



**Politecnico  
di Torino**

**Politecnico di Torino**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

A.a. 2020/2021

Sessione di Laurea Dicembre 2021

# **Modellazione e progettazione di un banco dinamico per valvole pneumatiche**

Relatori:

Prof. Terenziano Raparelli

Prof. Andrea Trivella

Prof. Luigi Lentini

Prof. Giuseppe Pepe

Candidato:

Armando Mariggio'

## Sommario

Abstract .....	3
1. Introduzione .....	3
2. Tempi di risposta e frequenze di lavoro .....	3
2.1 Tempi morti .....	8
3. Descrizione banco prova .....	9
3.1. Trasduttori di pressione .....	11
3.2 Valvola in prova .....	16
3.3 Elettrovalvole di pilotaggio.....	17
3.4 Componenti elettrici.....	18
3.5 Gruppo FRL .....	20
3.6 Tubi di misura della pressione.....	20
3.7 Circuito di prova per test con pressione di monte costante .....	21
3.8 Procedura di test alternativo.....	22
4. Calcolo tempi di risposta .....	23
4.1 Calcolo tempi di risposta, filtraggio dei segnali con media mobile .....	26
4.2 Serbatoio e banco prova completo .....	27
4.3 Nuova configurazione banco prova tempi di risposta.....	31
4.4 Valutazione tempi di risposta della valvola in prova.....	35
5. Prove a pressione di monte variabile .....	43
5.1 Prova a pressione 7,5 bar .....	43
5.2 Valutazione tempi di risposta con pressione di alimentazione variabile .....	45
5.3 Prove con pressione di alimentazione pari a 5 bar .....	46
5.4 Prove con pressione di alimentazione pari a 4 bar .....	48
5.5 Prove con pressione di alimentazione pari a 3 bar .....	48
5.6 Analisi tempi di risposta di attivazione e disattivazione al diminuire della pressione di alimentazione .....	52
6. Modello matematico .....	53
6.1 Equilibrio dinamico sul cassetto .....	54
6.2 Valutazione della portata .....	57
6.3 Tempi di risposta valutati con il modello teorico .....	58
6.4 Analisi parametrica e ottimizzazione dei parametri di attrito.....	61
6.5 Modello di disattivazione .....	70
6.6 Modello matematico con non linearità.....	75
7. Conclusioni .....	81
Bibliografia.....	83

## Abstract

L'oggetto della Tesi consiste nella caratterizzazione della risposta dinamica di valvole pneumatiche. Tale obiettivo è stato perseguito progettando e costruendo un banco prova per la misura del tempo di risposta di attivazione e disattivazione di valvole pneumatiche di uso industriale. La prima parte del lavoro di tesi si è focalizzato sulla progettazione teorica del banco in accordo alle normative di riferimento (ISO 12238 e ISO 6358), a ciò è seguito la realizzazione fisica del banco sul quale verranno effettuate diverse prove sperimentali per poi concludere con l'implementazione di modelli numerici in ambiente Matlab e Simulink al fine di simulare le prestazioni dinamiche delle valvole utilizzate e di confrontare i risultati simulati con quelli ottenuti sperimentalmente.

Nel capitolo 1 del presente elaborato sono specificati gli ambiti di applicazione delle valvole pneumatiche e l'importanza dei tempi di risposta. Nel capitolo 2 vengono riportati i metodi e le procedure per la valutazione dei tempi di risposta di valvole pneumatiche di diverse tipologie. Nel capitolo 3 viene presentato il banco prova progettato e realizzato con la descrizione di tutti i componenti presenti. Mentre i capitoli 4 e 5 riguardano le prove sperimentali effettuate sul banco prova, in particolare sono illustrati i segnali ottenuti per la valutazione dei tempi di risposta. Nel capitolo 6 vengono presentati due modelli dinamici realizzati per simulare il comportamento della valvola in prova, i segnali ottenuti dalla simulazione vengono confrontati con i risultati ottenuti dalle prove sperimentali, grazie a tale confronto, alcuni parametri del modello sono stati ottimizzati.

## 1. Introduzione

La pneumatica è una delle tecnologie che contribuiscono alla realizzazione di sistemi automatici efficaci e a elevate prestazioni. Solitamente le caratteristiche di robustezza dei componenti, la facilità di applicazione, l'elevata durata dei componenti e la buona affidabilità ne giustificano l'impiego accanto agli altri componenti elettrici e meccanici. Il sistema di controllo pneumatico è ampiamente utilizzato e, soprattutto, adatto per l'applicazione nell'automazione industriale grazie ai suoi bassi costi di manutenzione, basso inquinamento ambientale e buon rapporto peso/potenza. In molti casi il costo a parità di prestazione risulta inferiore a quello di corrispondenti azionamenti elettrici o elettromeccanici. Nei moderni sistemi automatici la rapidità di intervento è un fattore determinante per il successo dell'applicazione. Da qui nasce l'esigenza di conoscere i tempi di risposta dei componenti.

