguente figura vengono mostrati nel dettaglio gli schemi dei circuiti presenti nel banco prova 1 (circuito elettrico, pneumatico e acquisizione dati)

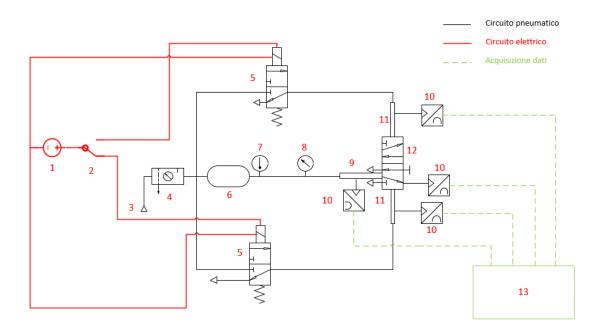


Figura 4.1 Schema circuito banco 1

1	Alimentatore 24 V DC			
2	Interruttore switch			
_	Alimentazione			
3	pneumatica			
4	Gruppo FRL			
-	Elettrovalvola di			
5	pilotaggio			
6	Serbatoio			
7	Termometro			
8	Manometro			
9	Tubo ISO 6358 1/4"			
10	Trasduttore di pressione			
11	Tubo ISO 6358 1/8"			
12	Valvola di prova			
13	Sistema di acquisizione dati/ Oscilloscopio			

Tabella 4.1 Descrizione elementi banco prova

Nelle seguenti immagini vengono mostrate le viste d'assieme relative al banco 1 realizzate con Solidworks.

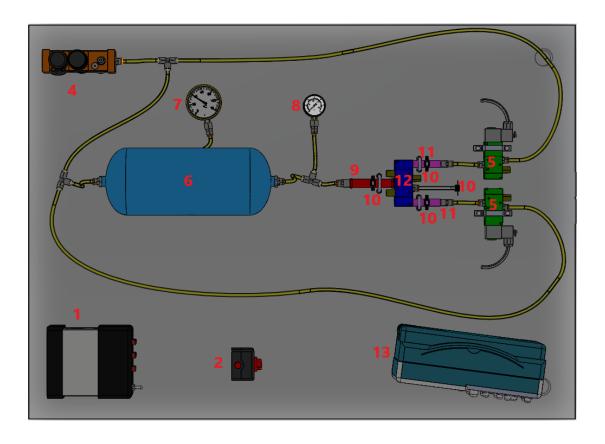


Figura 4.2 Assieme banco 1, Vista dall'alto

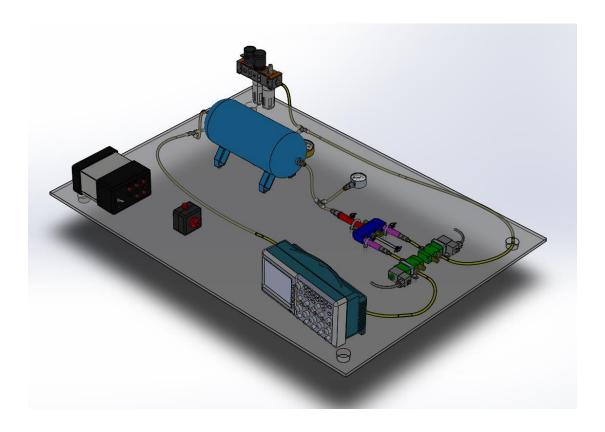


Figura 4.3 Assieme banco 1, Vista isometrica

Nella seguente tabella vengono visualizzati nello specifico tutti i componenti necessari per la composizione del banco 1, con il rispettivo nome, marca, descrizione, codice prodotto per l'acquisto e quantità del componente presente nell'impianto.

Componente	Marca	Descrizione	Codice	Quantità
Piano di lavoro in plexiglass		900mm x 1250mm		1
Oscilloscopio				1
Alimentatore		24V DC		1
Interrutore switch				1
Gruppo FRL	Metalwork	FRL 100 1/4 20 08 RMSA	3282008	1
Raccordo	Metalwork	Raccordo automatico 8 mm in ottone maschio 1/4"	2L01010	9

Serbatoio	Baglioni	5 litri	VEC01294	1
Raccordo	Metalwork	Riduzione MF cilindrica 1/2"-1/4"	2151004	2
Elettrovalvola di pilotaggio	Metalwork	3/2 monostabile 1/4"	7020020200	2
Raccordo	Metalwork	Curva 90° MF 1/4''	2110002	1
Valvola di prova	Metalwork	5/2 bistabile 1/4" comando pneumatico serie 70	7020011200	1
Manometro		0-12 bar		1
Tubo di misura della pressione		MM 1/4" ISO 6358		1
Raccordo	Metalwork	Raccordo a T ottone 8mm	2L05004	3
Termometro		0-120°C		1
Tubo di misura della pressione		MM 1/8" ISO 6358		2
Raccordo	Metalwork	Raccordo automatico 8 mm in ottone femmina 1/4"	2L02008	3
Silenziatore	Metalwork	MW SC 1/4"	W0970530003	5
Trasduttore di pressione	Honeywell	0-150 psi	40PC150G2A	4
Raccordo	Metalwork	Raccordo automatico 8 mm in ottone femmina 1/8"	2L02007	2
Solenoide elettrovalvola di pilotaggio	Metalwork	KIT COIL SIDE 30 24 VDC EEXMT5 3 metri per valvola serie 70	8024986328585	2
Dado		M6		20
Vite		M6x25		8
Staffa tubo tubo di misura 1/4"	Gia	Cavallotto inox 3/8"	167010	2
Staffa tubo di misura 1/8''	Gia	Cavallotto inox 3/4"	167410	1
Flangia		Serraggio elettrovalvole		2
Tubo in PE	Festo	Diametro 8mm	PEN-8X1,25-BL	

Tabella 4.2 Componenti banco 1

Ora verranno illustrati nel dettaglio i componenti principali dell'impianto.

4.1.1 Valvola di prova

La valvola di prova utilizzata in questo impianto è una valvola pneumatica a cassetto bistabile 5/2 a comando pneumatico di taglia 1/4". Tutti i componenti pneumatici utilizzati nei vari impianti sono della marca Metalwork, in particolare la valvola di prova appartiene alla serie 70.



Figura 4.4 Valvola di prova Fonte: Metalwork

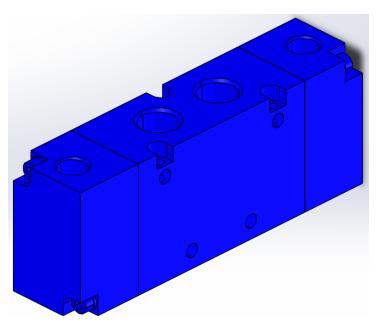


Figura 4.5 Rappresentazione valvola di prova Solidworks

4.1.2 Elettrovalvola di pilotaggio

Per azionare i comandi della valvola di prova vengono utilizzate due elettrovalvole Metalwork. Sono valvole pneumatiche a cassetto 3/2 monostabili 1/4" ad azionamento elettrico tramite solenoide; appartengono anch'esse alla serie 70.



Figura 4.6 Elettrovalvola di pilotaggio Fonte: Metalwork

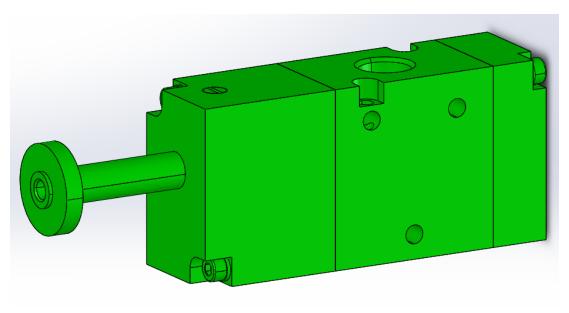


Figura 4.7 Elettrovalvola di pilotaggio Solidowork

4.1.3 Solenoide elettrovalvola

Ogni elettrovalvola ha il suo solenoide Metalwork a 24V corrente continua in grado di azionare l'elettrovalvola di pilotaggio.

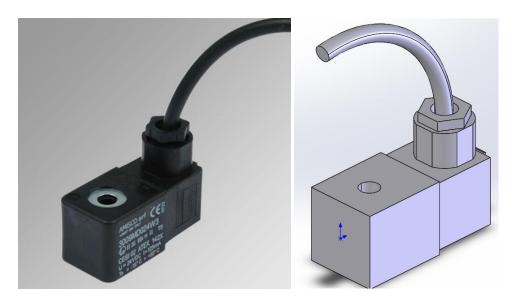


Figura 4.8 Solenoide Metalwork e rappresentazione in Solidworks

4.1.4 Gruppo FRL

Il gruppo FRL è un componente formato da tre dispositivi: filtro, riduttore e lubrificatore. Il filtro ha il compito di purificare l'aria da umidità ed eventuali scorie metalliche, il riduttore serve per regolare la pressione dell'aria compressa in uscita e il lubrificatore inserisce alcune gocce di olio, necessario per la lubrificazione di tutti gli organi in movimento (nel caso in esame le valvole).

Il gruppo FRL viene posto come primo componente dell'impianto, quindi tra l'alimentazione e il banco prova vero e proprio. Viene scelto un FRL della Metalwork di taglia 1/4" come quello rappresentato in figura.

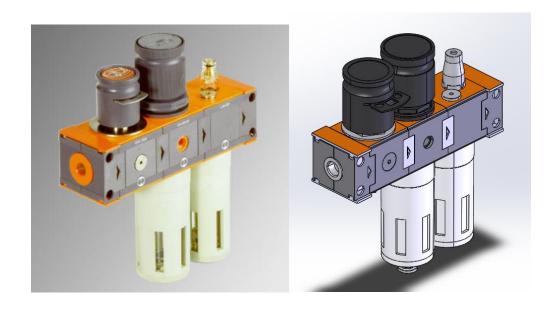


Figura 4.9 Gruppo FRL Metalwork e rappresentazione Solidworks

4.1.5 Serbatoio

Il serbatoio è necessario nell'impianto per mantenere una pressione di alimentazione alle valvole costante nel tempo, senza che quest'ultima dipenda dalla dinamica del cassetto della valvola. Il serbatoio deve avere una capacità sufficiente affinché la caduta di pressione nei tubi durante la prova non superi il 3% della pressione di alimentazione. Ha inoltre una porta inferiore adibita per il collegamento ad un termometro per il controllo della temperatura dell'aria. Viene posizionato dopo il gruppo FRL e prima della valvola di prova. Come descritto dalla normativa, le elettrovalvole di pilotaggio vengono alimentate direttamente dal gruppo FRL senza passare per il serbatoio.

Si è scelto di utilizzare un serbatoio di volume pari a 5 litri della marca Baglioni. Nella sezione "Allegati" in fondo, viene riportata la pagina del catalogo relativo a questo componente.

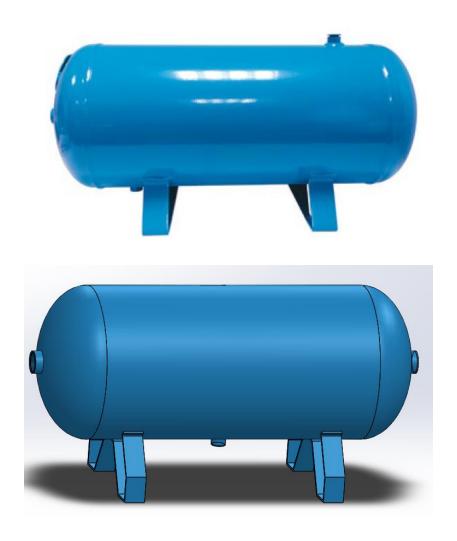


Figura 4.10 Serbatoio Baglioni e rappresentazione Solidworks

4.1.6 Tubi di misura della pressione

I tubi di misura della pressione sono stati realizzati seguendo la normativa ISO 6358, riportata nei paragrafi precedenti. Servono per poter misurare la pressione in un condotto in modo preciso e univoco, senza che la geometria e la posizione dei componenti influisca sulla lettura della pressione.

In questo banco specifico vengono utilizzate due tipologie di tubo: con filettatura da 1/4" e con filettatura da 1/8". Il tubo da 1/4" viene posto all'ingresso della valvola di prova e serve per misurare la pressione di alimentazione della valvola; i tubi da 1/8" vengono posti sulle bocche di pilotaggio della valvola di prova e servono per misurare la pressione di pilotaggio.

Ogni tubo progettato ha un foro filettato laterale M3, in una posizione ben definita, per poter ospitare una flangia per il supporto del trasduttore di pressione.

Questi componenti non si trovano in commercio ma vengono realizzati direttamente da un'azienda esterna che lavora su commissione. Al fondo, nella sezione "Allegati", sono riportate le tavole con le dimensioni di ogni tubo progettato.



Figura 4.11 Tubo di misura 1/4" Solidworks



Figura 4.12 Tubo di misura 1/8" Solidworks

4.1.7 Trasduttore di pressione

Il trasduttore di pressione è un dispositivo in grado di convertire un segnale in pressione in segnale elettrico. In questo banco specifico viene posto sui tre tubi di misura della pressione e sul tubo in PE in uscita dalla valvola di prova. I quattro segnali elettrici in uscita dai trasduttori verranno letti da un oscilloscopio che sarà in grado di mostrare in tempo reale gli andamenti della pressione in ogni tubo.

Si è scelto di utilizzare trasduttori della marca Honeywell, in grado di rilevare pressioni nel range 0-150 psi (0-10,4 bar). (vedi Allegati in fondo).

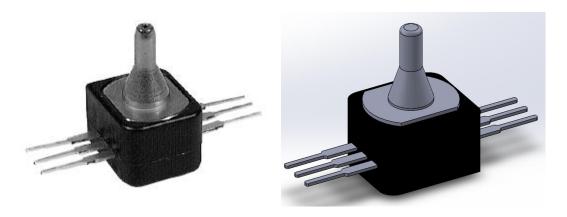


Figura 4.13 Trasduttore di pressione Honeywell e rappresentazione Solidworks

4.1.8 Componenti elettrici

Nel banco prova è presente un alimentatore necessario per l'attivazione delle elettrovalvole di pilotaggio. Nello specifico l'alimentatore è 24V a corrente continua. L'alimentatore viene alimentato dalla rete elettrica a 220V e va ad alimentare lo switch, che è semplicemente un interruttore a due uscite che permette di alimentare separatamente i due solenoidi delle due elettrovalvole di pilotaggio, necessarie per la commutazione del cassetto della valvola di prova.

I segnali elettrici prodotti dai trasduttori di pressione, vengono letti da un oscilloscopio che permette di analizzare gli andamenti della pressione e quindi calcolare il tempo di risposta delle valvole.

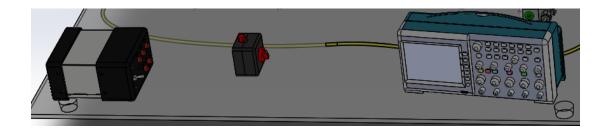


Figura 4.14 Dettaglio componenti elettrici

La figura mostra da sinistra verso destra l'alimentatore, l'interruttore switch e l'oscilloscopio. Ovviamente nella realtà i componenti non sono esattamente quelli rappresentati in Solidworks, in quanto vengono utilizzati componenti già presenti in laboratorio. La loro estetica serve solo per illustrare la loro presenza all'interno dell'assieme.



Figura 4.15 Alimentatore utilizzato in laboratorio

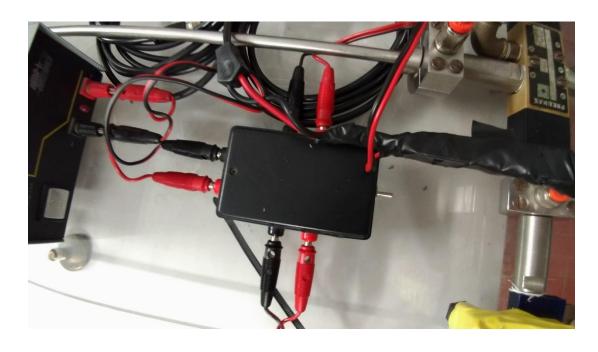


Figura 4.16 Interruttore switch utilizzato in laboratorio

4.1.9 Raccordi

I raccordi utilizzati sono tutti della Metalwork, di seguito vengono riportati i principali raccordi utilizzati.

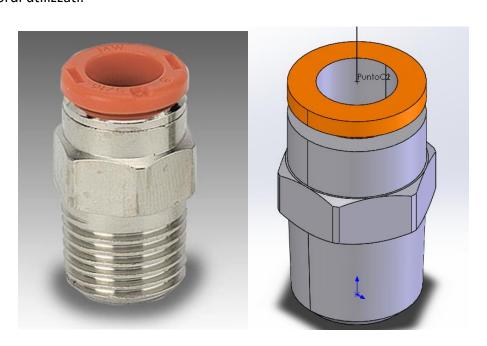




Figura 4.17 Principali raccordi utilizzati (Metalworks/Solidworks)

4.1.10 Staffe e flangie

Per il fissaggio dei tubi di misura della pressione e delle valvole pneumatiche al piano in plexiglass, vengono utilizzate alcune staffe della marca Gia. Di seguito vengono riportate le immagini dei componenti utilizzati.



Figura 4.18 Cavallotto Gia e rappresentazione Solidworks

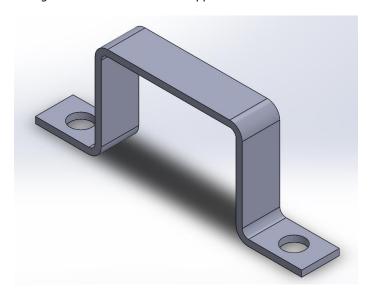


Figura 4.19 Staffa elettrovalvola

4.1.11 Tubo in PE

Per il collegamento di ogni dispositivo pneumatico si è scelto di utilizzare un tubo in PE di diametro pari a 8 mm della Festo, resistente fino a 10 bar di pressione.



Figura 4.20 Tubo in PE Festo

4.2 Secondo banco

Il secondo banco è stato progettato per ospitare una valvola di prova di tipo pneumatico 5/2, a cassetto con pilotaggio pneumatico 1/2".

Nella seguente figura vengono mostrati nel dettaglio gli schemi dei circuiti presenti nel banco prova 2 (circuito elettrico, pneumatico e acquisizione dati)

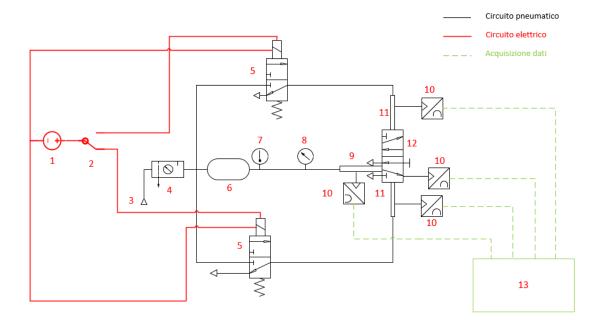


Figura 4.21 Schema circuito banco 1

1	Alimentatore 24 V DC			
2	Interruttore switch			
3	Alimentazione			
3	pneumatica			
4	Gruppo FRL			
5	Elettrovalvola di			
5	pilotaggio			
6	Serbatoio			
7	Termometro			
8	Manometro			
9	Tubo ISO 6358 1/2"			
10	Trasduttore di pressione			
11	Tubo ISO 6358 1/8"			
12	Valvola di prova			
13	Sistema di acquisizione dati/ Oscilloscopio			

Tabella 4.3 Descrizione elementi banco prova

Nelle seguenti figure vengono mostrate le viste d'assieme relative al banco 2 realizzate con Solidworks.

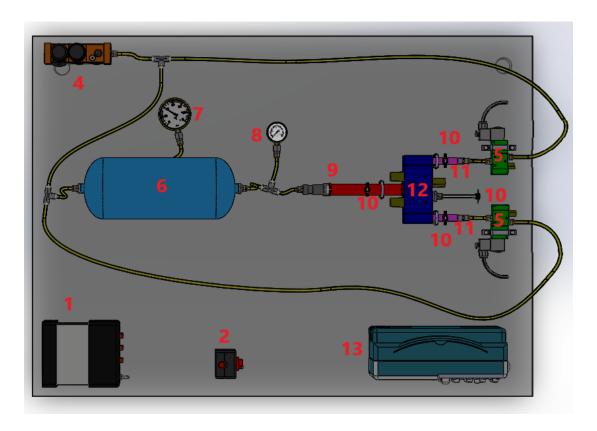


Figura 4.22 Assieme banco 2, Vista dall'alto

Come si può notare, rispetto al banco 1, cambiano solamente la valvola di prova e il tubo di misura della pressione di alimentazione.