## 2. Tempi di risposta e frequenze di lavoro

Il parametro utilizzato per valutare la prontezza di una valvola pneumatica è il tempo di risposta, che viene misurato con prove di comando con un segnale a gradino, ossia dando alle valvole un segnale di azionamento, o togliendolo, e registrando la variazione del segnale di comando e quello corrispondente di uscita.

Le prove di risposta a segnali a gradino sono standardizzate dalla norma ISO 12238 (*Pneumatic fluid power – Directional control valves – Measurement of shifting time*), in cui è definito il tempo di risposta di una valvola, il circuito di prova e le modalità di esecuzione. Il tempo di risposta viene definito come il 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 di regime. La misura deve essere fatta mediante trasduttori di pressione di adeguate caratteristiche dinamiche.

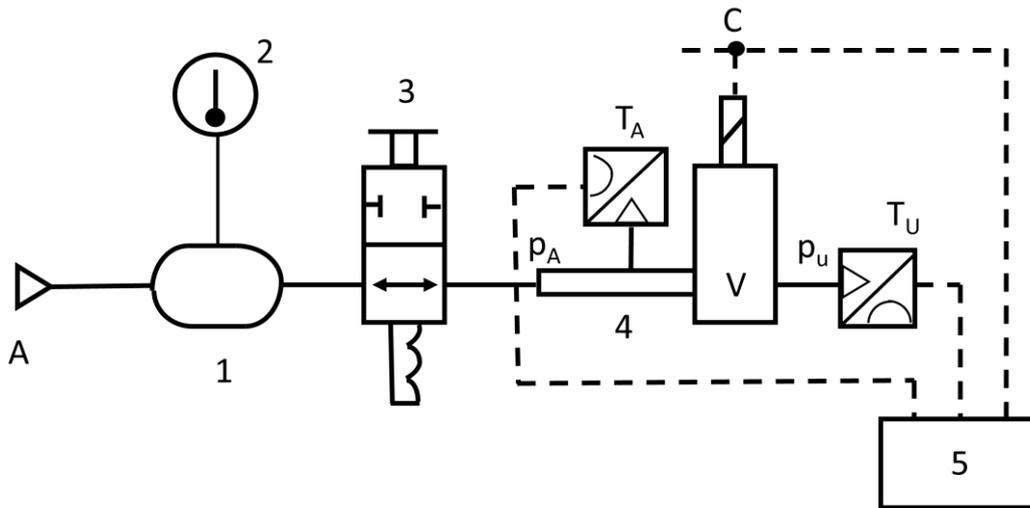


Figura 1: Circuito di prova per misure dinamiche su valvole a comando elettrico. [1]

In Figura 1 è riportato lo schema del circuito da utilizzare per la misura del tempo di risposta nel caso di valvole a comando elettrico.

La valvola di prova V è comandata elettricamente dal segnale C. Particolarmente importante è garantire che la pressione misurata a monte della valvola in prova non vari molto durante la prova. In corrispondenza dell'istante di commutazione del cassetto 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  $T_A$  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 della pressione di alimentazione. 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 ISO 6358-1. La pressione di uscita  $p_u$  è misurata dal trasduttore  $T_u$  collegato sulla bocca di uscita della valvola in prova. Il segnale di comando C, il segnale di uscita  $p_u$  e la pressione di alimentazione  $p_A$  sono registrate da un sistema di acquisizione 5.