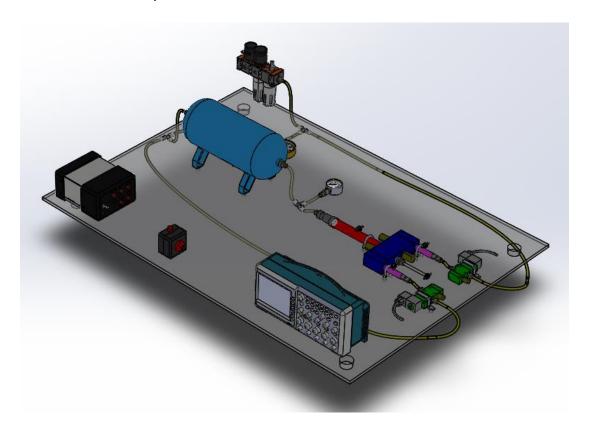


Figura 4.23 Assieme banco 2, Vista isometrica

Nella seguente tabella vengono visualizzati nello specifico tutti i componenti necessari per la composizione del banco 2, con il rispettivo nome, marca, descrizione, codice prodotto per l'acquisto e quantità del componente presente nell'impianto.

Componente	Marca	Descrizione	Codice	Quantità
Piano di lavoro in plexiglass		900mm x 1250mm		1
Oscilloscopio				1
Alimentatore		24V		1
Interrutore switch				1
Gruppo FRL	Metalwork	FRL 100 1/4 20 08 RMSA	3282008	1
Raccordo	Metalwork	Raccordo automatico 8 mm in ottone maschio 1/4"	2L01010	10
Serbatoio	Baglioni	5 litri	VEC01294	1

Raccordo	Metalwork	Riduzione MF cilindrica 1/2"-1/4" 2151004		3
Elettrovalvola di pilotaggio	Metalwork	3/2 monostabile 1/4" 7020020200		2
Raccordo	Metalwork	Curva 90° MF 1/4''	2110002	1
Valvola di prova	Metalwork	5/2 bistabile 1/2" comando pneumatico serie 70	7030011200	1
Manometro		0-12 bar		1
Raccordo		FF 1/2" 1/4" ISO 6358		1
Tubo di misura della pressione		MM 1/2" ISO 6358		1
Raccordo	Metalwork	Raccordo a T ottone 8mm	2L05004	3
Termometro		0-120°C		1
Tubo di misura della pressione		MM 1/8" ISO 6358		2
Raccordo	Metalwork	Raccordo automatico 8 mm in ottone femmina 1/4"	2L02008	2
Silenziatore	Metalwork	MW SC 1/2"	W0970530005	3
Silenziatore	Metalwork	MW SC 1/4"	W0970530003	2
Trasduttore di pressione	Honeywell	0-150 psi	40PC150G2A	4
Raccordo	Metalwork	Raccordo automatico 8 mm in ottone femmina 1/8"	2L02007	2
Solenoide elettrovalvola di pilotaggio	Metalwork	KIT COIL SIDE 30 24 VDC EEXMT5 3 metri per valvola serie 70	8024986328585	2
Dado		M6		20
Vite		M6x25		8
Staffa tubo tubo di misura 1/4"	Gia	Cavallotto inox 3/8"	167010	2
Staffa tubo di misura 1/8''	Gia	Cavallotto inox 3/4"	167410	1
Flangia		Serraggio elettrovalvole		2
Tubo in PE	Festo	Diametro 8mm	PEN-8X1,25-BL	

Tabella 4.4 Componenti banco 2

Ora verranno illustrati nel dettaglio i componenti principali dell'impianto. Vengono riportati solamente i componenti che cambiano rispetto al banco 1.

4.2.1 Valvola di prova

La valvola di prova utilizzata in questo impianto è una valvola pneumatica a cassetto bistabile 5/2 a comando pneumatico di taglia 1/2". Tutti i componenti pneumatici utilizzati nei vari impianti sono della marca Metalwork, in particolare la valvola di prova appartiene alla serie 70.



Figura 4.24 Valvola di prova Fonte: Metalwork

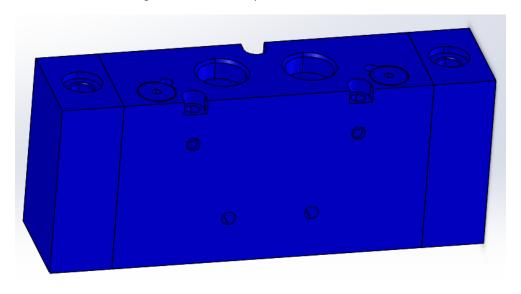


Figura 4.25 Rappresentazione valvola di prova Solidworks

4.2.2 Tubi di misura della pressione

In questo banco specifico vengono utilizzate due tipologie di tubo: con filettatura da 1/2" e con filettatura da 1/8". Il tubo da 1/2" viene posto all'ingresso della valvola di prova e serve per misurare la pressione di alimentazione della valvola; i tubi da 1/8" vengono posti sulle bocche di pilotaggio della valvola di prova e servono per misurare la pressione di pilotaggio.

Questi componenti non si trovano in commercio ma vengono realizzati direttamente da un'azienda esterna che lavora su commissione. Oltre ai tubi è stato progettato anche un riduttore del tipo FF da 1/2" a 1/4" per poter collegare il tubo di misura da 1/2" ai raccordi già utilizzati nel primo banco da 1/4". Al fondo, nella sezione "Allegati", sono riportate le tavole con le dimensioni di ogni tubo progettato.



Figura 4.26 Tubo di misura 1/2" Solidworks

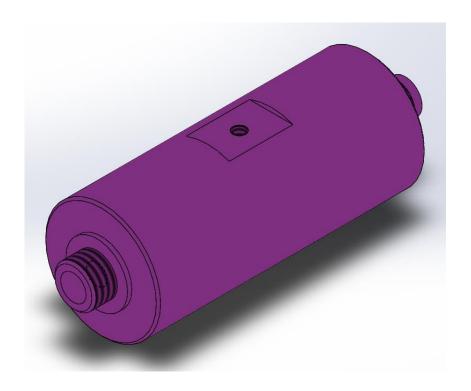


Figura 4.27 Tubo di misura 1/8" Solidworks



Figura 4.28 Riduttore ISO 6358 Solidworks

4.3 Terzo banco

Il terzo banco è stato progettato per ospitare una valvola di prova di tipo pneumatico 5/2, a cassetto con comando elettrico 1/4".

Nella seguente figura vengono mostrati nel dettaglio gli schemi dei circuiti presenti nel banco prova 3 (circuito elettrico, pneumatico e acquisizione dati)

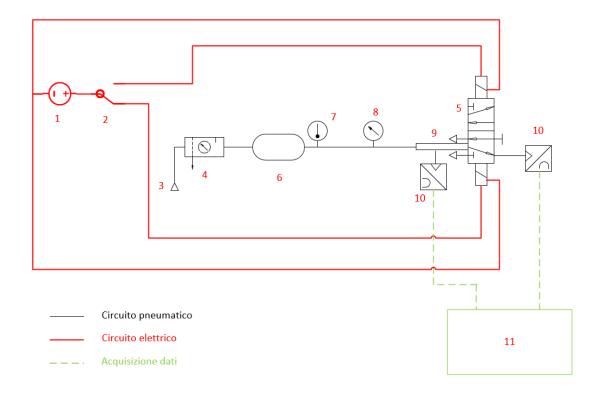


Figura 4.29 Schema circuito banco 1

1	Alimentatore 24 V DC
2	Interruttore switch
3	Alimentazione
3	pneumatica
4	Gruppo FRL
5	Valvola di prova
6	Serbatoio
7	Termometro
8	Manometro
9	Tubo ISO 6358 1/4"
10	Trasduttore di pressione
11	Sistema di acquisizione dati/ Oscilloscopio

Tabella 4.5 Descrizione elementi banco prova

Nelle seguenti figure vengono mostrate le viste d'assieme relative al banco 3 realizzate con Solidworks.

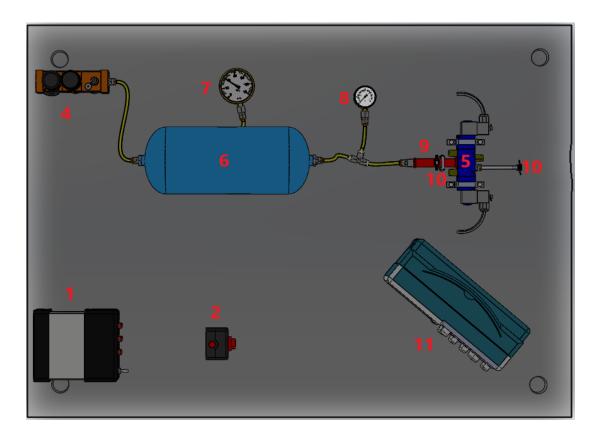


Figura 4.30 Assieme banco 3, Vista dall'alto

Rispetto al banco 1, oltre a cambiare la valvola di prova, non si hanno più le elettrovalvole di pilotaggio, ma lo switch alimenta direttamente i solenoidi presenti sulla valvola di prova.

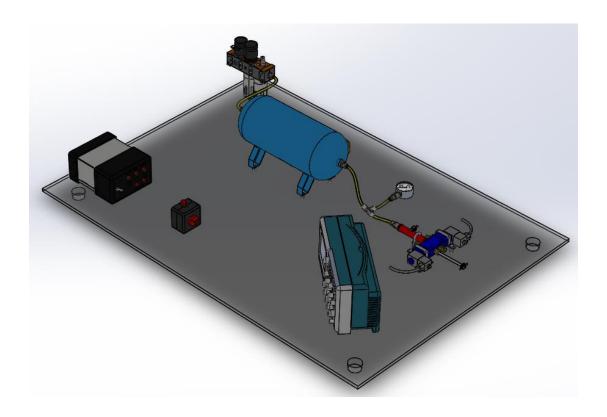


Figura 4.31 Assieme banco 3, Vista isometrica

Nella seguente tabella vengono visualizzati nello specifico tutti i componenti necessari per la composizione del banco 3, con il rispettivo nome, marca, descrizione, codice prodotto per l'acquisto e quantità del componente presente nell'impianto.

Componente	Marca	Descrizione	Codice	Quantità
Piano di lavoro in plexiglass		750mm x 1250mm		1
Oscilloscopio				1
Alimentatore		24V		1
Interrutore switch				1
Gruppo FRL	Metalwork	FRL 100 1/4 20 08 RMSA	3282008	1
Raccordo	Metalwork	Raccordo automatico 8 mm in ottone maschio 1/4"	2L01010	5
Serbatoio	Baglioni	5 litri	VEC01294	1

Raccordo	Metalwork	Riduzione MF cilindrica 1/2"-1/4"	2151004	2
Raccordo	Metalwork	Curva 90° MF 1/4"	Curva 90° MF 1/4'' 2110002	
Valvola di prova	Metalwork	elettrovalvola 5/2 bistabile 1/4" serie 7020021200 70		1
Manometro		0-12 bar		1
Tubo di misura della pressione		MM 1/4" ISO 6358		1
Raccordo	Metalwork	Raccordo a T ottone 8mm	2L05004	1
Termometro		0-120°C		1
Raccordo	Metalwork	Raccordo automatico 8 mm in ottone femmina 1/4"	2L02008	3
Silenziatore	Metalwork	MW SC 1/4"	W0970530003	3
Trasduttore di pressione	Honeywell	0-150 psi	40PC150G2A	2
Solenoide elettrovalvola di pilotaggio	Metalwork	KIT COIL SIDE 30 24 VDC EEXMT5 3 metri per valvola serie 70	8024986328585	2
Dado		M6		12
Vite		M6x25		8
Staffa tubo tubo di misura 1/4"	Gia	Cavallotto inox 3/8"	167010	1
Flangia		Serraggio elettrovalvola		2
Tubo in PE	Festo	Diametro 8mm	PEN-8X1,25-BL	

Tabella 4.6 Componenti banco 3

Ora verranno illustrati nel dettaglio i componenti principali dell'impianto. Vengono riportati solamente i componenti che cambiano rispetto al banco 1.

4.3.1 Valvola di prova

La valvola di prova utilizzata in questo impianto è una valvola pneumatica a cassetto bistabile 5/2 a comando elettrico di taglia 1/4". Tutti i componenti pneumatici utilizzati nei vari impianti sono della marca Metalwork, in particolare la valvola di prova appartiene alla serie 70.



Figura 4.32 Valvola di prova Fonte: Metalwork

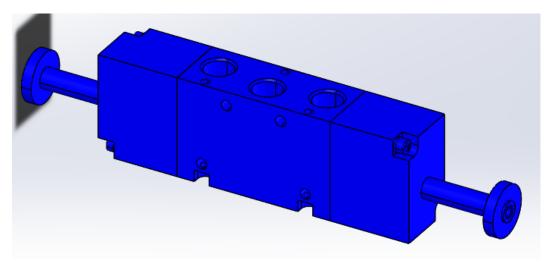


Figura 4.33 Rappresentazione valvola di prova Solidworks

4.3.2 Solenoide elettrovalvola

L'elettrovalvola di prova utilizza due solenoidi Metalwork a 24V corrente continua.

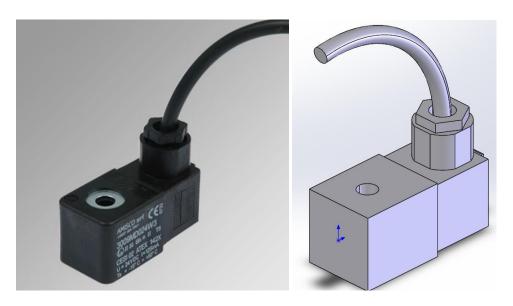


Figura 4.34 Solenoide Metalwork e rappresentazione in Solidworks

4.3.3 Tubi di misura della pressione

In questo banco specifico viene solamente utilizzato un tubo di misura della pressione, con filettatura da 1/4". Come per il banco 1 questo tubo viene posto all'alimentazione della valvola di prova. Ovviamente non vengono più utilizzati i tubi da 1/8" in quanto la valvola di prova è un'elettrovalvola e non è pilotata in pressione.



Figura 4.35 Tubo di misura 1/4" Solidworks

4.3.4 Trasduttore di pressione

Rispetto al banco 1 utilizziamo sempre gli stessi trasduttori ma anziché averne 4, ne utilizziamo solamente 2: uno sul tubo di misura della pressione all'alimentazione della valvola di prova e uno sul tubo in PE all'uscita della valvola di prova.

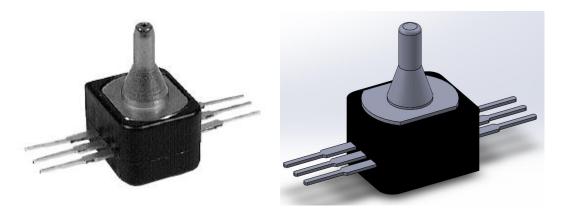


Figura 4.36 Trasduttore di pressione Honeywell e rappresentazione Solidworks

5 Analisi a parametri concentrati

Un sistema pneumatico può essere schematizzato tramite modelli matematici, in particolare quando è necessario analizzare il comportamento dei componenti durante i transitori dovuti alle commutazioni di valvole o al riempimento e svuotamento di tubi. Tali modelli matematici sono costituiti da una serie di equazioni algebriche e differenziali che devono schematizzare ogni singolo elemento dell'impianto pneumatico.

Si utilizza un'analogia elettrica in cui la portata d'aria compressa corrisponde alla corrente elettrica e la pressione alla tensione elettrica. Si utilizzeranno quindi resistenze pneumatiche, capacità pneumatiche e induttanze pneumatiche. Rispetto al caso elettrico però la modellazione di un componente risulta essere più difficoltosa in quanto non è sempre possibile avere un elemento che corrisponda perfettamente ad uno dei tre elementi indicati precedentemente. Sono presenti inoltre fenomeni di attrito e compressibilità dell'aria che danno origine ad equazioni non lineari.

Le resistenze pneumatiche sono legate a fenomeni di perdite per attrito sia localizzate in strozzature che distribuite lungo i tubi. Solitamente vengono schematizzate con resistenze pneumatiche le valvole di qualsiasi tipo. I tubi, nonostante abbiano dei fenomeni di dissipazione legati alla resistenza, non vengono schematizzati solo con una resistenza in quanto sarebbe un'approssimazione troppo grande che trascurerebbe i fenomeni capacitivi e induttivi.

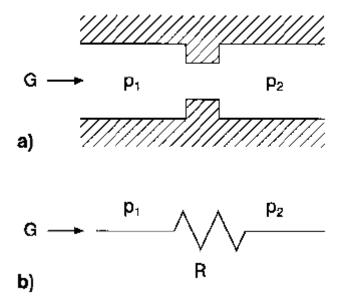


Figura 5.1 Resistenza pneumatica: a) schema; b) simbolo Fonte: [4]

Per semplificare il calcolo della resistenza pneumatica, in prima approssimazione si può utilizzare lo schema in figura 5.1, in cui la resistenza viene vista come una strozzatura all'interno di un tubo. Quindi la resistenza pneumatica lineare può essere calcolata come:

$$R = \frac{p_1 - p_2}{G}$$

Siccome non si conosce a priori la pressione in uscita dalla valvola è possibile utilizzare la seguente formula descritta in normativa ISO 6358,

$$R = \frac{p_1 - p_2}{G} = \frac{p_1 - bp_1}{\rho C P_1}$$

Dove b è il rapporto critico della valvola, C è la conduttanza della valvola e ρ è la densità dell'aria in ingresso che si può stimare utilizzando la legge dei gas perfetti conoscendo temperatura e pressione ($\rho = \frac{p}{Rg \cdot T}$ Dove Rg è la costante dei gas e vale Rg = 287 J/(Kg*K)). I dati relativi a conduttanza e rapporto critico delle valvole sono disponibili sul catalogo delle valvole stesse.

Quando è presente un accumulo di materia si presenta un effetto di tipo capacitivo, e quindi saremo in presenza di una capacità pneumatica. La capacità dipende principalmente dalla compressibilità dell'aria e dall'eventuale variazione di volume

dei recipienti in cui l'aria si accumula. In figura 5.2 è visibile uno schema di capacità pneumatica rappresentata come un serbatoio.

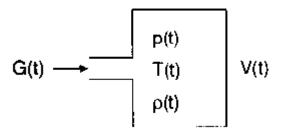


Figura 5.2 Capacità pneumatica Fonte: [4]

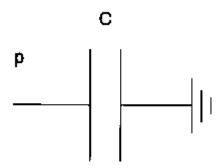


Figura 5.3 Simbolo della capacità pneumatica Fonte: [4]

La massa di aria che entra provoca un aumento di pressione, temperatura e densità all'interno della camera stessa. La portata massica è definita come derivata della massa nel tempo e la massa è data dal prodotto di densità e volume. Quindi si avrà:

$$G = \frac{d(\rho * V)}{dt} = \rho * \frac{dV}{dt} + V * \frac{d\rho}{dt}$$

Il primo termine è presente solo nel caso ci sia una variazione di volume del recipiente. Nel caso in esame si avrà un serbatoio rigido che non cambia le sue dimensioni e di conseguenza il primo termine risulterà nullo. Partendo dalla formulazione vista sopra, si può dimostrare quindi che:

$$G = C * \frac{dp}{dt}$$

Dove C è la capacità pneumatica e p è la pressione nel serbatoio. C si può calcolare in modi diversi in base alla situazione in cui il sistema sta lavorando. Nel caso in esame

consideriamo un serbatoio rigido e una trasformazione isoterma (riempimento lento). In questo caso C è costante e vale:

$$C = \frac{V}{R * T}$$

Dove V è il volume del serbatoio, R è la costante dei gas e T è la temperatura dell'aria.

Il fenomeno induttivo è un fenomeno di tipo inerziale ed è provocato dal fatto che l'aria compressa nei tubi possiede una certa massa. Per calcolare l'induttanza pneumatica si considera il fluido incompressibile, si trascurano gli effetti dell'attrito e l'accumulo di massa dovuto alla variazione di pressione.

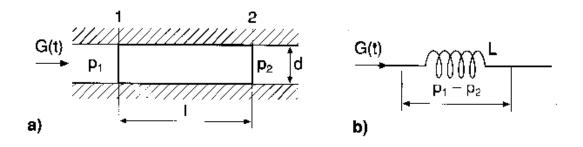


Figura 5.4 Induttanza pneumatica: a) schema; b) simbolo Fonte: [4]

Solitamente l'induttanza viene associata ad un tubo. In figura 5.4, viene rappresentato un tratto di tubo di lunghezza l e diametro d, percorso da una portata che varia nel tempo e con un salto di pressione pari a $\Delta p = p_2 - p_1$.

$$\Delta p = L * \frac{dG}{dt}$$

Dove L è l'induttanza pneumatica e si può calcolare come:

$$L = \frac{l}{A}$$

Dove A è la sezione interna del tubo.

5.1 Valvola 1/4" pilotata in pressione

Come detto in precedenza, in questa trattazione si andranno a progettare 3 tipologie di banco prova: una per misurare il tempo di risposta di una valvola pilotata in pressione, un secondo banco sempre per una valvola pilotata in pressione ma di taglia più grande e un terzo banco per un'elettrovalvola. I dati specifici relativi ai tre banchi si possono trovare nel capitolo precedente.

In figura 5.5 viene mostrata una vista dall'alto del banco di prova relativo alla misura del tempo di risposta di una valvola pilotata in pressione.

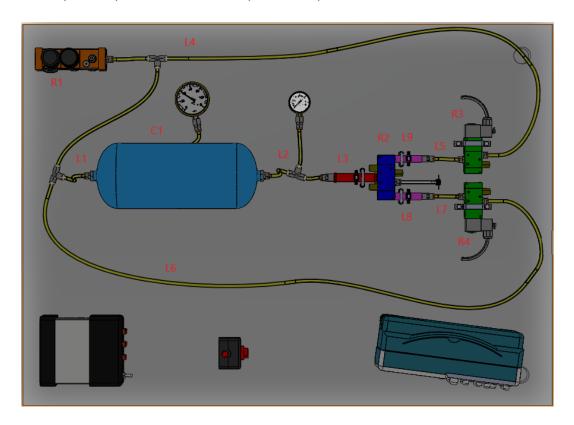


Figura 5.5 Vista dall'alto del banco 1 e 2

I vari componenti dell'impianto possono essere schematizzati come una serie di resistenze, capacità e induttanze. Nello specifico:

- R1 rappresenta il gruppo FRL e viene rappresentato come una resistenza perché è il parametro più significativo tra i tre.
- L1, L2, L4, L5, L6, L7 sono induttanze che schematizzano i tubi in gomma di collegamento tra i vari componenti dell'impianto.

- L3, L8 e L9 sono induttanze che schematizzano i tubi di misura della pressione secondo normativa ISO 6358.
- C1 è una capacità che schematizza il serbatoio.
- R2 è la resistenza pneumatica relativa alla valvola di prova.
- R3 e R4 sono le resistenze relative alle elettrovalvole di pilotaggio.

L'impianto di figura 5.5 a parametri concentrati è visibile in figura 5.6.

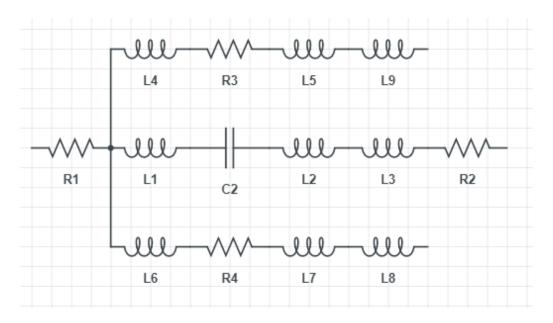


Figura 5.6 Schema a parametri concentrati banco 1 e 2

Nelle seguenti tabelle ci sono i dati relativi per il calcolo delle resistenze, capacità e induttanze pneumatiche.

	p ₁	T	ρ	С	b	R
	bar	K	Kg/m ³	NI/min*bar	-	Pa*s/Kg
R1	6	293	7.135	-	-	-
R2	6	293	7.135	264.26	0.27	2.3E6
R3	6	293	7.135	264.26	0.27	2.3E6
R4	6	293	7.135	264.26	0.27	2.3E6

Tabella 5.1 Resistenze pneumatiche

	V	Т	С
	m ³	К	Kg/Pa
C1	0.005	293	5.9E-8

Tabella 5.2 Capacità pneumatica

	I	d	А	L
	m	m	m²	1/m
L1	0.5	0.0057	2.55E-5	19608
L2	0.16	0.0057	2.55E-5	6275
L3	0.116	0.009	6.36E-5	1824
L4	1	0.0057	2.55E-5	39215
L5	0.05	0.0057	2.55E-5	1961
L6	1	0.0057	2.55E-5	39215
L7	0.05	0.0057	2.55E-5	1961
L8	0.078	0.006	2.83E-5	2756
L9	0.078	0.006	2.83E-5	2756

Tabella 5.3 Induttanze pneumatiche

5.2 Valvola 1/2" pilotata in pressione

Per quanto riguarda il secondo banco progettato, cioè con valvola pilotata in pressione ma di taglia maggiore rispetto alla precedente, si fa riferimento alle figure 5.5 e 5.6 del paragrafo precedente. Infatti, come già visto, l'impianto non cambia. L'unico elemento che cambia è il tubo di misura della pressione che avrà dimensioni maggiori e ovviamente la valvola di prova. Di seguito vengono riportate le tabelle con i dati aggiornati sul nuovo banco di prova.

	p ₁	T	ρ	С	b	R
	bar	K	Kg/m ³	NI/min*bar	-	Pa*s/Kg
R1	6	293	7.135	-	-	-
R2	6	293	7.135	971.43	0.43	4.9E5
R3	6	293	7.135	264.26	0.27	2.3E6
R4	6	293	7.135	264.26	0.27	2.3E6

Tabella 5.4 Resistenze pneumatiche

	V	Т	С
	m ³	К	Kg/Pa
C1	0.005	293	5.9E-8

Tabella 5.5 Capacità pneumatica

	I	d	А	L
	m	m	m ²	1/m
L1	0.5	0.0057	2.55E-5	19608
L2	0.35	0.0057	2.55E-5	13725
L3	0.207	0.016	2E-4	1035
L4	1.2	0.0057	2.55E-5	47059
L5	0.3	0.0057	2.55E-5	11765
L6	1.2	0.0057	2.55E-5	47059
L7	0.35	0.0057	2.55E-5	13725
L8	0.078	0.006	2.83E-5	2756
L9	0.078	0.006	2.83E-5	2756

Tabella 5.6 Induttanze pneumatiche

5.3 Elettrovalvola 1/4"

Rispetto ai casi precedenti, con queste terza tipologia di banco prova cambia la disposizione del banco e il numero dei componenti, come visibile in figura 5.7.

In figura 5.8, invece, si può osservare lo stesso banco a parametri concentrati utilizzando le notazioni viste in precedenza.

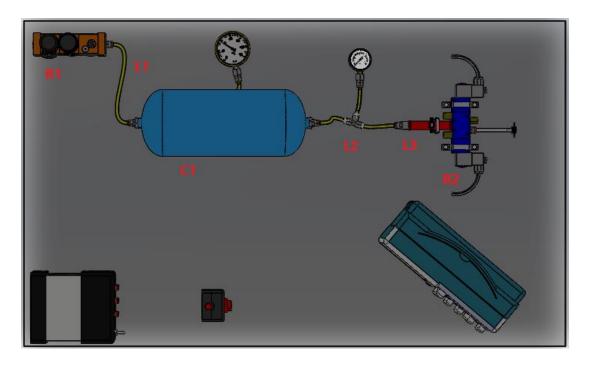


Figura 5.7 Banco con elettrovalvola

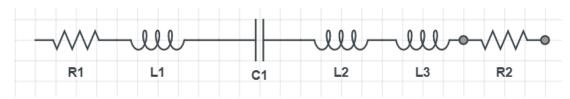


Figura 5.8 Banco con elettrovalvola a parametri concentrati

Nello specifico:

- R1 rappresenta il gruppo FRL.
- L1 e L2 sono induttanze che schematizzano i tubi in gomma di collegamento tra i vari componenti dell'impianto.
- L3 è l'induttanza che schematizza il tubo di misura della pressione secondo normativa ISO 6358.
- C1 è una capacità che schematizza il serbatoio.

• R2 è la resistenza pneumatica relativa alla valvola di prova.

Nelle tabelle seguenti si possono osservare i dati relativi alle varie grandezze utili per il calcolo di resistenze, capacità e induttanze.

	p ₁	T	ρ	С	b	R
	bar	K	Kg/m ³	NI/min*bar	-	Pa*s/Kg
R1	6	293	7.135	-	-	-
R2	6	293	7.135	264.26	0.27	2.3E6

Tabella 5.4 Resistenze pneumatiche

	V	Т	С
	m ³	К	Kg/Pa
C1	0.005	293	5.9E-8

Tabella 5.5 Capacità pneumatica

	I	d	А	L
	m	m	m²	1/m
L1	0.35	0.0057	2.55E-5	13725
L2	0.35	0.0057	2.55E-5	13725
L3	0.116	0.009	6.36E-5	1824

Tabella 5.6 Induttanze pneumatiche

6 Modello statico

Prima di iniziare le simulazioni dinamiche del banco prova è bene effettuare delle verifiche di tipo statico sulla base di alcuni dati conosciuti e forniti dal costruttore delle valvole. In particolare, in questo capitolo, si andranno ad eseguire delle prove riguardanti la portata che attraversa la valvola.

Come detto in precedenza, le valvole impiegate nell'impianto sono valvole della Metalwork. Da catalogo ci vengono fornite, per ogni taglia di valvole, le curve di portata al variare della pressione di alimentazione.

Lo scopo di questa parte è quello di riuscire ad ottenere le stesse curve di portata fornite da catalogo, utilizzando un modello di tipo statico.

La portata di un fluido viene calcolata tramite le formule riportate dalla normativa ISO 6358 che utilizzano la conduttanza e il rapporto critico.

Utilizzando questo metodo, la portata può essere descritta tramite due formule: una che descrive il flusso subsonico e una che descrive il flusso sonico.

Nel tratto subsonico:

$$Q = C \cdot p_{in} \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{r-b}{1-b}\right)^2}$$

$$Con r = \frac{p_{out}}{p_{in}}$$

Nel tratto sonico invece:

$$Q = C \cdot p_{in} \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T_1}}$$

Dove C è la conduttanza della valvola, p_{in} è la pressione di alimentazione della valvola, p_{out} è la pressione in uscita dalla valvola, T_0 è la temperatura di riferimento pari a 298K, T_1 è la temperatura dell'aria in ingresso e b è il rapporto critico della valvola.

Quando r>b allora vuol dire che il flusso si trova nel tratto subsonico e quindi per calcolare la portata si usa la prima formula; viceversa quando r<=b il flusso sarà sonico.

Dal catalogo Metalwork, sono forniti i valori di conduttanza e di rapporto critico per ogni taglia di valvola.

Per ottenere le curve di portata utilizziamo il programma Matlab. In fondo, nella sezione "Allegati", è possibile vedere lo script utilizzato.

Vengono realizzate 5 prove con pressione di alimentazione differente. Per ogni prova viene fatta variare la pressione in uscita dalla valvola in modo da ottenere una curva di portata al variare della pressione in uscita.

I dati utilizzati sono i seguenti:

С	b	Pin	T ₁
NI/(min*bar)	-	bar	K
264.26	0.27	[2-4-6-8-10]	273

Siccome la conduttanza e la portata vengono forniti dalla Metalwork in Normal Litri, la temperatura dell'aria viene considerata pari a 273K.

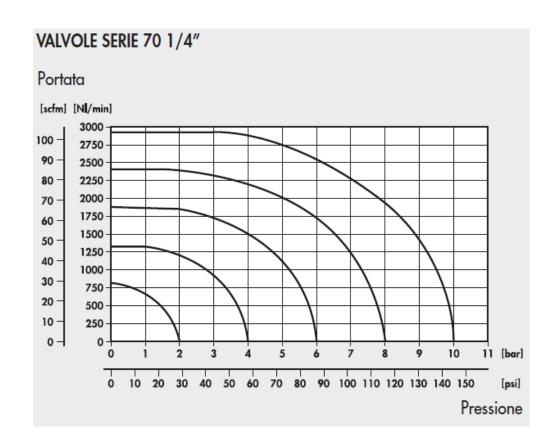


Figura 6.1 Curve di portata Metalwork

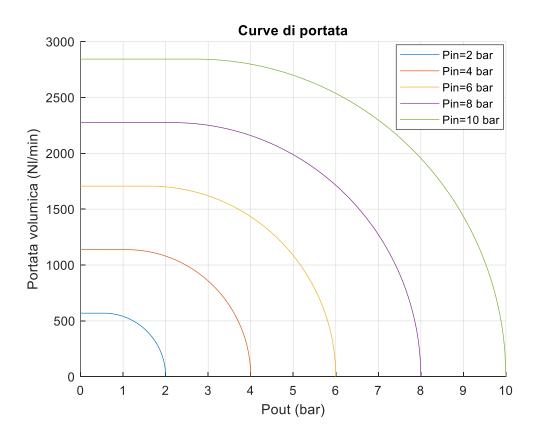


Figura 6.2 Curve di portata modello statico

Nelle precedenti figure si possono osservare gli andamenti delle curve di portata fornite dal catalogo Metalwork e ottenute dal modello Matlab.

Si può osservare come gli andamenti della portata al variare della pressione in uscita siano molto simili, così come i valori. L'unica differenza sostanziale sta nella curva con pressione di alimentazione pari a 2 bar, dove nel grafico Metalwork, sembra che non ci sia il tratto sonico, ma la valvola si comporta come se il flusso fosse sempre subsonico. Questo si può spiegare con il fatto che il grafico Metalwork è stato realizzato con delle prove sperimentali, facendo delle medie tra i vari risultati ottenuti con valvole diverse e di conseguenza è facile che ci siano delle piccole differenze con gli andamenti teorici.

7 Modello dinamico

In questo capitolo viene presentato il modello dinamico relativo al banco 1. È importante, per eseguire una buona progettazione, realizzare un modello dinamico del sistema studiato per avere un confronto diretto con il modello sperimentale che verrà costruito in seguito.

Il modello dinamico è formato da una serie di equazioni e formule che descrivono nel modo più preciso possibile ciò che avverrà poi effettivamente nel mondo reale. Viene utilizzato principalmente per confrontare i risultati sperimentali e per poter effettuare un controllo sulla corretta esecuzione delle prove reali sul banco fisico.

Nei paragrafi successivi vengono sviluppati due modelli che riguardano principalmente il banco 1, poiché sarà quello realizzato sperimentalmente. Il primo modello è quello più approssimato, nel quale viene modellata solamente la valvola di prova che riceve in ingresso un gradino per la pressione di pilotaggio.

Il secondo modello invece sarà composto da due macro sistemi: uno che riguarda la valvola di prova, quindi una valvola pneumatica 5/2 bistabile 1/4" a comando pneumatico e uno che riguarda l'elettrovalvola di pilotaggio, cioè una valvola 3/2 monostabile 1/4" a comando elettrico, che serve per eseguire la commutazione del cassetto della valvola di prova.

Nel caso in cui si volesse descrivere un modello dinamico di un altro banco tra quelli descritti in precedenza, le equazioni rimarrebbero sempre le stesse ma ovviamente cambierebbero alcuni dati legati alla taglia e alla disposizione delle valvole.

Il modello viene realizzato con il supporto di Matlab e in particolare dell'estensione Simulink di Matlab. Una volta scritte le equazioni fondamentali, si vanno a rappresentare su Simulink e andando a inserire i dati necessari, si ottengono i risultati che verranno poi confrontati con il modello fisico.

7.1 Modello 1: Solo valvola di prova

Come già detto in precedenza, la valvola di prova è una valvola pneumatica 5/2 bistabile 1/4" a comando pneumatico. Il modello è formato da tre gruppi di equazioni separate: equilibrio meccanico sul cassetto, equazioni di portata e equazioni di continuità.

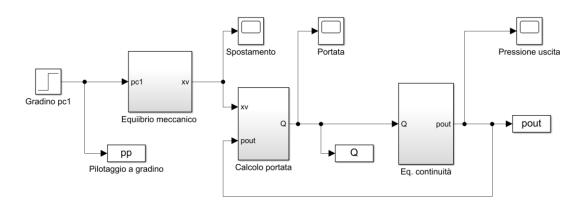


Figura 7.1 Modello Simulink della valvola di prova

In questo primo modello si ipotizza che il segnale della pressione di pilotaggio, che aziona la valvola di prova, sia un gradino che istantaneamente passa da 0 bar fino alla pressione di pilotaggio. Non viene considerato quindi il ritardo di attivazione dovuto alla presenza di un'elettrovalvola di pilotaggio.

7.1.1 Equilibrio meccanico sul cassetto

In questa sezione viene eseguito un equilibrio tra le forze agenti sul cassetto della valvola, necessario per poter ricavare lo spostamento e la velocità del cassetto nel tempo, sotto l'azione di alcune forze caratteristiche.

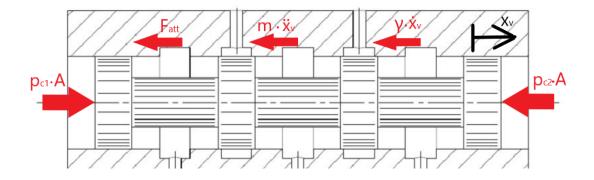


Figura 7.2 Equilibrio meccanico valvola di prova

In questa figura si può vedere il diagramma di corpo libero relativo al cassetto della valvola di prova. L'equilibrio sarà definito come:

$$m \cdot \ddot{x_v} + \gamma \cdot \dot{x_v} + F_{att} = (p_{c1} - p_{c2}) \cdot A$$

Dove m rappresenta la massa del cassetto della valvola, γ è il coefficiente di attrito viscoso, che moltiplicato per la velocità del cassetto mi restituisce una forza di attrito viscoso, F_{att} è la forza d'attrito data principalmente dalle tenute tra cassetto e valvola, p_{c1} e p_{c2} sono le due pressioni di pilotaggio che agiscono sul cassetto, A è la sezione dello stantuffo del cassetto, sulla quale agiscono le pressioni di pilotaggio e x_v rappresenta lo spostamento del cassetto.

Inserendo questa equazione in Simulink si ottiene:

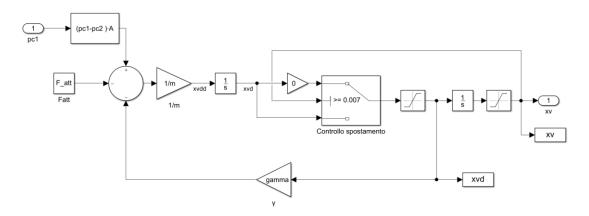


Figura 7.3 Equilibrio meccanico cassetto Simulink

Come si può osservare dal modello Simulink, prendendo in ingresso la pressione di pilotaggio p_{c1} , che viene fornita tramite un gradino di pressione, e supponendo che dal lato opposto la camera di pilotaggio sia scarica, cioè a pressione ambiente, in uscita si può ottenere l'andamento di velocità e spostamento del cassetto nel tempo.

Il blocco switch nominato come "controllo spostamento", serve per imporre manualmente una velocità nulla nel momento in cui il cassetto della valvola arrivi a fine corsa (in questo caso 7 mm); altrimenti la velocità continuerebbe a salire anche se in teoria il cassetto si trova a fine corsa.

7.1.2 Equazioni di portata

Una volta ottenuto lo spostamento del cassetto nel tempo, è possibile calcolare la portata che attraversa la valvola. Viene utilizzato il metodo illustrato al capitolo 5 del libro Pneumatic Drives [5], che segue la normativa ISO 6358 definendo la portata con conduttanza e rapporto critico della valvola.

Utilizzando questo metodo, la portata può essere descritta tramite due formule: una che descrive il flusso subsonico e una che descrive il flusso sonico.

Nel tratto subsonico:

$$Q = C \cdot p_{in} \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{r-b}{1-b}\right)^2}$$

$$Con r = \frac{p_{out}}{p_{in}}$$

Nel tratto sonico invece:

$$Q = C \cdot p_{in} \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T_1}}$$

Dove C è la conduttanza della valvola, p_{in} è la pressione di alimentazione della valvola, p_{out} è la pressione in uscita dalla valvola, T_0 è la temperatura di riferimento pari a 298K, T_1 è la temperatura dell'aria in ingresso e b è il rapporto critico della valvola.

Quando r>b allora vuol dire che il flusso si trova nel tratto subsonico e quindi per calcolare la portata si usa la prima formula; viceversa quando r≤b il flusso sarà sonico.

Per legare lo spostamento del cassetto alla variazione di portata che attraversa la valvola, in prima approssimazione si considera che la conduttanza della valvola e lo spostamento del cassetto siano direttamente proporzionali come suggerito dal libro Meccatronica [6].

$$C = k_x \cdot x_v$$

Dove:

$$k_x = \frac{C_{max}}{x_{vmax}}$$

Quindi k_x viene definito come il rapporto tra la conduttanza massima della valvola, riportata da catalogo, e lo spostamento massimo del cassetto. In realtà la conduttanza varia al variare della luce di passaggio dell'aria all'interno della valvola, ma in prima approssimazione la consideriamo lineare con lo spostamento.

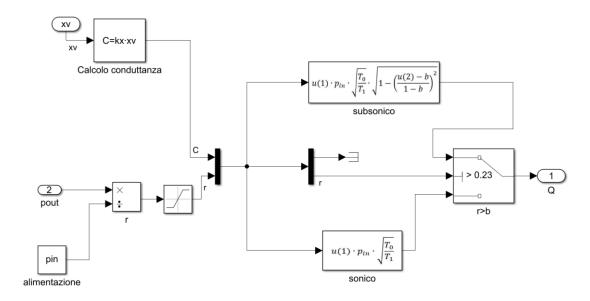


Figura 7.4 Equazione di portata Simulink

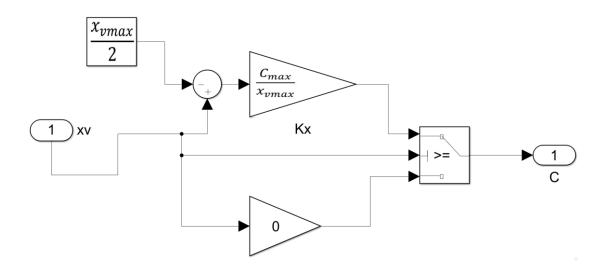


Figura 7.5 Calcolo conduttanza

Il passaggio di flusso tra il condotto di alimentazione e quello di uscita avviene solo per la metà dello spostamento del cassetto. Di conseguenza nel modello precedente, la conduttanza vale 0 quando il cassetto scorre da 0 mm fino a 3,5 mm (metà dello spostamento totale, e poi inizia ad aumentare fino ad arrivare al valore massimo quando il cassetto arriva a fine corsa.