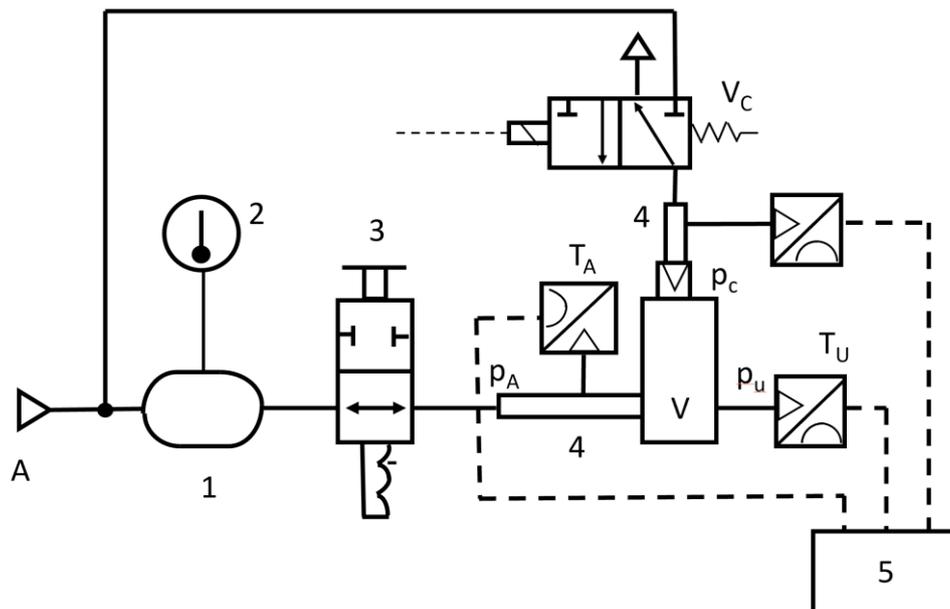


Figura 2: Circuito di prova per misure dinamiche su valvole a comando pneumatico. [1]

In Figura 2 è riportato lo schema del circuito da utilizzare per la misura del tempo di risposta per le valvole a comando pneumatico. La valvola in prova  $V$  è comandata dalla valvola  $V_C$  3/2 monostabile normalmente chiusa a comando elettrico, che fornisce il segnale a gradino di comando alla pressione  $p_C$ . La valvola in prova  $V$  è alimentata alla stessa pressione  $p_A$ . Anche in questo caso si usano tubi di misura della pressione standardizzati 4. Il sistema di acquisizione 5 registra i segnali di comando  $p_C$  (letto dal trasduttore  $T_C$ ), di uscita dalla valvola oggetto di misura  $p_U$  (letto dal trasduttore  $T_U$ ) e della pressione di alimentazione  $p_A$  (letto dal trasduttore  $T_A$ ). Nel caso delle elettrovalvole viene applicato e registrato direttamente il segnale elettrico di comando.

In Figura 3 sono riportati, in funzione del tempo  $t$ : andamenti della tensione di comando  $V_C$ , della pressione di uscita  $p_U$  e della pressione di alimentazione  $p_A$  nel caso di valvole a comando elettrico, con applicazione di segnale di comando (gradino positivo), e di rimozione del segnale di comando (gradino negativo). Il tempo di riempimento, o tempo di attivazione  $t_1$  in risposta all'applicazione del comando è definito come il tempo che intercorre tra l'applicazione del segnale elettrico e l'istante in cui la pressione d'uscita  $p_U$  raggiunge il 10% del regime, cioè la pressione di alimentazione  $p_A$ . Il tempo di svuotamento, o tempo di disattivazione  $t_2$  in risposta alla rimozione del comando è definito come il tempo che intercorre tra la rimozione del segnale elettrico e l'istante di tempo in cui la  $p_U$  raggiunge il 90% del regime  $p_A$ . [1]

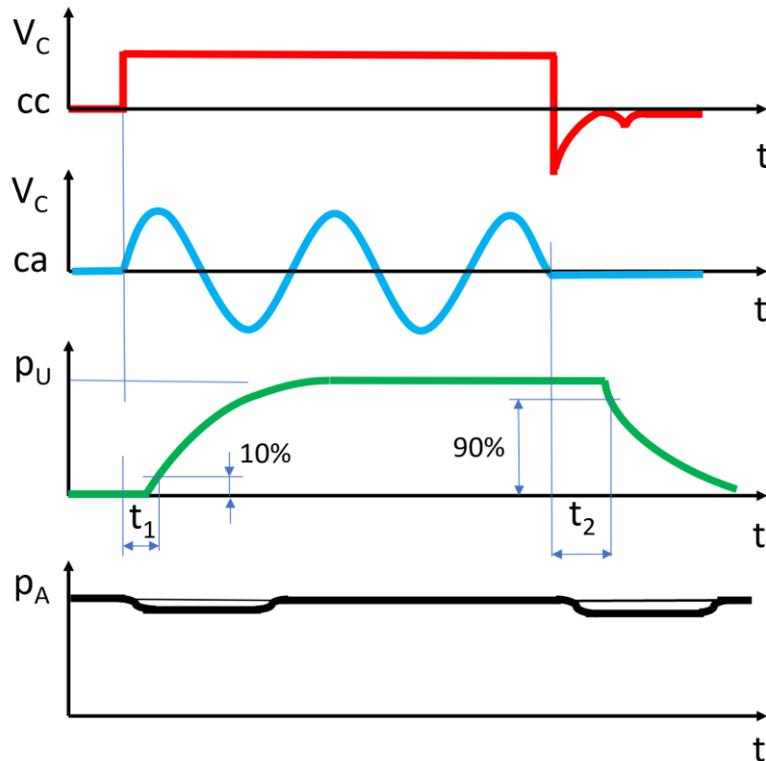


Figura 3: Risposta a un gradino positivo e negativo con valvole a comando elettrico. [1]