Conoscendo quindi lo spostamento del cassetto e la pressione in uscita dalla valvola è possibile ricavare l'andamento della portata nel tempo.

7.1.3 Equazione di continuità

Per ricavare la pressione in uscita dalla valvola, bisogna considerare il volume che viene riempito dal flusso di aria nel tempo, cioè il volume interno della valvola sommato al volume del tubo in PE in uscita alla valvola a cui è collegato il trasduttore di pressione.

Secondo le indicazioni ricavate [6], si può scrivere l'equazione di continuità come:

$$G_{in} - G_{out} = C_v \cdot \frac{dp_{out}}{dt}$$

Dove G è la portata massica che si ottiene quindi come $G=Q\cdot \rho_0$ e C_v è la capacità pneumatica. In questo caso specifico, si considera che G_{out} sia pari a zero poiché si trascurano le fughe di aria verso l'esterno della valvola e del tubo di uscita.

 C_v per una generica trasformazione politropica viene definita come:

$$C_v = \frac{V}{n \cdot R \cdot T} \cdot \left(\frac{p_{out}}{p_{in}}\right)^{\frac{1-n}{n}}$$

Dove V è il volume occupato dal fluido, n è il coefficiente della politropica, T è la temperatura del fluido e R è la costante dei gas.

Per semplificare il calcolo si considera una trasformazione isoterma all'interno della valvola quindi con n=1. In questo modo si ha che:

$$C_v = \frac{V}{R \cdot T}$$

E di conseguenza l'equazione di continuità si presenterà come:

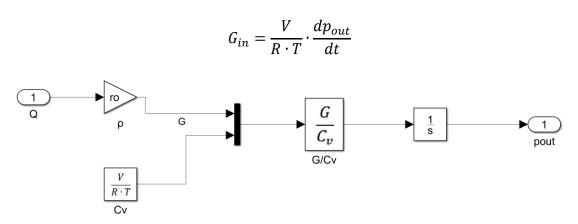


Figura 7.6 Equazione di continuità Simulink

Conoscendo la portata in funzione del tempo si può andare a ricavare la pressione in uscita per poi confrontarla con la pressione di pilotaggio e ricavare quindi il tempo di risposta della valvola.

Il modello di disattivazione della valvola di prova è molto simile al precedente.

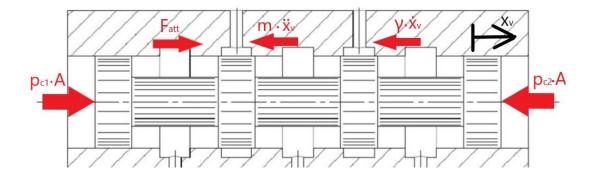


Figura 7.7 Equilibrio meccanico disattivazione

Per quanto riguarda l'equilibrio meccanico sulla valvola di prova, i cambiamenti sono relativi solamente al segno della forza d'attrito che è sempre opposta al moto del cassetto. Siccome la variazione di pressione di pilotaggio è negativa ($p_{c2} > p_{c1}$) si genera una accelerazione e velocità negativa, necessarie per spostare il cassetto verso sinistra per farlo tornare in posizione iniziale. Di conseguenza l'attrito viscoso sarà anch'esso negativo, per via della velocità negativa, e opposto al moto.

Di seguito vengono mostrati gli schemi Simulink relativi al modello di disattivazione.

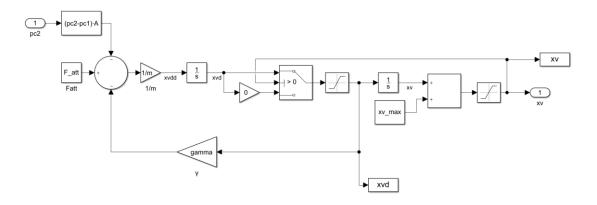


Figura 7.8 Equilibrio meccanico disattivazione valvola di prova

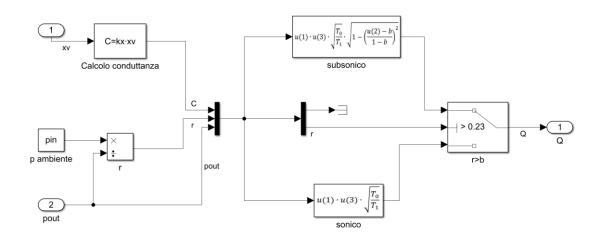


Figura 7.9 Calcolo portata disattivazione valvola di prova

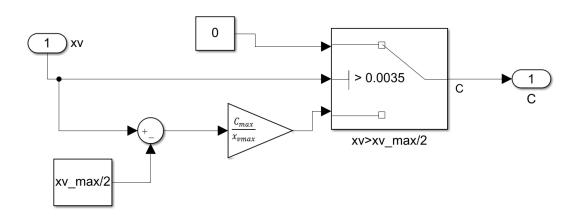


Figura 7.10 Calcolo conduttanza disattivazione

Per quanto riguarda il blocco relativo al calcolo della portata della valvola di prova, cambia il segno della portata in quanto il tubo di uscita si deve svuotare e di conseguenza la portata sarà negativa. Inoltre nelle formule del calcolo della portata

sonica e subsonica, anziché avere la pressione di alimentazione costante (come era nel caso di attivazione della valvola), è necessario inserire il valore di pressione presente nel tubo in uscita, che è in continua diminuzione durante lo svuotamento in ambiente.

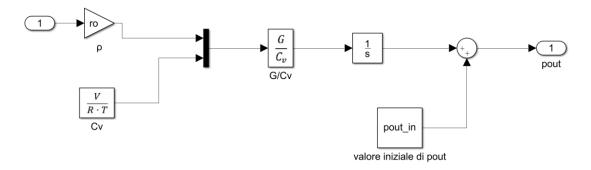


Figura 7.11 Equazione di continuità disattivazione valvola di prova

Nel blocco relativo all'equazione di continuità non è cambiato nulla, se non una piccola correzione della pressione in uscita per far sì che lo svuotamento iniziasse dalla pressione di regime e non da 0 bar.

7.2 Secondo modello: Valvola di prova e Elettrovalvola di pilotaggio

In questo secondo modello invece non si considera più la pressione di pilotaggio come un gradino di pressione ma viene modellata anche l'elettrovalvola di pilotaggio che avrà quindi una sua dinamica e di conseguenza anche il segnale di pressione di pilotaggio avrà un certo ritardo.



Figura 7.12 Rappresentazione Simulink del banco prova

In figura si può osservare il modello realizzato su Simulink. È formato da due marco blocchi che rappresentano le due valvole utilizzate nel banco prova. In particolare l'elettrovalvola prende in input il segnale in tensione V necessario per l'attivazione del solenoide e restituisce in output la pressione in uscita dalla valvola che rappresenta la pressione di pilotaggio della valvola di prova. Quest'ultima restituisce in output la pressione in uscita che confrontata con la pressione di pilotaggio permette di calcolare il ritardo di attivazione della valvola. Questo modello permette di calcolare il tempo di attivazione della valvola, ma non quello di disattivazione, che verrà processato in seguito.

Il modello della valvola di prova è già stato descritto nel paragrafo precedente, l'unica differenza sta nel segnale in input pc1 che, come detto, non è più a gradino.

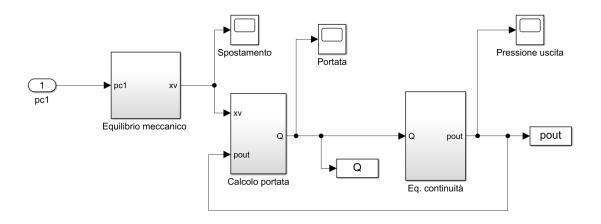


Figura 7.13 Modello simulink valvola di prova

L'elettrovalvola di pilotaggio è una valvola pneumatica 3/2 monostabile 1/4" a comando elettrico. Come per la valvola di prova, la sua modellazione si divide in tre macro gruppi: Equilibrio meccanico sul cassetto, equazione di portata ed equazione di continuità.

Ciò che cambia maggiormente rispetto alla valvola di prova è l'equilibrio delle forze sul cassetto.

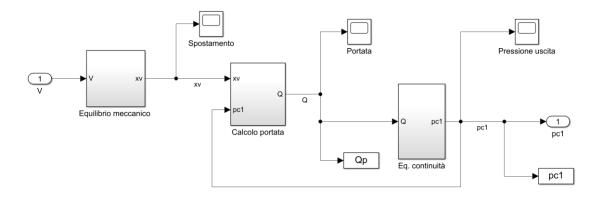


Figura 7.14 Rappresentazione elettrovalvola Simulink

7.2.1 Equilibrio meccanico

A differenza della valvola di prova, in questo caso si ha la presenza di una forza magnetica che attiva lo spostamento del cassetto della valvola e si oppone alla forza elastica della molla.

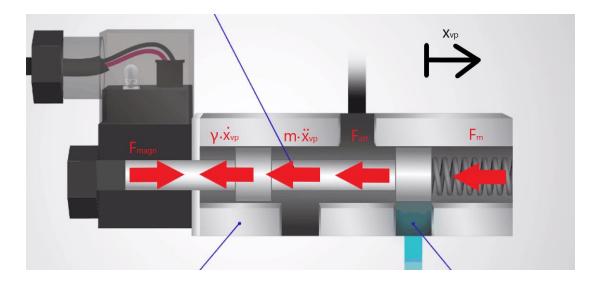


Figura 7.15 Schema forze elettrovalvola

Come si può notare dal diagramma di corpo libero, rispetto al caso precedente avremo una forza magnetica e una forza elastica data dalla molla, in quanto la valvola considerata è monostabile. L'equilibrio delle forze pertanto sarà:

$$m\ddot{x_v} + \gamma \dot{x_v} + F_{att} + F_m = F_{magn}$$

Dove F_{magn} è la forza magnetica data dal solenoide e F_m è la forza della molla definita come:

$$F_m = F_0 + k \cdot x_{vp}$$

Con ${\cal F}_0$ si intende il precarico della molla e con k
 la rigidezza della molla stessa.

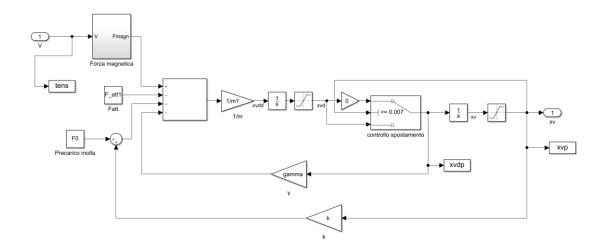


Figura 7.16 Equilibrio meccanico Simulink

Nella figura soprastante si può osservare il modello Simulink che riguarda l'equilibrio meccanico dell'elettrovalvola. Come per la valvola di prova, il blocco denominato "controllo spostamento" serve per portare la velocità a zero nel momento in cui il cassetto arriva a fine corsa.

Per ricavare la forza magnetica partendo dalla tensione fornita al solenoide è stato fatto un modello a parte seguendo quanto descritto nei seguenti libri e articoli: [6] [7] [8] [9] [10].

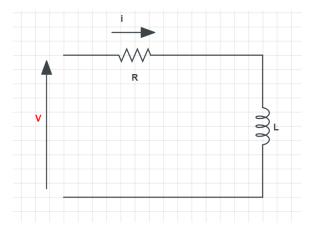


Figura 7.17 Schema elettrico solenoide

Dallo schema elettrico del solenoide si può ricavare l'equazione di equilibrio elettrico del circuito:

$$V = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt}$$

Dove V è la tensione fornita al solenoide, R è la resistenza elettrica, i la corrente che attraversa la bobina e L l'induttanza del solenoide. In questo modello l'induttanza non varia con lo spostamento e la velocità del cassetto, ma viene considerata costante come prima approssimazione.

Ricavando la corrente elettrica i che circola nel solenoide, è possibile ottenere la forza magnetica prodotta dal solenoide [10], in grado di muovere il cassetto della valvola:

$$F_{magn} = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot S}{2 \cdot l_0^2} \cdot i(t)^2$$

Dove μ_0 è la permeabilità magnetica dell'aria, N è il numero di spire del solenoide, S è la sezione della bobina e l_0 è il gap minimo di aria tra lo stelo del cassetto e il materiale ferromagnetico del solenoide.

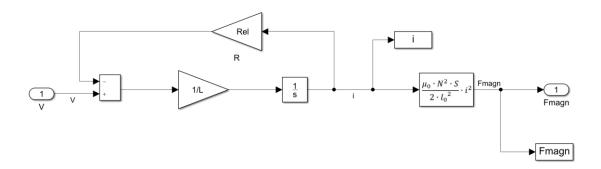


Figura 7.18 Modello solenoide Simulink

Con la forza magnetica si è in grado di risolvere l'equazione di equilibrio meccanico sul cassetto e quindi di trovare l'andamento dello spostamento nel tempo.

Per quanto riguarda le equazioni di portata e di continuità si opera in modo analogo a ciò che è stato fatto per la valvola di prova.

7.2.2 Equazioni di portata

Come osservato nel paragrafo riguardante le equazioni di portata per la valvola di prova, la portata può essere descritta tramite due formule: una che descrive il flusso subsonico e una che descrive il flusso sonico.

Nel tratto subsonico:

$$Q = C \cdot p_{in} \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{r-b}{1-b}\right)^2}$$

$$\operatorname{Con} r = \frac{p_{c1}}{p_{in}}$$

Nel tratto sonico invece:

$$Q = C \cdot p_{in} \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T_1}}$$

Dove C è la conduttanza della valvola, p_{in} è la pressione di alimentazione della valvola, p_{c1} è la pressione in uscita dall'elettrovalvola, T_0 è la temperatura di riferimento pari a 298K, T_1 è la temperatura dell'aria in ingresso e b è il rapporto critico della valvola.

Quando r>b allora vuol dire che il flusso si trova nel tratto subsonico e quindi per calcolare la portata si usa la prima formula; viceversa quando r<=b il flusso sarà sonico.

Per legare lo spostamento del cassetto alla variazione di portata che attraversa la valvola, in prima approssimazione si considera che la conduttanza della valvola e lo spostamento del cassetto siano direttamente proporzionali come suggerito dal libro Meccatronica [6].

$$C = k_x \cdot x_{vp}$$

Dove:

$$k_{x} = \frac{C_{max}}{x_{vpmax}}$$

Quindi k_x viene definito come il rapporto tra la conduttanza massima della valvola, riportata da catalogo, e lo spostamento massimo del cassetto. In realtà la conduttanza varia al variare della luce di passaggio dell'aria all'interno della valvola, ma in prima approssimazione la consideriamo lineare con lo spostamento.

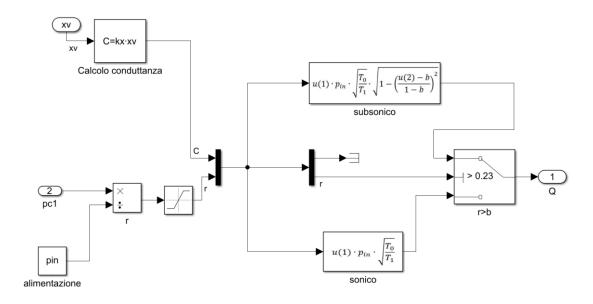


Figura 7.19 Equazione di portata Simulink

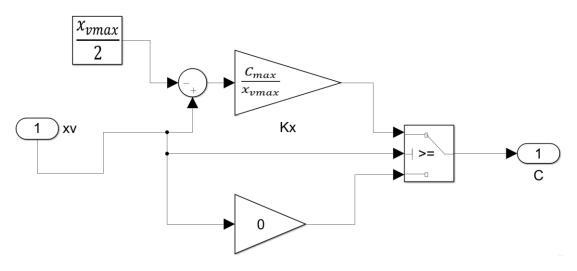


Figura 7.20 Calcolo conduttanza

Come per la valvola di prova, anche per l'elettrovalvola viene considerato che la variazione di conduttanza si ha solo per metà dello spostamento del cassetto.

Conoscendo quindi lo spostamento del cassetto e la pressione in uscita dalla valvola è possibile ricavare l'andamento della portata nel tempo.

7.2.3 Equazione di continuità

Per ricavare la pressione in uscita dalla valvola, bisogna considerare il volume che viene riempito dal flusso di aria nel tempo, cioè il volume interno della valvola sommato al volume del tubo in PE in uscita alla valvola che si collega alla bocca di pilotaggio della valvola di prova.

Secondo le indicazioni ricavate [6], si può scrivere l'equazione di continuità come:

$$G_{in} - G_{out} = C_v \cdot \frac{dp_{c1}}{dt}$$

Dove G è la portata massica che si ottiene quindi come $G=Q\cdot \rho_0$ e C_v è la capacità pneumatica. In questo caso specifico, si considera che G_{out} sia pari a zero poiché si trascurano le fughe di aria verso l'esterno della valvola e del tubo di uscita.

 C_v per una generica trasformazione politropica viene definita come:

$$C_v = \frac{V}{n \cdot R \cdot T} \cdot \left(\frac{p_{c1}}{p_{in}}\right)^{\frac{1-n}{n}}$$

Dove V è il volume occupato dal fluido, n è il coefficiente della politropica, T è la temperatura del fluido e R è la costante dei gas.

Per semplificare il calcolo si considera una trasformazione isoterma all'interno della valvola quindi con n=1. In questo modo si ha che:

$$C_{v} = \frac{V}{R \cdot T}$$

E di conseguenza l'equazione di continuità si presenterà come:

$$G_{in} = \frac{V}{R \cdot T} \cdot \frac{dp_{out}}{dt}$$

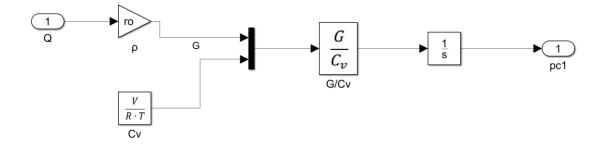


Figura 7.21 Equazione di continuità Simulink

Conoscendo la portata in funzione del tempo si può andare a ricavare la pressione in uscita per poi confrontarla con la pressione di pilotaggio e ricavare quindi il tempo di risposta della valvola.

Per quanto riguarda il modello di disattivazione, si rimanda a ciò illustrato prima nel paragrafo relativo al modello 1, in quanto i blocchi relativi all'elettrovalvola non subiscono variazioni e sono identici a quelli del modello di attivazione, e i blocchi relativi alla valvola di prova subiscono le stesse variazioni illustrate al termine del paragrafo 7.1.

8 Prove sperimentali

Dopo aver sviluppato il modello del banco prova, e bene andare a confrontare i risultati ottenuti dalla simulazione con ciò che effettivamente si ottiene utilizzando un banco reale. Infatti, dal confronto tra i dati reali e quelli simulati si possono ottenere informazioni molto importanti sui vari parametri incogniti della simulazione, in modo da ottenere un modello che rappresenti nel modo più corretto possibile i risultati sperimentali. Avere un modello che rappresenta in modo accurato ciò che avviene nella realtà permette di eseguire prove virtuali anche con modalità e componenti differenti, ma soprattutto a basso costo.

Purtroppo, per motivi legati alla situazione epidemiologica del 2020 e per ritardi di consegna del materiale occorrente, non è stato possibile in questa trattazione, realizzare il banco prova con le stesse modalità e componenti scelti nella progettazione descritta nei paragrafi precedenti. Come si potrà notare nelle prossime pagine, infatti, il banco utilizzato per le prove sperimentali è un banco di vecchia data già presente in laboratorio al Politecnico di Torino, che segue una normativa non più in vigore e utilizza dei componenti che in parte non sono quelli scelti in questa trattazione.

La parte sperimentale si divide in tre prove:

- Curve di portata
- Taratura dei trasduttori
- Tempo di risposta

8.1 Curve di portata

In questa parte si va sperimentalmente ad ottenere la curva caratteristica di portata della valvola di prova. Come detto in precedenza, la valvola di prova non corrisponde più alla valvola Metalwork scelta in fase di progettazione.

La valvola utilizzata è una valvola 5/2 pneumatica bistabile a comando pneumatico di taglia 1/8" di marca Pneumax, come riportata in figura.



Figura 8.1 Valvola di prova utilizzata in laboratorio

Dalla curva di portata sperimentale ottenuta si andrà poi a ricavare la conduttanza e il rapporto critico della valvola, dati utili per la simulazione. Per ottenere le curve sperimentali si è scelto di eseguire due prove.

Nella prima prova la curva finale viene realizzata automaticamente dal software di acquisizione dati leggendo la pressione in uscita dalla valvola e la portata dal flussimetro.

I componenti di questa prima prova sono:

- Valvola di prova
- Flussimetro digitale
- Serbatoio
- Valvola regolatrice di flusso
- Manometro digitale

Lo schema del circuito di questo impianto è il seguente.

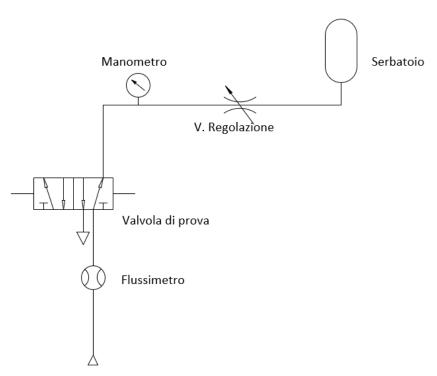


Figura 8.2 Circuito prima prova portata



Figura 8.3 Flussimetro digitale

Si utilizza il riempimento del serbatoio per far variare la pressione in uscita dalla valvola di prova. Utilizzando la valvola regolatrice di flusso posta a monte del serbatoio è possibile regolare la velocità di carico del serbatoio stesso, in modo che il software riesca a rilevare i dati in modo opportuno. Con una frequenza pari a 2000 Hz, il software rileva la pressione nel serbatoio (tramite il manometro digitale) e la portata in uscita dalla valvola (tramite il flussimetro) e crea automaticamente il grafico della curva caratteristica di portata.

Le modalità operative sono le seguenti:

- Collegare il circuito come in figura.
- Attivare il software per la lettura dei dati del manometro e del flussimetro.
- Alimentare il circuito.
- Quando la pressione nel serbatoio arriva alla pressione di alimentazione e la portata è nulla fermare la lettura dei dati del software.

Nella seconda prova le letture di pressione in uscita e portata vengono prelevate manualmente.

I componenti di questa seconda prova sono:

- Valvola di prova
- Flussimetro digitale
- Valvola regolatrice di flusso
- Manometro digitale

Lo schema del circuito di questo impianto è il seguente.

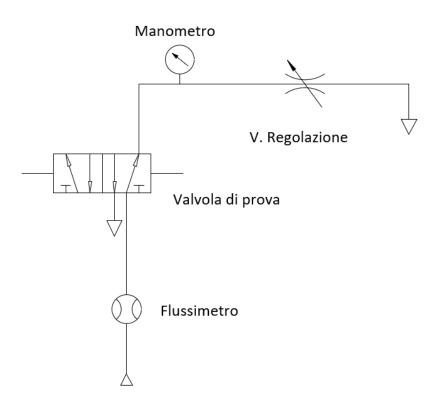


Figura 8.4 Circuito seconda prova portata

Come visibile in figura, viene alimentata la valvola di prova con il flussimetro digitale a monte della valvola e a valle della stessa sono presenti il manometro digitale e la valvola regolatrice di flusso.

Modalità operative:

- Collegare il circuito come in figura.
- Alimentare il circuito.
- Chiudere completamente la valvola di regolazione in modo che la portata sia nulla.
- Aprire poco per volta la valvola di regolazione e ad ogni step leggere i valori di pressione e portata.
- Scrivere tutti i dati e realizzare la curva caratteristica.

Mantenendo la pressione di alimentazione della valvola costante, si è andato a regolare il flusso tramite lo strozzatore e per ogni valore di pressione in uscita letto dal manometro digitale si è associato il valore di portata in uscita dalla valvola. I dati ottenuti vengono poi elaborati e si crea la curva di portata.

I risultati che si ottengono dalle due prove vengono plottati su un grafico mediante l'utilizzo di Matlab e tramite un codice specifico (riportato nella sezione Allegati) si ricava la conduttanza e il rapporto critico della valvola di prova.

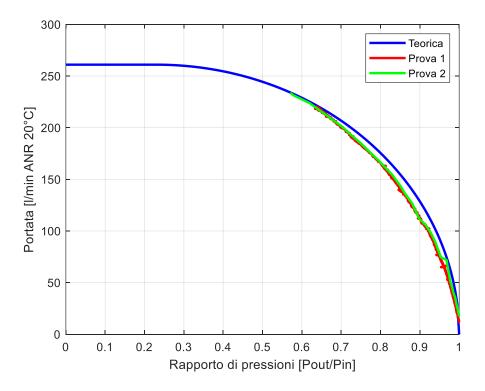


Figura 8.5 Curve di portata

Come si può osservare dalla figura sopra, le curve in rosso e in verde sono le due curve sperimentali ottenute con le due prove. Si può notare come le due curve siano sovrapposte, quindi significa che con entrambi i metodi si ottiene la stessa curva di portata. Le curve però si interrompono ad un valore di portata di circa 220 l/min in quanto questo valore rappresenta il fondo scala del flussimetro digitale. Non è stato possibile ottenere delle curve complete in quanto non si disponeva in laboratorio di un flussimetro che fosse in grado di misurare portate più grandi di quel valore.

Con l'utilizzo di un codice Matlab, si è cercato di ottenere una curva di portata che fosse il più simile possibile a quella ottenuta sperimentalmente. Di questa curva si possono ricavare facilmente i valori di conduttanza e rapporto critico, che nel caso in esame valevano rispettivamente: C=41,43 l/(min*bar) e b=0.23.

La conduttanza viene calcolata tramite la formula presente in normativa ISO 6358:

$$C = \frac{Q_{max}}{p_{alim}} \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T_1}}$$

Dove Q_{max} rappresenta la portata massima (condizioni soniche), T_0 è la temperatura di riferimento pari a 298K, T_1 è la temperatura dell'aria.

Questi dati saranno utili per realizzare una simulazione accurata del banco prova.

8.2 Taratura dei trasduttori

L'operazione di taratura dei trasduttori è un'operazione molto importante per poter identificare il guadagno dei trasduttori stessi.

Nel banco prova per la misura dei tempi di risposta presente in laboratorio vengono utilizzati tre trasduttori di pressione: due per le pressioni di pilotaggio e uno per la pressione in uscita dalla valvola. Rispetto alla nuova normativa quindi non viene utilizzato il trasduttore di pressione necessario per rilevare correttamente la pressione di alimentazione della valvola I trasduttori utilizzati nel banco sono della Honeywell con codice 40PC150G2A cioè gli stessi scelti per il nuovo banco in fase di progettazione.



Figura 8.6 Trasduttore montato sul tubo di misura della pressione

Vengono realizzate tre prove separate, una per ogni trasduttore. Per ogni prova è necessario avere:

- Serbatoio
- Trasduttore di pressione
- Software di acquisizione dati
- Manometro digitale

Lo schema del circuito di questo impianto è il seguente.

Manometro

Trasduttore di pressione Serbatoio

Figura 8.7 Circuito taratura trasduttori

Il serbatoio viene collegato direttamente all'alimentazione e l'altra uscita del serbatoio viene collegata al manometro digitale e al trasduttore di pressione. I segnali in uscita del manometro e del trasduttore vengono letti dal software di acquisizione dei dati.

Le prove vengono eseguite facendo variare la pressione di alimentazione del serbatoio da 0 bar fino a 7 bar con step di circa 0.1 bar e poi in discesa per verificare l'isteresi del trasduttore da 7 bar fino a 0 bar con step di eguale dimensione.

Per ogni step viene letta la pressione restituita dal manometro digitale e la tensione restituita dal trasduttore di pressione. Una volta terminata la prova, si ripetono gli stessi passaggi per tutti i trasduttori.

Le curve di tensione che si ottengono sono visibili nella figura seguente:

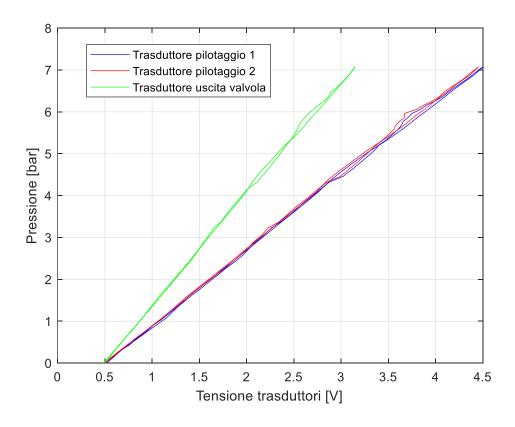


Figura 8.8 Curve pV trasduttori di pressione

Come si può osservare tutti e tre i trasduttori hanno un comportamento lineare della tensione al variare della pressione e non presentano fenomeni di isteresi in quanto le curve di salita e di discesa della pressione sono molto simili. Questo significa che i trasduttori sono ancora in buono stato ed è possibile effettuare delle misurazioni accurate. L'unica differenza apprezzabile riguarda il sensore presente all'uscita della valvola di prova che, nonostante sia dello stesso modello degli altri, presenta un guadagno differente rispetto agli altri due trasduttori.

Andando ad interpolare le curve con una retta è possibile ricavare il coefficiente angolare e l'ordinata all'origine delle curve dei trasduttori. Questi dati sono molto importanti e verranno inseriti nel software di acquisizione dati per poter effettuare delle misure precise durante l'analisi dei tempi di risposta della valvola di prova.

I dati ottenuti dai tre trasduttori sono i seguenti:

	Coefficiente angolare	Ordinata all'origine
Trasduttore pilotaggio 1	1.79 bar/V	-0.90 bar
Trasduttore pilotaggio 2	1.81 bar/V	-0.89 bar
Trasduttore uscita valvola	2.69 bar/V	-1.31 bar

Tabella 8.1 Dati interpolazione retta trasduttori

8.3 Tempo di risposta

Come detto in precedenza, le prove sperimentali relative al tempo di risposta della valvola, vengono realizzate utilizzando un banco prova diverso da quello progettato nei capitoli precedenti. In queste figure è visibile il banco prova utilizzato con la descrizione di ogni componente.

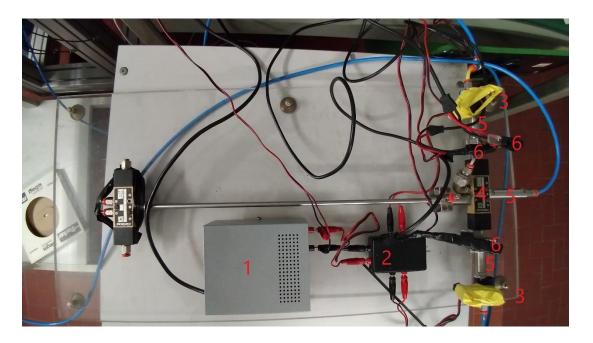


Figura 8.9 Banco prova sperimentale

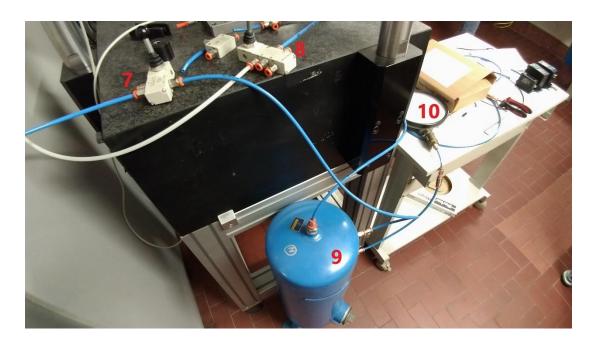


Figura 8.10 Alimentazione banco



Figura 8.11 Sistema di acquisizione dati

I componenti del banco sono i seguenti:

Numero	Nome	Descrizione	
1	Alimentatore	24V	
2	Interruttore switch		
3	Elettrovalvola di pilotaggio	Festo 3/2 monostabile comando elettrico 1/8" codice:11121 MFH- 3-1/8-SEU	
4	Valvola di prova	Pneumax 5/2 bistabile comando pneumatico 1/8" codice 228.52.11.11	
5	Tubo di misura della pressione	1/8"	
6	Trasduttore di pressione	Honeywell 40PC150G2A	
7	Valvola alimentazione	Metalwork comando manuale monostabile 2/2	
8	Valvola alimentazione pilotaggio	Metalwork comando manuale bistabile 5/2	
9	Serbatoio	20	
10	Manometro		
11	Ingresso sistema di acquisizione dati		

Tabella 8.2 Elenco componenti impianto

Il banco utilizzato è molto simile a quello progettato in questa trattazione. Le differenze principali stanno nella tipologia delle valvole utilizzate. Infatti questo banco utilizza valvole da 1/8" anziché da 1/4" come progettato e anche di marca diversa (Pneumax e Festo invece che Metalwork).

Anche i tubi per la misura della pressione sono leggermente differenti da quelli progettati in quanto seguono una normativa differente. Inoltre non è presente il tubo per la misura della pressione di alimentazione con annesso trasduttore.

Per analizzare i dati non si utilizza un oscilloscopio ma i segnali in tensione dei trasduttori vengono letti da un sistema di acquisizione dati e riportati all'interno di un software presente sul pc.

Dalla figura del banco è visibile un tubo di misura della pressione e un'ulteriore valvola 5/2 collegati alla seconda uscita della valvola di prova. Non è chiaro il motivo di questa presenza, probabilmente il banco è stato progettato per eseguire funzioni diverse. In ogni caso, durante le nostre prove sperimentali, sia la seconda valvola che il tubo di misura della pressione risultavano chiusi in modo da non influenzare il risultato delle prove stesse.

Contrassegnati con i numeri 7 e 8 sono presenti due valvole a comando manuale utilizzate per alimentare il serbatoio e quindi la valvola di prova (valvola 7), e per alimentare le elettrovalvole di pilotaggio (valvola 8). Nel banco progettato in precedenza viene utilizzata una sola valvola per regolare l'alimentazione della valvola di prova e delle elettrovalvole. Si può utilizzare la valvola già presente all'interno del gruppo FRL oppure una valvola 2/2 esterna come in questo caso.

Le elettrovalvole di pilotaggio vengono attivate tramite il segnale elettrico a 24V prodotto dall'alimentatore. L'interruttore switch viene utilizzato per alimentare in modo separato una o l'altra elettrovalvola di pilotaggio.

Le prove si sono svolte seguendo queste modalità:

- Collegare tutti i componenti come nelle figure precedenti.
- Aprire le valvole 7 e 8.
- Attendere che il serbatoio 9 si riempia e arrivi al valore di pressione di alimentazione desiderato (pari a 6,3 bar secondo normativa ISO 12238), utilizzando il manometro 10.
- Controllare che lo switch sia in posizione centrale, cioè che nessuna elettrovalvola sia attiva.
- Far partire il software per la registrazione dei dati.
- Velocemente spostare l'interruttore switch prima a destra, poi a sinistra e
 infine nuovamente in posizione centrale. In questo modo si va ad attivare la
 prima elettrovalvola di pilotaggio (spostamento a destra), poi a disattivare la
 prima ed attivare la seconda (spostamento a sinistra) e infine a disattivare
 entrambe le elettrovalvole.
- Sospendere la registrazione dei dati.
- Salvare i dati ottenuti.
- Ripetere i passaggi precedenti per ottenere altri dati.

Un esempio di ciò che si ottiene dalla prova si può vedere nella seguente immagine:

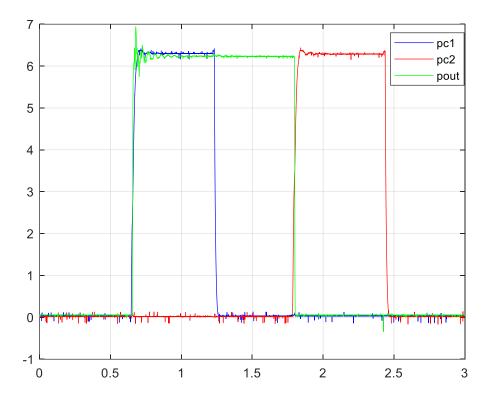


Figura 8.12 Esempio di risultato sperimentale

Con lo spostamento a destra dello switch si va ad attivare l'uscita della valvola di prova con il trasduttore collegato. Infatti sia la curva in blu (che rappresenta la pressione del pilotaggio di apertura), che la curva verde (che rappresenta la pressione in uscita) passano da 0 bar a circa 6,3 bar. Spostando l'interruttore dello switch verso sinistra si va a disattivare il primo pilotaggio e attivare il secondo pilotaggio cioè quello di chiusura della valvola di prova (curva rossa). In questo modo la pressione in uscita dalla valvola va a 0 bar (curva verde).

Come si può osservare la pressione in uscita dalla valvola, in fase di attivazione, oscilla nell'intorno del valore di regime, fino a stabilizzarsi dopo circa 0,5s.

Tutte le valvole durante la prova sono state alimentate alla pressione di circa 6,3 bar. Nonostante questo la pressione in uscita dalla valvola di prova è leggermente inferiore rispetto ai 6,3 bar imposti. Si poteva ovviare a questo problema utilizzando il tubo di misura della pressione con il trasduttore a monte della valvola di prova, come prevede la normativa, controllando prima di eseguire la prova che la pressione di alimentazione fosse proprio a 6,3 bar. Purtroppo in questo banco di vecchia data non era prevista la misura della pressione di alimentazione e di conseguenza leggendo solo manualmente il valore di pressione dal manometro si possono commettere errori.

9 Risultati

In questo capitolo vengono mostrati i risultati delle prove sperimentali e delle simulazioni ottenute dai due diversi modelli illustrati nel capitolo 7.

9.1 Prove sperimentali

Seguendo le modalità operative illustrate nel paragrafo 8.3 sono state fatte 9 prove differenti e di conseguenza si hanno altrettanti grafici da analizzare.

Per ogni prova si è scelto di registrare, oltre al tempo di attivazione e disattivazione della valvola di prova, anche le durate dei transitori per passare da 0 bar fino alla pressione di regime, sia per la valvola di prova che per le elettrovalvole.

Secondo la normativa ISO 12238, il tempo di attivazione di una valvola si calcola come l'intervallo di tempo che intercorre tra il 10% della pressione di pilotaggio e il 10% della pressione in uscita dalla valvola. Nel caso preso in esame il 10% della pressione di regime corrisponde a 0,63 bar. Di seguito viene riportato un esempio di misura del tempo di attivazione.

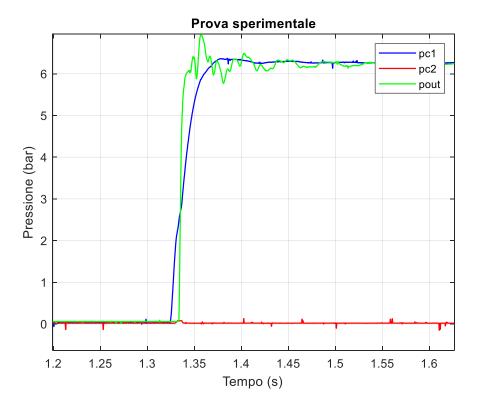


Figura 9.1 Attivazione valvola di prova

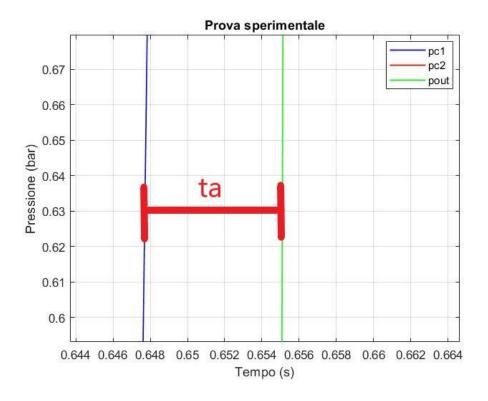


Figura 9.2 Esempio tempo di attivazione valvola

Con pc1 si intende la pressione di pilotaggio di apertura della valvola di prova, con pc2 la pressione di pilotaggio di chiusura della valvola di prova e con pout la pressione in uscita dalla valvola di prova.

Sempre secondo la normativa ISO 12238, il tempo di disattivazione della valvola di prova si calcola come l'intervallo di tempo tra il 10% della pressione di pilotaggio e il 90% della pressione in uscita. Nel caso preso in esame il 90% della pressione di regime corrisponde a 5,67 bar. Di seguito viene riportato un esempio di misura del tempo di disattivazione.

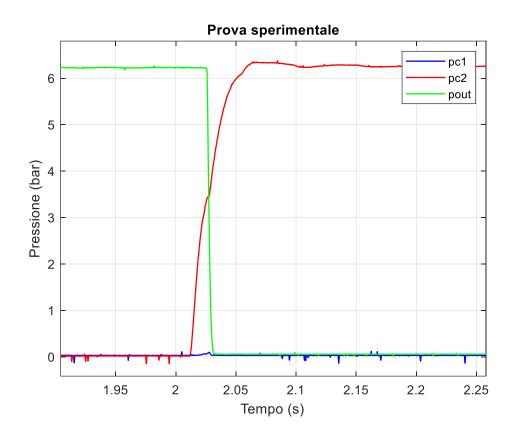


Figura 9.3 Disattivazione valvola di prova

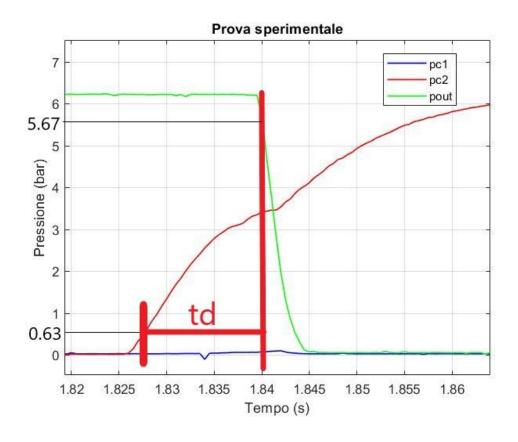


Figura 9.4 Esempio tempo di disattivazione valvola

Oltre a questi dati vengono ricavati anche i tempi del transitorio di attivazione e disattivazione della valvola di prova (ton e toff) e i tempi del transitorio di attivazione delle due elettrovalvole (ton1 e ton2). Questi dati sono utili per confrontare le prove sperimentali con le simulazioni dei due modelli simulink. Di seguito vengono mostrate le misure di questi dati.

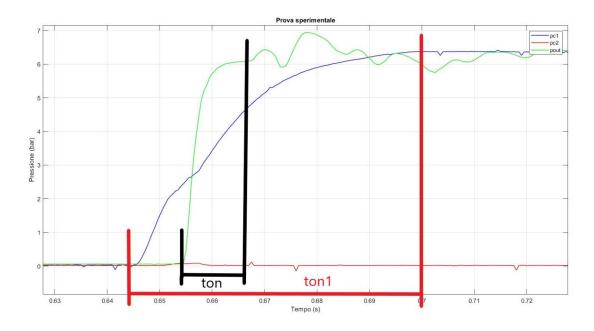


Figura 9.5 Esempio misura ton e ton1

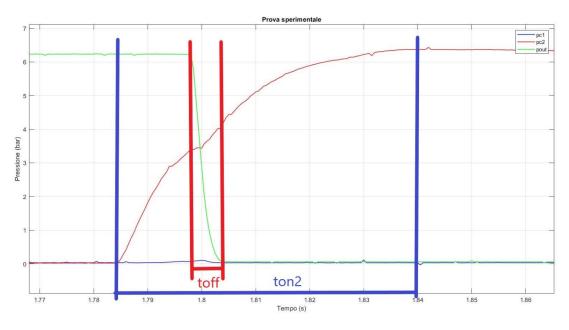


Figura 9.6 Esempio misura ton2 e toff

Nella seguente tabella vengono mostrati i risultati ottenuti dalle varie prove sperimentali.

Prove	ta	td	ton	toff	ton1	ton2
Piove	ms	ms	ms	ms	ms	ms
1	7,3	11,3	13	7	53,5	52
2	7,6	11,8	13,5	7	53	56
3	7,4	12	12,5	6,2	55,5	56
4	7,5	11,9	13	6	53,5	55,5
5	7,4	12	13	6,5	54,5	56,5
6	7,4	12	12	7	57	54,5
7	7,5	12	12	7,5	56,5	55
8	7,5	12,1	11,2	6,5	54	53,5
9	7,4	12	11	6	55,5	55
Media	7,4	11,9	12,4	6,6	54,8	54,9
Deviazione standard	0,09	0,24	0,87	0,52	1,42	1,41
COV	1,18%	2,02%	7,01%	7,87%	2,59%	2,57%

Tabella 9.1 Risultati sperimentali

La deviazione standard, o scarto quadratico medio, è la stima della variazione di una popolazione di dati e si calcola come:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N} (x_i - \bar{x})^2}{N}}$$

Dove N è il numero totale di dati, x_i è il generico dato e \bar{x} è la media aritmetica di tutti i dati.

Il COV (Coefficient of Variation) rappresenta il grado di bontà della prova eseguita e l'estensione della variazione dei dati in funzione della media della popolazione. Si calcola come rapporto tra la deviazione standard e la media aritmetica delle misure. Più il COV è basso, più la misura sarà accurata e l'errore riferito alla grandezza misurata sarà piccolo.

Come si può osservare, non c'è molta variazione nei risultati al variare delle prove eseguite. Questo dimostra che le prove sono state eseguite in modo corretto e uniforme.

I tempi di maggior interesse sono quelli legati al tempo di risposta della valvola di prova, in particolare il tempo di attivazione (ta) e di disattivazione (td), rispettivamente 7,4 e 11,9 ms. Essi infatti hanno un valore di COV basso rispetto agli altri quindi le prove hanno fornito dei dati utili e univoci.

Il tempo di attivazione è minore rispetto al tempo di disattivazione probabilmente per via della geometria delle guarnizioni presenti all'interno della valvola di prova. Esse infatti potrebbero determinare una forza di resistenza al moto più elevata in un verso piuttosto che nel verso opposto. Un'altra spiegazione potrebbe derivare dalla presenza di forze di flusso che si esercitano in modo differente in base alla portata di aria passante nella valvola.

Un altro fenomeno legato alla spiegazione precedente si ha osservando i valori delle pressioni di pilotaggio necessarie all'attivazione e alla disattivazione della valvola di prova. Il cassetto della valvola di prova inizia a muoversi quando il pilotaggio raggiunge i 2,5 bar circa di pressione in attivazione e i 3,5 bar circa in disattivazione.

I tempi del transitorio di attivazione delle due elettrovalvole (ton1 e ton2) sono molto simili tra di loro in quanto le due valvole sono identiche e i volumi in uscita dalle valvole sono pressoché uguali. Il tempo del transitorio di attivazione della valvola di prova (ton) è inferiore rispetto agli analoghi tempi delle elettrovalvole in quanto il volume da riempire in uscita dalla valvola di prova è inferiore rispetto ai volumi dei condotti di pilotaggio.

Il transitorio di svuotamento della valvola di prova (toff) è inferiore rispetto al transitorio di riempimento (ton) in quanto durante lo svuotamento il condotto di uscita viene scaricato direttamente in ambiente e la portata è sonica per tutto il processo.

9.2 Modello 1: solo valvola di prova

Come illustrato nel capitolo 7, il modello 1 è composto dalla sola valvola di prova alimentata da un segnale di pressione di pilotaggio a gradino.

I dati necessari per la modellazione della valvola di prova sono stati presi direttamente smontando la valvola stessa, come è visibile nell'immagine sottostante.



Figura 9.7 Esploso valvola di prova

9.2.1 Attivazione valvola di prova

Nella seguente tabella vengono mostrati i dati utilizzati nella simulazione.

Dato	Valore	Unità di misura	Descrizione
m	0,017	Kg	Massa cassetto valvola
γ	1,74	N*s/m	Coefficiente attrito viscoso
F_att	1	N	Forza d'attrito
pc1	6,3	bar	Pressione di pilotaggio apertura
pc2	0	bar	Pressione di pilotaggio chiusura
Α	1,33·10 ⁻⁴	m^2	Sezione pilotaggio
x_max	0,007	m	Spostamento massimo cassetto
p_alim	6,3	bar	Pressione alimentazione valvola di prova
b	0,23		Rapporto critico valvola
V_fin	5,13·10 ⁻⁶	m^3	Volume tubo di uscita
Т	293	K	Temperatura aria
R	287	J/(kg*K)	Costante dei gas
ρ	1,2047	kg/m^3	Densità aria
С	41,43	I/(min*bar)	Conduttanza valvola

Tabella 9.2 Dati modello 1 attivazione valvola

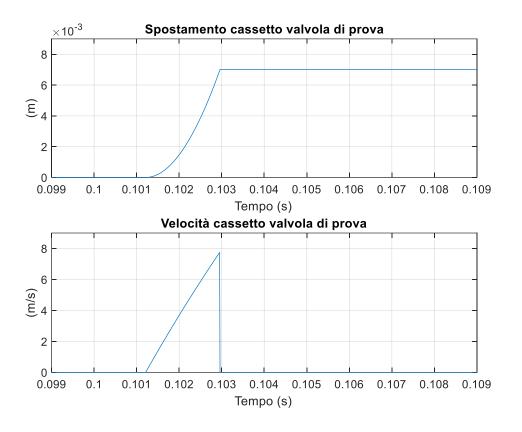


Figura 9.8 Spostamento e velocità attivazione cassetto

Il segnale a gradino è stato dato al valore di 0,1 s e dopo circa 1 ms il cassetto della valvola inizia a muoversi. Lo spostamento segue una curva di secondo grado e termina al valore massimo di 7 mm come impostato dalla simulazione. La velocità invece è lineare e supera i 7 m/s per poi scendere bruscamente a 0 nel momento in cui il cassetto arriva a fine corsa.

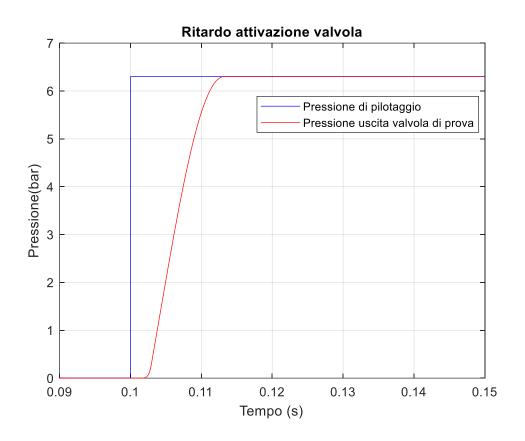


Figura 9.9 Attivazione valvola

ta	ton
ms	ms
3,4	10,4

Tabella 9.3 Tempi di attivazione modello 1

La valvola si attiva dopo circa 2 ms da quando viene imposto il pilotaggio a gradino e impiega 10,4 ms ad arrivare alla pressione di regime. Il valore del transitorio di attivazione (ton) è leggermente più basso rispetto al valore sperimentale (12,4 ms). Il tempo di attivazione (ta) è stato calcolato come l'intervallo di tempo tra il gradino di pressione e il 10% della pressione di regime (0,63 bar). Ovviamente il tempo di attivazione è molto più basso rispetto al tempo sperimentale in quanto non è presente il ritardo dovuto alla presenza del transitorio dell'elettrovalvola di pilotaggio.

9.2.2 Disattivazione valvola di prova

Dato	Valore	Unità di misura	Descrizione
m	0,017	Kg	Massa cassetto valvola
γ	1,74	N*s/m	Coefficiente attrito viscoso
F_att	1	N	Forza d'attrito
pc1	0	bar	Pressione di pilotaggio apertura
pc2	6,3	bar	Pressione di pilotaggio chiusura
Α	1,33·10-4	m^2	Sezione pilotaggio
x_max	0,007	m	Spostamento massimo cassetto
p_alim	6,3	bar	Pressione alimentazione valvola di prova
b	0,23		Rapporto critico valvola
V_fin	5,13·10 ⁻⁶	m^3	Volume tubo di uscita
Т	293	K	Temperatura aria
R	287	J/(kg*K)	Costante dei gas
ρ	1,2047	kg/m^3	Densità aria
С	41,43	I/(min*bar)	Conduttanza valvola

Tabella 9.4 Dati modello 1 disattivazione valvola

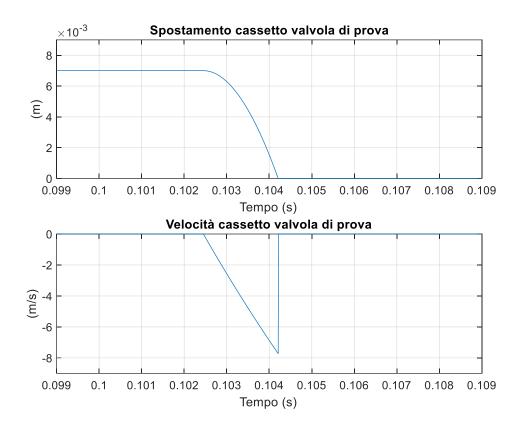


Figura 9.10 Spostamento e velocità disattivazione valvola

In fase di chiusura della valvola il cassetto parte da 7 mm e torna indietro fino a 0. La velocità è negativa e raggiunge gli stessi valori dell'attivazione in quanto le forze applicate sono le stesse.

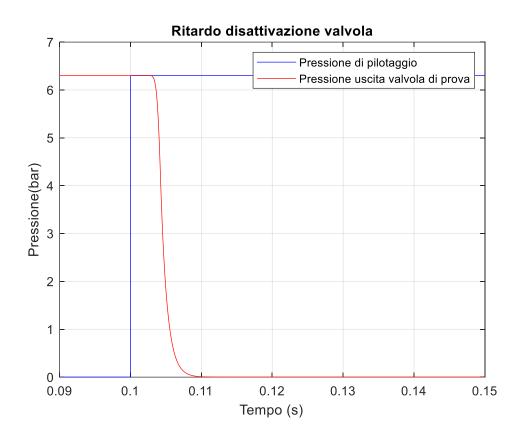


Figura 9.11 Disattivazione valvola di prova

td	toff
ms	ms
4	6,1

Tabella 9.5 Dati disattivazione

La valvola si attiva dopo circa 3 ms da quando viene imposto il pilotaggio a gradino e impiega 6,1 ms ad arrivare alla pressione ambiente. Il valore del transitorio di disattivazione (toff) è in linea con il valore sperimentale (6,6 ms). Il tempo di disattivazione (td) è stato calcolato come l'intervallo di tempo tra il gradino di pressione e il 90% della pressione di regime (5,67 bar). Ovviamente il tempo di disattivazione è molto più basso rispetto al tempo sperimentale in quanto non è presente il ritardo dovuto alla presenza del transitorio dell'elettrovalvola di pilotaggio.

9.3 Modello 2: valvola di prova ed elettrovalvola

Come illustrato nel capitolo 7, il secondo modello è più completo rispetto al primo in quanto presenta anche le curve di pressione di pilotaggio della valvola di prova, generate dell'elettrovalvola di pilotaggio.

Anche in questo modello sono state eseguite prove di attivazione e disattivazione della valvola di prova.

9.3.1 Attivazione valvola di prova

Nella seguente tabella vengono riportati i dati relativi alla simulazione del secondo modello.

Valvola di prova								
Dato	Valore	Unità di misura	Descrizione					
m	0,017	Kg	Massa cassetto valvola					
γ	1,74	N*s/m	Coefficiente attrito viscoso					
F_att	1	N	Forza d'attrito					
pc2	0	bar	Pressione di pilotaggio chiusura					
Α	1,33·10 ⁻⁴	m^2	Sezione pilotaggio					
x_max	0,007	m	Spostamento massimo cassetto					
p_alim	6,3	bar	Pressione alimentazione valvola di prova					
b	0,23	-	Rapporto critico valvola					
V_fin	5,13·10 ⁻⁶	m^3	Volume tubo di uscita					
Т	293	K	Temperatura aria					
R	287	J/(kg*K)	Costante dei gas					
ρ	1,2047	kg/m^3	Densità aria					
С	41.43	I/(min*bar)	Conduttanza valvola					

Tabella 9.6 Dati valvola di prova attivazione

Elettrovalvola di pilotaggio								
Dato	Valore Unità di misura		Descrizione					
m	0,007	Kg	Massa cassetto valvola					
γ	1,74	N*s/m	Coefficiente attrito viscoso					
F_att	3	N	Forza d'attrito					
S	1,04·10 ⁻⁴	m^2	Sezione bobina					
x_max	0,007	m	Spostamento massimo cassetto					
p_alim	6,3	bar	Pressione alimentazione valvola di prova					
b	0,23	-	Rapporto critico valvola					
V_fin	2,35·10 ⁻⁵	m^3	Volume tubo di uscita					
Т	293	K	Temperatura aria					
R	287	J/(kg*K)	Costante dei gas					
ρ	1,2047	kg/m^3	Densità aria					
С	37	I/(min*bar)	Conduttanza valvola					
V	24	V	Tensione solenoide					
Rel	192	Ω	Resistenza solenoide					
L	0,122	Н	Induttanza solenoide					
N	3700	-	N. spire solenoide					
mu0	1,26·10 ⁻⁶	H/m	Permeabilità magnetica aria					
10	0,0005	m	Gap minimo di aria					
k	1700	N/m	Rigidezza molla					
F0	0,5	N	Precarico molla					

Tabella 9.7 Dati elettrovalvola di pilotaggio attivazione

I dati relativi ai componenti elettrici dell'elettrovalvola (induttanza, sezione della bobina, resistenza elettrica, numero di spire), sono stati forniti direttamente dalla casa costruttrice dei solenoidi (vedi Allegato in fondo).

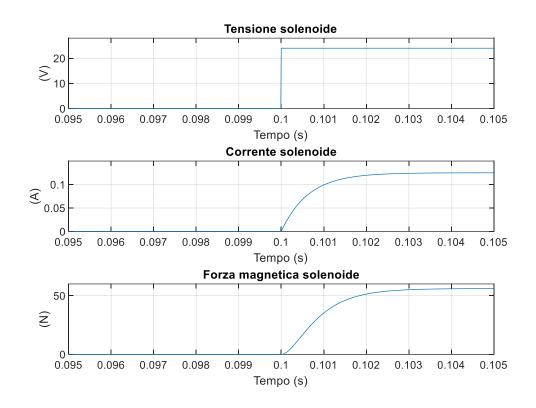


Figura 9.12 Dati solenoide attivazione

A 0,1s viene attivata l'elettrovalvola, di conseguenza la tensione passa rapidamente da 0 a 24 V. Subito il valore di corrente inizia a salire e dopo un transitorio di circa 3 ms arriva al valore di regime (0,125 A). Analogamente alla corrente sale il valore di forza magnetica prodotta dal solenoide e scaricata sul cassetto dell'elettrovalvola.

In questo modello si è scelto di non considerare la variazione di induttanza dovuta allo spostamento del cassetto, infatti il transitorio della corrente non subisce variazioni brusche.

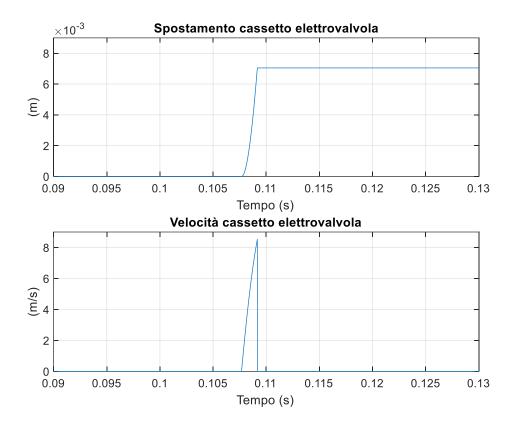


Figura 9.13 Spostamento e velocità cassetto elettrovalvola

Il segnale di tensione è stato dato al valore di 0,1 s e dopo circa 8,5 ms il cassetto dell'elettrovalvola inizia a muoversi. Lo spostamento segue una curva di secondo grado e termina al valore massimo di 7 mm come impostato dalla simulazione. La velocità invece è lineare e supera i 8 m/s per poi scendere bruscamente a 0 nel momento in cui il cassetto arriva a fine corsa. Lo spostamento del cassetto dell'elettrovalvola dura circa 1,5 ms.

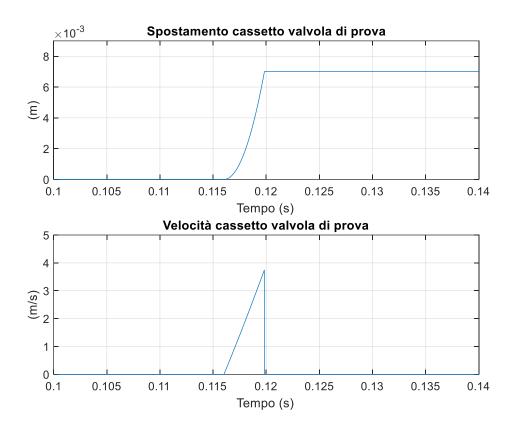


Figura 9.14 Spostamento e velocità cassetto valvola di prova

Dopo circa 15 ms dall'attivazione del solenoide dell'elettrovalvola e circa 6 ms dall'attivazione dell'elettrovalvola, il cassetto della valvola di prova inizia a muoversi. Lo spostamento segue una curva di secondo grado e termina al valore massimo di 7 mm come impostato dalla simulazione. La velocità supera i 3,5 m/s per poi scendere bruscamente a 0 nel momento in cui il cassetto arriva a fine corsa. Lo spostamento del cassetto dell'elettrovalvola dura circa 4 ms.

Lo spostamento del cassetto della valvola di prova avviene in modo più lento rispetto a quello dell'elettrovalvola, poiché nel momento dell'attivazione le forze che agiscono sul cassetto della valvola di prova sono inferiori di circa 30 N rispetto all'elettrovalvola. Per lo stesso motivo il cassetto della valvola di prova raggiunge velocità inferiori rispetto a quello dell'elettrovalvola.

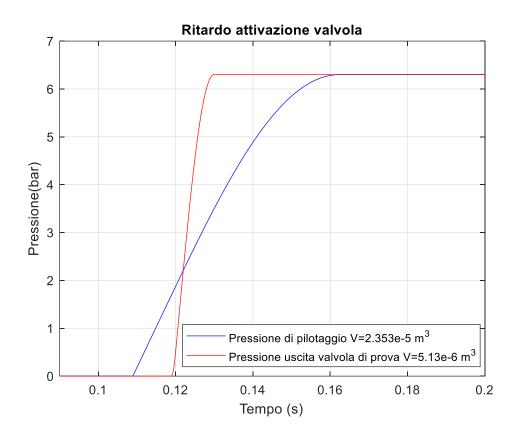


Figura 9.15 Ritardo attivazione valvola

ta	ton	ton1
ms	ms	ms
7,5	11,2	52,2

Tabella 9.8 Dati attivazione valvola

L'elettrovalvola si attiva dopo circa 8,5 ms da quando viene alimentato il solenoide e impiega 52,2 ms ad arrivare alla pressione di regime. Il valore del transitorio di attivazione (ton1) è leggermente più basso rispetto al valore sperimentale (54,8 ms). La valvola di prova invece, si attiva circa dopo 8 ms dall'attivazione dell'elettrovalvola e impiega 11,2 ms ad arrivare a regime. Il transitorio di attivazione (ton) è leggermente più basso rispetto al valore sperimentale (12,4 ms).

Il transitorio di attivazione della valvola di prova (ton) è inferiore al transitorio dell'elettrovalvola (ton1) per via dei volumi dei vari tubi in uscita dalle valvole. Infatti il volume del tubo di pilotaggio è maggiore rispetto al volume del tubo di uscita. I valori sono riportati nella didascalia del grafico.

Il tempo di attivazione ta, calcolato seguendo la normativa è molto vicino al valore sperimentale (7,4 ms).

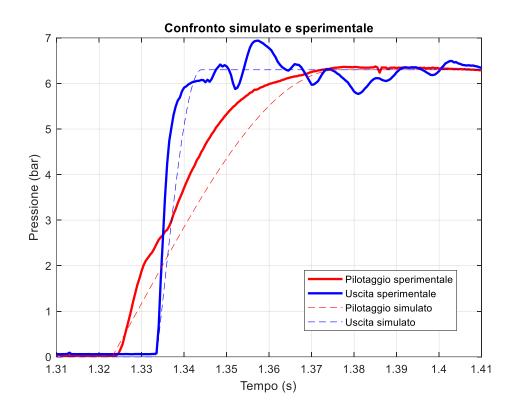


Figura 9.16 Confronto attivazione prova sperimentale e simulata

In figura è visibile il confronto diretto tra le curve sperimentali e quelle simulate. Per quanto riguarda la valvola di prova (curve blu), l'andamento delle due curve è molto simile con una pendenza leggermente inferiore per la curva simulata. Inoltre la curva sperimentale non arriva subito a regime (6,3 bar) ma oscilla intorno al valore di regime per circa un centinaio di ms.

Per le curve di pilotaggio invece le pendenze sono diverse nonostante i tempi di inizio e termine dell'ascesa siano molto vicini. La curva sperimentale ha una variazione di pendenza nel momento in cui raggiunge circa 2,5 bar di pressione, cioè nel momento in cui avviene la commutazione della valvola di prova. In questo istante il cassetto della valvola di prova si sposta aumentando il volume totale del pilotaggio e di conseguenza diminuisce la pendenza della curva di pressione di pilotaggio. Quando il

cassetto della valvola di prova arriva a fine corsa, il volume di pilotaggio si stabilizza e la pendenza della curva di pilotaggio torna ai valori iniziali. Nella simulazione non viene considerato questo aumento di volume dovuto allo spostamento del cassetto e la pendenza della curva non cambia nell'intorno dei 2,5 bar.

9.3.2 Disattivazione valvola di prova

Nella simulazione della disattivazione della valvola di prova del modello 2, i cambiamenti principali riguardano la valvola di prova e non l'elettrovalvola.

Per completezza vengono riportati i dati utilizzati nella simulazione per l'elettrovalvola, e i grafici relativi alle grandezze dell'elettrovalvola. Siccome non ci sono cambiamenti sostanziali rispetto alla simulazione di attivazione, per i commenti a questi grafici si rimanda al paragrafo precedente.

Nelle seguenti tabelle vengono mostrati i dati utilizzati per la simulazione.

Valvola di prova								
Dato	Valore	Unità di misura	Descrizione					
m	0,017	Kg	Massa cassetto valvola					
γ	1,74	N*s/m	Coefficiente attrito viscoso					
F_att	1	N	Forza d'attrito					
pc1	0	bar	Pressione di pilotaggio chiusura					
Α	1,33·10 ⁻⁴	m^2	Sezione pilotaggio					
x_max	0,007	m	Spostamento massimo cassetto					
p_alim	6,3	bar	Pressione alimentazione valvola di prova					
b	0,23	-	Rapporto critico valvola					
V_fin	5,13·10 ⁻⁶	m^3	Volume tubo di uscita					
Т	293	K	Temperatura aria					
R	287	J/(kg*K)	Costante dei gas					
ρ	1,2047	kg/m^3	Densità aria					
С	41,43	I/(min*bar)	Conduttanza valvola					

Tabella 9.9 Dati disattivazione valvola di prova

Elettrovalvola di pilotaggio								
Dato	Valore	Unità di misura	Descrizione					
m	0,007	Kg	Massa cassetto valvola					
γ	1,74	N*s/m	Coefficiente attrito viscoso					
F_att	3	N	Forza d'attrito					
S	1,04·10 ⁻⁴	m^2	Sezione bobina					
x_max	0,007	m	Spostamento massimo cassetto					
n alim	6,3	bar	Pressione alimentazione valvola					
p_alim	0,3	Dal	di prova					
b	0,23	0,23 - Rapporto critico valvola						
V_fin	2,35·10 ⁻⁵	m^3	Volume tubo di uscita					
Т	293	K	Temperatura aria					
R	287	J/(kg*K)	Costante dei gas					
ρ	1,2047	kg/m^3	Densità aria					
С	37	I/(min*bar)	Conduttanza valvola					
V	24	V	Tensione solenoide					
Rel	192	Ω	Resistenza solenoide					
L	0,122	Н	Induttanza solenoide					
N	3700	-	N. spire solenoide					
mu0	1.26·10 ⁻⁶	H/m	Permeabilità magnetica aria					
10	0,0005	m	Gap minimo di aria					
k	1700	N/m	Rigidezza molla					
F0	0,5	N	Precarico molla					

Tabella 9.10 Dati elettrovalvola disattivazione

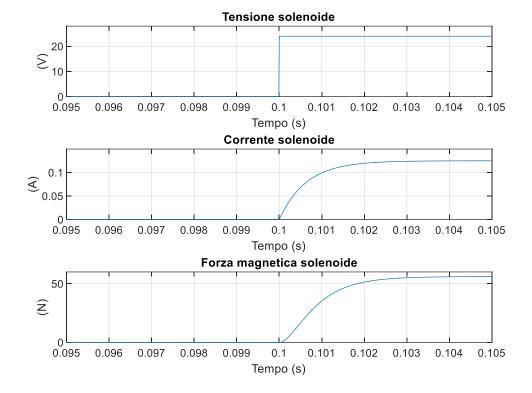


Figura 9.17 Dati solenoide elettrovalvola

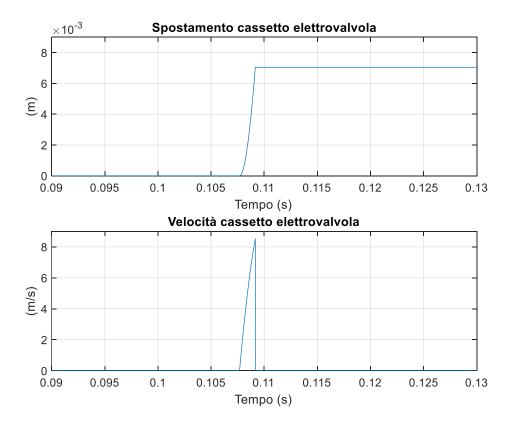


Figura 9.18 Spostamento e velocità cassetto elettrovalvola

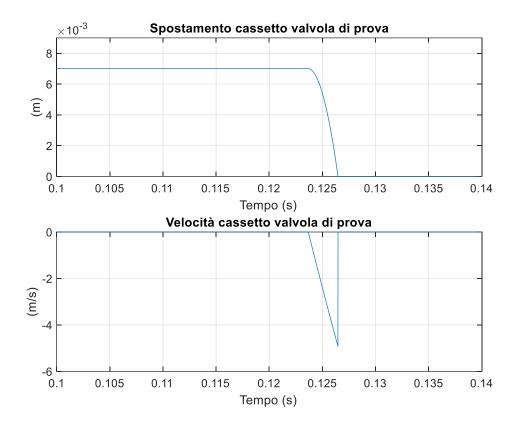


Figura 9.19 Spostamento e velocità cassetto valvola di prova

In fase di disattivazione il cassetto parte dalla posizione di 7 mm e torna indietro fino ad arrivare a 0. L'andamento della velocità è lo stesso della fase di attivazione ma di segno opposto, proprio perché il cassetto si muove in direzione opposta.

Il cassetto inizia a muoversi circa 23 ms dopo l'alimentazione dell'elettrovalvola, tempo maggiore rispetto alla fase di attivazione.

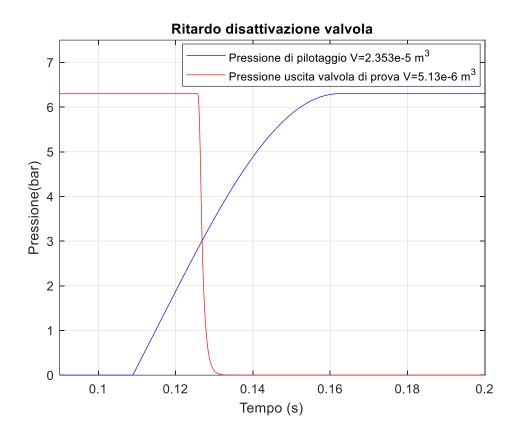


Figura 9.20 Ritardo disattivazione valvola di prova

td	toff	ton2
ms	ms	ms
13,5	5,7	53,8

Tabella 9.11 Dati disattivazione

L'elettrovalvola impiega 53,8 ms ad arrivare alla pressione di regime. Il valore del transitorio di attivazione (ton2) è leggermente più basso rispetto al valore sperimentale (54,9 ms). La valvola di prova invece, si disattiva circa dopo 17 ms dall'attivazione dell'elettrovalvola e impiega 5,7 ms ad arrivare al valore di pressione ambiente (0 bar). Il transitorio di disattivazione (toff) è molto simile al valore sperimentale (6,6 ms).

Il tempo di disattivazione (td), calcolato seguendo la normativa (10% del pilotaggio e 90% dell'uscita), è leggermente più alto rispetto al valore sperimentale (11,9 ms).

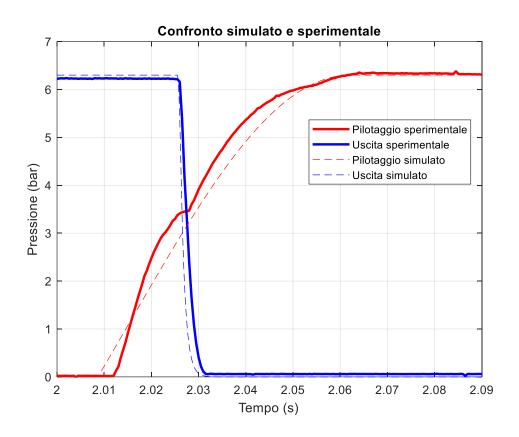


Figura 9.21 Confronto disattivazione simulato e sperimentale

In disattivazione le curve di pressione in uscita dalla valvola di prova sperimentale e simulata non presentano grandi differenze. Come si può osservare hanno pendenze simili e i tempi iniziali e finali di transitorio sono molto vicini.

Per l'elettrovalvola, come accadeva in attivazione della valvola di prova, la curva sperimentale presenta una variazione di pendenza quando questa raggiunge il valore di circa 3,5 bar, che rappresenta il valore in cui il cassetto della valvola di prova inizia a muoversi e di conseguenza aumenta il volume del pilotaggio. La curva simulata invece non presenta questa variazione di pendenza in quanto il volume del condotto di pilotaggio viene mantenuto costante per tutta la simulazione.

9.4 Riepilogo

In questa tabella di riepilogo sono visibili i tempi ottenuti dalle prove sperimentali e dai due modelli utilizzati durante la trattazione.

	ta	td	ton	toff	ton1	ton2
	ms	ms	ms	ms	ms	ms
Sperimentale	7,4	11,9	12,4	6,6	54,8	54,9
Modello 1	3,4	4	10,4	6,1	-	-
Modello 2	7,5	13,5	11,2	5,7	52,2	53,8

Tabella 9.12 Riepilogo risultati

Come detto in principio i tempi di maggior interesse sono il tempo di attivazione (ta) e di disattivazione (td) della valvola di prova, calcolati secondo la normativa ISO 12238. Confrontando i risultati sperimentali con quelli simulati si può osservare come per il modello 2 i tempi di attivazione e disattivazione della valvola siano molti vicini. In particolare i tempi di attivazione sono pressoché uguali ma quelli di disattivazione presentano una variazione di circa 1,6 ms. Non vengono considerati invece i tempi di attivazione e disattivazione del modello 1 in quanto il segnale di pressione di pilotaggio risulta essere a gradino e quindi non è considerato il transitorio dell'elettrovalvola che influisce molto sul risultato finale.

I tempi dei transitori delle valvole non hanno un grande significato al fine del risultato finale, ma sono utili per capire se i modelli creati riescano a simulare in modo corretto ciò che avviene nella realtà. I transitori che si discostano maggiormente dai risultati sperimentali sono quelli di attivazione sia della valvola di prova che dell'elettrovalvola. Gli scostamenti sono nell'ordine di 1/2 ms. Il transitorio di disattivazione della valvola di prova (toff) è invece molto vicino al risultato sperimentale per entrambi i modelli realizzati.

10 Conclusioni

L'obiettivo di questa trattazione è stato quello di andare a studiare, progettare e realizzare un banco prova per la misura del tempo di risposta di attivazione e disattivazione di valvole pneumatiche di uso industriale.

Dopo aver progettato il banco prova seguendo le normative ISO 12238 e ISO 6358, si è cercato di realizzare un modello che, nel modo più accurato possibile, rappresentasse la dinamica delle valvole in prova.

Non è stato possibile, a causa della pandemia in atto in questo periodo, la quale ha rallentato le spedizioni di materiale occorrente e limitato l'accesso ai laboratori del Politecnico, realizzare il banco prova seguendo le modalità definite da normativa ed utilizzando i componenti scelti in fase di progettazione.

Si è deciso comunque, per una completezza della trattazione, di eseguire delle prove sperimentali utilizzando un banco di vecchia data adibito ad uso didattico, presente in un laboratorio del Politecnico. Questo banco utilizza come valvola in prova una valvola pneumatica 5/2 bistabile a comando pneumatico di taglia 1/8". Nonostante il banco in questione segua solo in modo parziale la normativa di riferimento ISO 12238, i risultati ottenuti (visibili nel capitolo precedente), sono stati molto soddisfacenti, in quanto sia a livello numerico che grafico esiste una corrispondenza tra ciò che si ottiene con il modello e ciò che effettivamente accade nella realtà. Di seguito vengono mostrati i risultati finali della prova con la variazione percentuale.

	ta	td
	ms	ms
Sperimentale	7,4	11,9
Modello 2	7,5	13,5
Variazione %	1%	13%

A livello industriale, conoscere le caratteristiche dinamiche di valvole pneumatiche è essenziale per ottenere un livello di automazione adeguato in riferimento allo scopo per le quali vengono utilizzate. Questa trattazione non deve essere un punto di arrivo, ma lo sviluppo deve continuare. Lo scopo iniziale di questo lavoro era quello di progettare e realizzare un banco prova per la misura dei tempi di risposta delle valvole pneumatiche per uso didattico, in modo da sostituire il banco di vecchia data già presente in laboratorio. La creazione di un modello dinamico, però, ha messo in luce un utilizzo molto più importante del semplice confronto con il banco sperimentale. Se si ha a disposizione un modello dinamico accurato è possibile eseguire diverse prove virtuali, anche utilizzando valvole di taglia e tipologia diversa, senza dover realizzare fisicamente il banco e dover sostenere i costi per la realizzazione ed acquisto dei componenti necessari.

Di seguito vengono illustrati i principali miglioramenti da apportare al modello dinamico ed al banco prova reale:

- Nell'equilibrio meccanico della valvola di prova, le incognite principali sono state i valori di forza d'attrito e di coefficiente di attrito viscoso, dei quali non si avevano valori precisi ma solamente alcuni dati ricavati dalla letteratura.
 Sarebbe utile riuscire a stimare in modo preciso questi valori facendo delle prove direttamente sulla valvola di prova stessa.
- Lo stesso discorso vale per l'equilibrio meccanico dell'elettrovalvola di pilotaggio, in cui oltre a forza d'attrito e coefficiente di attrito viscoso, le incognite riguardano i dati legati alla molla, quindi rigidezza e precarico.
- Nel modello utilizzato in precedenza, l'induttanza del solenoide rimane costante durante lo spostamento del cassetto della valvola. In realtà non dovrebbe essere così in quanto lo spostamento del cassetto della valvola si traduce in una variazione di riluttanza del solenoide con conseguente variazione di induttanza. Questo implica una variazione di corrente e di forza magnetica che non è stata considerata in questo modello. Una possibile fonte di miglioramento potrebbe essere quindi quella di andare a modificare il comportamento di questo parametro.

- La conduttanza e il rapporto critico della valvola variano al variare dello spostamento del cassetto della valvola. In prima approssimazione si è considerata la variazione della conduttanza in modo lineare rispetto allo spostamento del cassetto. In realtà si potrebbe migliorare il modello utilizzando un modello CFD in cui si riesca a calcolare in modo preciso la variazione dell'area di passaggio del fluido all'interno della valvola al variare dello spostamento del cassetto. Oppure, in modo meno preciso, si potrebbero realizzare delle curve di portata sperimentali (come quelle realizzate nel paragrafo 6.1), al variare dello spostamento del cassetto; muovendo il cassetto di pochi decimi di millimetro ogni volta si va a calcolare dalla curva sperimentale di portata, la conduttanza e il rapporto critico della valvola.
- Un parametro che si potrebbe considerare nel modello futuro è l'induttanza pneumatica nei tubi, che implica una caduta di pressione e una variazione di portata all'interno dei tubi stessi.
- Per avere un modello dinamico che sia accurato e segua in modo preciso la normativa ISO 12238 di riferimento, è necessario ovviamente avere un banco prova reale da utilizzare per confrontare i risultati. Un ottimo modo per migliorare questa trattazione è quello di andare a realizzare il banco prova progettato nei primi capitoli.

Seguendo queste indicazioni è possibile migliorare il modello dinamico e renderlo fruibile ad applicazioni più elevate di livello industriale, per andare a capire ad esempio quale taglia e tipologia di valvola sia più indicata per uno specifico utilizzo.

A livello personale, l'approccio alla progettazione di un banco prova mi ha permesso di approfondire le mie conoscenze in campo pneumatico, migliorare le mie capacità nella ricerca di normative e documenti da utilizzare e consolidare l'utilizzo di software utili nella progettazione come Solidworks e Matlab.

11 Bibliografia

- [1] G. Belforte, Manuale di pneumatica, Tecniche Nuove, 2005.
- [2] ISO, BS ISO 12238 Pneumatic fluid power Directional control valves Measurement of shifting time, 2001.
- [3] ISO, BS ISO 6358-1 Pneumatic fluid power Determination of the flow rate characteristic of components using compressible fluids, 2013.
- [4] Belforte, Manuale di pneumatica, Cuneo, 1982.
- [5] P. Beater, Pneumatic Drives, Springer, 2007.
- [6] M. Sorli e G. Quaglia, Meccatronica, Epics, 2017.
- [7] N. Songlin, L. Xiangyang, Y. Fanglong, J. Hui e Z. Jingxiu, «Development of a High-Pressure Pneumatic On/Off Valve with High Transient Performances Direct-Driven by Voice Coil Motor,» Applied Sciences, 2018.
- [8] P. X. Li, M. Su e D. B. Zhang, «Response characteristic of high-speed on/off valve with double voltage driving circuit,» *IOPScience*, vol. 220, 2017.
- [9] S. Wenfu e M. Xiaoqin, «Simulation of Solenoid Valve Characteristics of Electronically Controlled Fuel System for Diesel Engine,» *IOPScience*, vol. 381, 2018.
- [10] S. Sarathdas, P. K. Deepak e K. S. Kumar, «Investigation of time analysis of a pneumatic valve,» *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)*, vol. 5, pp. 342-347, 2016.
- [11] K. A. Venkataraman, K.Kanthavel e B. N. Kumar, «Investigation of response time parameters of a pneumatic 3/2 direct acting solenoid valve under various working pressure,» *ETASR-Engineering Technology & Applied Science Research*, vol. 3, n. 4, pp. 502-505, 2013.

[12] X. Zhang, Y. Lu, Y. Li, C. Zhang e R. Wang, «Numerical calculation and experimental study on response characteristics of pneumatic solenoid valves,» *Measurement and control,* pp. 1-12, 2019.

Allegati

Script Matlab calcolo curva di portata teorica Cap. 6

```
%% Enrico Filippi
% A.A 2019/2020
% Laurea magistrale ing. meccanica
% Tesi
% Banco per la misura del tempo di risposta di una valvola
% Analisi statica
clear all
clc
close all
% Valvola di prova
C= 264.26; %conduttanza valvola 1/(min*bar)
pin=[2,4,6,8,10]; %pressione alimentazione [bar]
b=0.27; %rapporto critico valvola
for i=1:length(pin)
    pout=linspace(0,pin(i),500); %pressione uscita [Pa]
   for j=1:length(pout)
    r=pout(j)/pin(i);
    if r>b
        Q(i,j)=C*pin(i)*sqrt(1-((r-b)/(1-b))^2)*sqrt(293/253);
%Portata subsonica [m^3/s]
    else
        Q(i,j)=C*pin(i)*sqrt(293/253); %Portata sonica [m^3/s]
    end
   end
   figure(1)
   hold on
plot(pout,Q(i,:));
grid on
xlabel('Pout (bar)');
ylabel('Portata volumica (Nl/min)');
title('Curve di portata');
legend('Pin=2 bar','Pin=4 bar','Pin=6 bar','Pin=8 bar','Pin=10
bar');
end
```

Script Matlab Attivazione modello 1 (Capitolo 7).

```
%% Enrico Filippi
% A.A. 2019/2020
% Laurea magistrale ing. meccanica
% Tesi
% Banco per la misura del tempo di risposta di una valvola
clear all
clc
close all
% Valvola di prova
```

```
m= 0.017; %massa cassetto valvola [kg]
gamma= 1.74*10^0; %coeff. attrito viscoso [N*s/m]
F att= 1; %forza attrito valvola [N]
pc1= 630000; %pressione pilotaggio 1 [Pa]
pc2= 0; %pressione pilotaggio 2 [Pa]
A=0.0001327; %area pilotaggio otturatore [m^2]
xv max= 0.007; %massimo spostamento otturatore [m]
Cmax= 41.43/6e9; %conduttanza valvola [m^3/(s*Pa)]
pin=6.3*10^5; %pressione ingresso [Pa]
b=0.23; %rapporto critico valvola
Vfin= 5.13*10^-6; % volume tubo uscita valvola [m^3]
Tout= 293; % temperatura aria [K]
R=287; %costante dei gas [J/(kg*K)]
ro=1.2047; %densità aria ingresso [kg/m^3]
% rmax=1.055e-3;
sim simulink semplice;
figure(1)
subplot(2,1,1)
plot(t,xv);
arid on
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('(m)');
title('Spostamento cassetto valvola di prova')
axis([0.099 0.109 0 9e-3]);
subplot(2,1,2)
plot(t,xvd);
grid on
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('(m/s)');
title('Velocità cassetto valvola di prova')
axis([0.099 0.109 0 9]);
figure(2)
plot(t,Q*60000,'r');
grid on
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Portata volumica (1/min)');
title('Portata valvola')
axis([0.09 0.13 0 275]);
% figure(3)
% plot(t,eqf);
% grid on
% xlabel('Tempo (s)');
% ylabel('Forza (N)');
% title('Forze risultanti sul cassetto')
% axis([0.06 0.15 -5 90]);
figure (4)
plot(t,pp/10^5,'b',t,pout/10^5,'r');
grid on
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Pressione(bar)');
title('Ritardo attivazione valvola')
```

```
legend('Pressione di pilotaggio','Pressione uscita valvola di
prova')
axis([0.09 0.15 0 7]);
```

Script Matlab Attivazione modello 2 (Capitolo 7).

```
%% Enrico Filippi
% A.A 2019/2020
% Laurea magistrale ing. meccanica
% Tesi
% Banco per la misura del tempo di risposta di una valvola
clear all
clc
close all
% Elettrovalvola di pilotaggio 1
V= 24; %tensione alimentazione elettrovalvola [V]
Rel=192; % resistenza elettrica circuito [ohm]
L=0.122; %induttanza [H]
mu0= 1.26*10^-6; %permeabilità magnetica aria [H/m]
10=0.0005;
S=1.04*10^-4; %sezione bobina [m^2]
N=3700; %numero di spire bobina
F att1= 3; %forza attrito elettrovalvola [N]
gamma= 1.74*10^0; %coefficiente attrito viscoso [N*s/m]
k=1700; %rigidezza molla [N/m]
F0=0.5; %precarico molla [N]
m1= 0.007; %massa cassetto elettrovalvola [Kg]
Vfin1= 2.353*10^-5; % volume tubo uscita valvola [m^3]
Cmax1= 37/6e9; %conduttanza valvola [m^3/(s*Pa)]
% rmax1=1e-3;
% Valvola di prova
m= 0.017; %massa cassetto valvola [kg]
gamma= 1.74*10^0; %coeff. attrito viscoso [N*s/m]
F att= 0.5; %forza attrito valvola [N]
%pc1= 600000; %pressione pilotaggio 1 [Pa]
pc2= 0; %pressione pilotaggio 2 [Pa]
A=0.00013273; %area pilotaggio otturatore [m^2]
xv max= 0.007; %massimo spostamento otturatore [m]
Cmax= 41.43/6e9; %conduttanza valvola [m^3/(s*Pa)]
pin=6.3*10^5; %pressione ingresso [Pa]
b=0.23; %rapporto critico valvola
Vfin= 5.13*10^-6; % volume tubo uscita valvola [m^3]
Tout= 293; % temperatura aria [K]
R=287; %costante dei gas [j/(kg*K)]
ro=1.2047; %densità aria ingresso [kg/m^3]
% rmax=1.055e-3;
sim BancolSimulink Lcost inv;
figure(1)
```

```
subplot(3,1,2)
plot(t,i);
grid on
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('(A)');
title('Corrente solenoide')
axis([0.095 0.105 0 0.15]);
subplot(3,1,3)
plot(t,Fmagn);
grid on
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('(N)');
title('Forza magnetica solenoide')
axis([0.095 0.105 0 60]);
subplot(3,1,1)
plot(t,tens);
grid on
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('(V)');
title('Tensione solenoide')
axis([0.095 0.105 0 28]);
figure(2)
subplot(2,1,1)
plot(t,xvp);
grid on
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('(m)');
title('Spostamento cassetto elettrovalvola')
axis([0.09 0.13 0 9e-3]);
subplot(2,1,2)
plot(t,xvdp);
grid on
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('(m/s)');
title('Velocità cassetto elettrovalvola')
axis([0.09 0.13 0 9]);
figure(3)
subplot(2,1,1)
plot(t,xv);
grid on
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('(m)');
title('Spostamento cassetto valvola di prova')
axis([0.1 \ 0.14 \ 0 \ 9e-3]);
subplot(2,1,2)
plot(t,xvd);
grid on
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('(m/s)');
title('Velocità cassetto valvola di prova')
axis([0.1 0.14 0 5]);
% figure (4)
% plot(t,eqfp,t,eqf);
% grid on
% xlabel('Tempo (s)');
% ylabel('Forza (N)');
% title('Forze risultanti sul cassetto')
% legend('Elettrovalvola di pilotaggio','Valvola di prova')
```

```
% axis([0.09 0.17 -10 90]);
figure(5)
plot(t,Qp*60000,'b',t,Q*60000,'r');
grid on
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Portata volumica (1/min)');
title('Confronto portate valvole')
legend('Elettrovalvola di pilotaggio', 'Valvola di prova')
axis([0.09 0.2 0 275]);
figure(6)
plot(t,pc1*10^-5,'b',t,pout*10^-5,'r');
grid on
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Pressione(bar)');
title('Ritardo attivazione valvola')
legend('Pressione di pilotaggio V=2.353e-5 m^3','Pressione uscita
valvola di prova V=5.13e-6 m^3')
axis([0.09 0.2 0 7]);
load Test9.txt
p apert=Test9(:,1);
p usc=Test9(:,3);
fs=2000;
dt=1/fs;
ts=[0:length(p apert)-1]*dt;
figure()
plot(ts,p_apert,'r','linewidth' ,2),hold on
plot(ts,p_usc,'b','linewidth',2),hold on,grid on
plot(t+1.\overline{2}1413, pc1*10^{-5}, 'r--');
plot(t+1.21413, pout*10^-5, 'b--')
legend('Pilotaggio sperimentale','Uscita sperimentale','Pilotaggio
simulato','Uscita simulato');
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Pressione (bar)');
title('Confronto simulato e sperimentale')
axis([1.31 1.41 0 7]);
Script Matlab Portata sperimentale (Capitolo 8).
clc
clear all
close all
load Portata_6bar_1 REAL.txt
Q=Portata 6bar 1 REAL(:,1);
p=Portata 6bar 1 REAL(:,2);
load portataex REAL.txt
Qex=portataex REAL(:,2);
                                 268.4
```

pex=portataex REAL(:,1);

```
Ps=6.3e5;
R0=1.058e-3;
                   %Raggio ugello
T=293; %Temperatura assoluta [K]
k=1.4;
R=287.053; %Costante dell'aria [J/kg/K]
mu=1.81e-5; %viscosita` dinamica dell'aria a 20°C [Pa s]
pa=101325; %pressione ambiente
Pc=linspace(0,Ps,200);
rho=pa/(R*T);
cG=60000/rho;
b=0.23;
P sonic=(2/(k+1))^(k/(k-1));
d=2*R0;
for i=1:length(Pc)
    pc=Pc(i);
%%Formula ISO
%Subsonico
c=pc/Ps>b;
q ISO(c) = sqrt(293/T)*0.686/sqrt(R*T)*Ps*pi*R0^2*sqrt(1-((pc/Ps-
b) /(1-b)) ^2);
%Sonico
c=pc/Ps<=b;
g ISO(c)=sqrt(293/T)*0.686/sqrt(R*T)*Ps*pi*R0^2;
G ISO(i) = g ISO*cG;
end
C=max(G ISO)/(Ps*10^-5); %Conduttanza [1/(min*bar)]
figure
plot(Pc/Ps,G_ISO,'b','linewidth',2),hold on
plot((p/p(1))+0.025,Q,'r','linewidth',2)
plot((pex/pex(1))+0.025,Qex,'g','linewidth',2)
xlabel('Rapporto di pressioni [Pout/Pin]'),ylabel('Portata [l/min
ANR 20°C]'),
grid on
legend('Teorica','Prova 1','Prova 2');
axis([0 1 0 300])
Script Matlab taratura trasduttori (Capitolo 8).
clc
close all
clear all
load sperimentale tesi.txt
p misur=sperimentale tesi(:,1);
V apert=sperimentale tesi(:,2);
V chius=sperimentale_tesi(:,3);
V usc=sperimentale tesi(:,4);
figure()
plot(V apert,p misur,'b'),hold on
plot(V chius,p misur,'r'),hold on
```

```
plot(V_usc,p_misur,'g'),hold on
xlabel('Tensione trasduttori [V]'),ylabel('Pressione [bar]'),
grid on
legend('Trasduttore pilotaggio 1','Trasduttore pilotaggio
2','Trasduttore uscita valvola');

[Pol_ap] = polyfit(V_apert,p_misur,1)
[Pol_ch] = polyfit(V_chius,p_misur,1)
[Pol_us] = polyfit(V_usc,p_misur,1)
```

Script Matlab dati sperimentali (Capitolo 8).

```
clc
clear all
close all
load Test9.txt
p apert=Test9(:,1);
p chius=Test9(:,2);
p usc=Test9(:,3);
fs=2000;
dt=1/fs;
t=[0:length(p apert)-1]*dt;
figure()
plot(t,p_apert,'b','linewidth' ,1 ),hold on
plot(t,p_chius,'r','linewidth' ,1 ),hold on
plot(t,p_usc,'g','linewidth' ,1 ),hold on,grid on
legend('pc1', 'pc2', 'pout');
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Pressione (bar)');
title('Prova sperimentale')
```

Catalogo serbatoio Baglioni



DIRETTIVA 2014/29/UE PRESSIONE DI ESERCIZIO 11/16 BAR TEMPERATURA DI ESERCIZIO -10 +100°C

®/ | <u>@</u>

- MATERIALE: ACCIAIO AL CARBONIO
- FLUIDO CONTENUTO: ARIA COMPRESSA / AZOTO (GRUPPO 2)
 TRATTAMENTO: VERNICIATURA ESTERNA DI COLORE BLU RAL 5015 (STANDARD) E TRATTAMENTO INTERNO E ESTERNO DI ZINCATURA
- SU RICHIESTA: MANICOTTI SUI FONDI DA 1"

ORIZZONTALI PIEDI FISSI

CODICE	Direttiva	Capacità nominale	Pressione esercizio	De	A	В	с	D	E	Н	а	b	c	x	у	I	z	Peso
RAL 5015		Lt	Bar	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	inch	inch	inch	inch	Кд
VEC01294	2014/29/UE	5	11	150	370	37,5	200	140	191	120	- (-	137,5	1/2"	-	-	1/4"	6,5
VEC01249	2014/29/UE	10	11	169	506	85	240	172	205	115	-	60	50	1/2"	-	3/8"	3/8"	8
VEC01237	2014/29/UE	15	11	196	522	85	240	172	205	135	-	60	50	1/2"	-	3/8"	3/8"	9
VEC01250	2014/29/UE	24	11	240	592	95	260	180	235	165	-	60	50	1/2"	-	3/8"	3/8"	10
VEC01251	2014/29/UE	50	11	305	784	90	400	236	285	203	60	60	60	1/2"	1/2"	1/2"	3/8"	19
VEC01715	2014/29/UE	24	16	240	592	95	260	180	235	165	-	60	50	1/2"	-	3/8"	3/8"	13
VEC02313	2014/29/UE	50	15	305	784	90	400	236	285	203	60	60	60	1/2"	1/2"	1/2"	3/8"	23
ZINCATO		Lt	Bar	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	inch	inch	inch	inch	Кд
VEC03220	2014/29/UE	10	11	169	506	85	240	172	205	115	-	60	50	1"	-	3/8"	1/4"	8
VEC04702	2014/29/UE	15	11	196	522	85	240	172	205	135	-	60	50	1"	-	3/8"	3/8"	9
VEC03019	2014/29/UE	24	11	240	592	95	260	180	235	165	-	60	50	1"	-	3/8"	3/8"	10
VEC02779	2014/29/UE	50	11	305	784	90	400	236	285	203	60	60	60	1"	1/2"	3/8"	3/8"	19

Catalogo trasduttore Honeywell

Pressure Sensors

Miniature Signal Conditioned

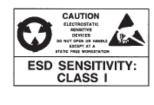


FEATURES

- FEATURES
 Smallest amplified sensor package
 Minimal PCB space
 Fully signal conditioned
 Operating temperature range from -45° to +125°C
 Silicon piezoresistive technology
 Monolithic design
 6 Pin DIP package
 Port designed for O-ring interface
 Excellent media compatibility
 Accuracy of 0.2%

PERFORMANCE CHARACTERISTICS

PERFUR	MANCE CHA	HACTERISTIC	3				
Pressure R	lange	±50 mm Hg	0-15 psi	0-100 psi	0-150 psi	0-250 psi	
Overpressi	ure, max.	±170 mm Hg	45 psi	200 psi	300 psi	500 psi	
Supply Voltage 5 VDC ±0.25							
Supply Cu	rrent		1	0 mA max.			
Output So	urce Current		0	.5 mA max.			
Output Sin	k Current		1	.0 mA max.			
Operating	Temperature		-45° to +12	25°C (-49° to	+257°F)		
Storage Te	emperature		-55° to +12	25°C (-67° to	+257°F)		
Hysteresis	& Repeatability		0.15	5% Span, Typ).		
Ratiometric 5.25 Suppl	city (at 4.75 to ly Voltage)		±0.2	5% Span, Ty	p.		
Output Loa	ad Capacitance		0.05 m	icrotarads, n	nax.		
Full Scale	-50 mm Hg +50 mm Hg All other pressi	ure ranges	4.5	50 VDC Typ. 50 VDC Typ. 50 VDC Typ.			
Media Compatibil		P1 port		ONLY: Medi	a must be co	ompatible with	
		P2 port	Media must be compatible with glass, silicon, stainless steel, invar, Sn/Ni plating or Sn/Ag solder				



40PC Series

40PC SERIES ORDER GUIDE

Catalog Listing	Pressure Range psi	Pressure Type	Lead Style
40PC001B1A	±50 mm Hg	Bi-directional	1-unformed
40PC001B2A	±50 mm Hg	Bi-directional	2-formed away from port
40PC001B3A	±50 mm Hg	Bi-directional	3-formed towards port
40PC015G1A	0-15	Gage	1-unformed
40PC015G2A	0-15	Gage	2-formed away from port
40PC015G3A	0-15	Gage	3-formed towards port
40PC100G1A	0-100	Gage	1-unformed
40PC100G2A	0-100	Gage	2-formed away from port
40PC100G3A	0-100	Gage	3-formed towards port
40PC150G1A	0-150	Gage	1-unformed
40PC150G2A	0-150	Gage	2-formed away from port
40PC150G3A	0-150	Gage	3-formed towards port
40PC250G1A	0-250	Gage	1-unformed
40PC250G2A	0-250	Gage	2-formed away from port
40PC250G3A	0-250	Gage	3-formed towards port

Note: For tubing and O-Ring interface recommendations, see the 40PC Application Note in the Reference Section.

Pressure Sensors 40PC Series

Miniature Signal Conditioned

OUTPUT PERFORMANCE CHARACTERISTICS @ 25°C, 5VDC (unless otherwise noted)

Pressure Range	Null (VDC)	Span (VDC)	Sensitivity, Typ.	Linearity, B.F.S.L (% Span) Max.		Null Shift (% Span) Max.	Span Shift (% Span) Max.	Combined Null and Span Shift (% Span) Max.
±50 mm Hg	2.50 ± 0.050	4.00 Typ.	40.0 mV/mm Hg	0.80	+25° to +50°C	±1.50	±1.50	_
					+25° to 0°C	±1.50	±1.50	_
					+25° to -18°C	±2.00	±0.75	±2.00
					+25° to +63°C	±2.00	±0.75	±2.00
0 to 15 psi	0.50 ± 0.11	4.00 ± 0.11	266.6 mV/psi	0.20	+25° to -45°C	±2.75	±1.00	±3.00
					+25° to +85°C	±2.75	±1.00	±3.00
					+25° to +125°C	_	_	_
					+25° to -18°C	±1.25	±0.75	±1.50
					+25° to +63°C	±1.25	±0.75	±1.50
0 to 100 psi	0.50 ± 0.04	4.00 ± 0.09	40.0 mV/psi	0.10	+25° to -45°C	±2.00	±1.00	±2.50
					+25° to +85°C	±2.00	±1.00	±2.50
					+25° to +125°C	±3.00	±2.00	±3.00
					+25° to -18°C	±0.75	±0.75	±0.75
					+25° to +63°C	±0.75	±0.75	±0.75
0 to 150 psi	0.50 ± 0.04	4.00 ± 0.07	26.6 mV/psi	0.10	+25° to -45°C	±1.00	±1.00	±1.00
					+25° to +85°C	±1.00	±1.00	±1.00
					+25° to +125°C	±1.50	±1.50	±1.50
					+25° to -18°C	±0.75	±0.75	±0.75
					+25° to +63°C	±0.75	±0.75	±0.75
0 to 250 psi	0.50 ± 0.04	4.00 ± 0.07	16.0 mV/psi	0.10	+25° to -45°C	±1.00	±1.00	±1.00
					+25° to +85°C	±1.00	±1.00	±1.00
					+25° to +125°C	±2.00	±2.00	±3.00

PERFORMANCE SPECIFICATIONS, TEMPERATURE/ACCURACY

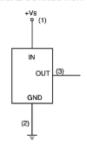
Temperature Range	Total Accuracy (% Span) Max.							
	0 to 15 psi	0 to 100 psi	0 to 150 psi	0 to 250 psi				
25°C	±0.4 (RSS)	±0.2 (RSS)	±0.2 (RSS)	±0.2 (RSS)				
-18° to +63°C	±4.0	±2.5	±2.0	±2.0				
-45° to +85°C	±4.0	±2.5	±2.0	±2.0				
-45° to +125°C		±3.0	±2.5	±3.0				

Note 1: Accuracy at 25°C is defined as RSS error for linearity, hysteresis, and repeatability.

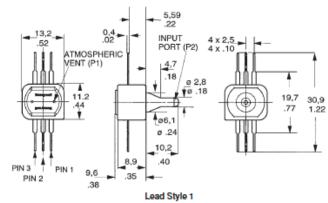
Note 2: Total accuracy is the maximum deviation from the 25°C reference transfer function at any pressure or temperature over the specified ranges. This calculation includes null, span, linearity, hysteresis, repeatability, null shift, and span shift. and span shift.

ELECTRICAL CONNECTION

MOUNTING DIMENSIONS (for reference only) mm/ln.



NOTES:
1. Square corner marks pin 1 (Vs).
2. Output is short circuit protected.



NOTE:
P1 - DRY GASES ONLY: Media must be compatible with epoxy based adhesive.
P2 - Media must be compatible with glass, silicon, stainless steel, invar, Sn/Ni plating or Sn/Ag solder.



Lead Style 3