Nel caso di valvole a comando pneumatico, l'andamento dei segnali di comando  $p_c$  e  $p_u$ , in seguito all'applicazione di un segnale di comando e di rimozione del segnale di comando, è riportato in Figura 4 in funzione del tempo  $t$ . Si definisce tempo di riempimento in risposta a un segnale di comando a gradino positivo l'intervallo di tempo  $t_1$ , che intercorre tra l'istante di tempo in cui il segnale di comando raggiunge il 10% del segnale di regime e l'istante di tempo in cui il segnale di uscita raggiunge il 10% del suo valore di regime. Si definisce come tempo di svuotamento in risposta a un segnale a gradino negativo l'intervallo di tempo  $t_2$  che intercorre tra l'istante di tempo in cui il segnale di comando raggiunge il 90% del suo valore di regime e l'istante di tempo in cui il segnale di uscita il 90% del segnale di uscita.

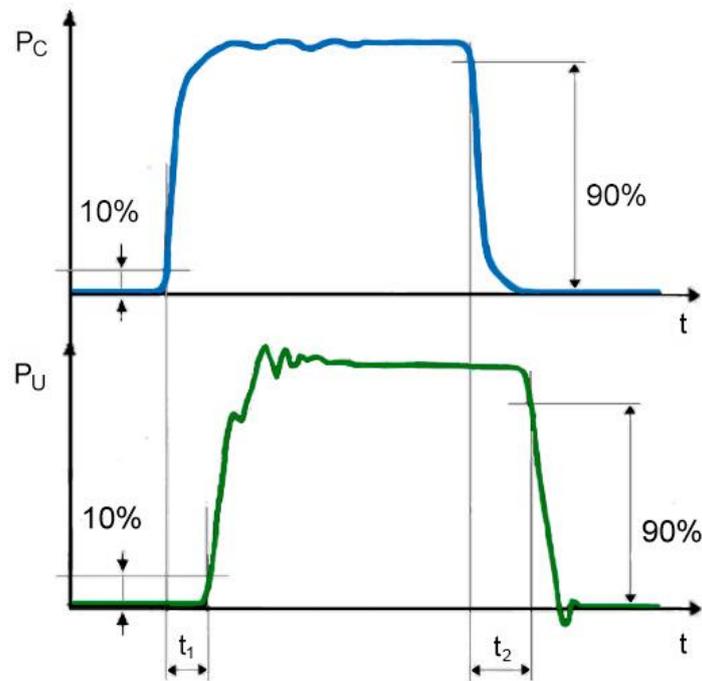


Figura 4: Risposta a un gradino positivo e negativo con valvole a comando pneumatico. [1]

In Figura 5, a titolo di esempio, sono riportati i tempi di risposta di valvole pneumatiche 1/4" monostabile, con ritorno a molla e azionate da elettrovalvole pilota. Si nota l'influenza della pressione di alimentazione  $p_A$ , che rende più pronta la risposta in attivazione ( $t_1$ ) fornendo un segnale più energetico, ma ritarda la disattivazione ( $t_2$ ) per problemi di svuotamento di camere, la molla dovrà contrastare una pressione maggiore. In generale, il ritorno della valvola, affidato alla molla, è più lento dell'attivazione affidata invece all'azione dell'aria compressa.

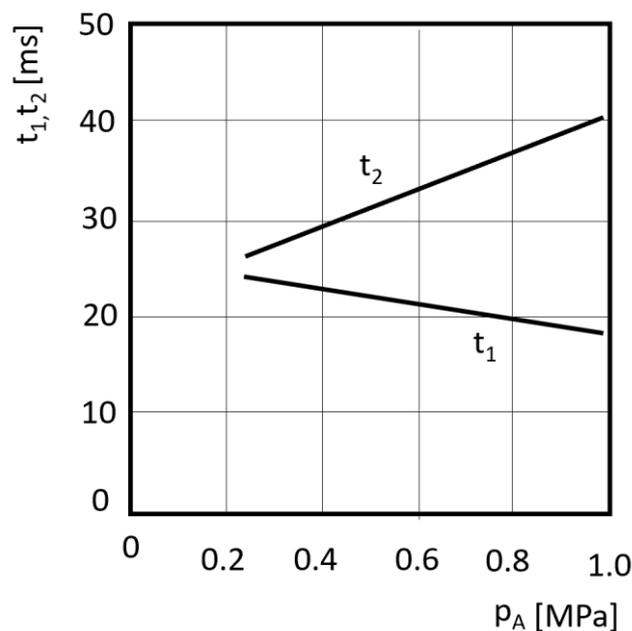


Figura 5: Tempi di commutazione di valvole pneumatiche. 3

Per una valvola a comando pneumatico bistabile, i tempi di attivazione e disattivazione vanno misurati secondo i seguenti grafici di Figura 6.

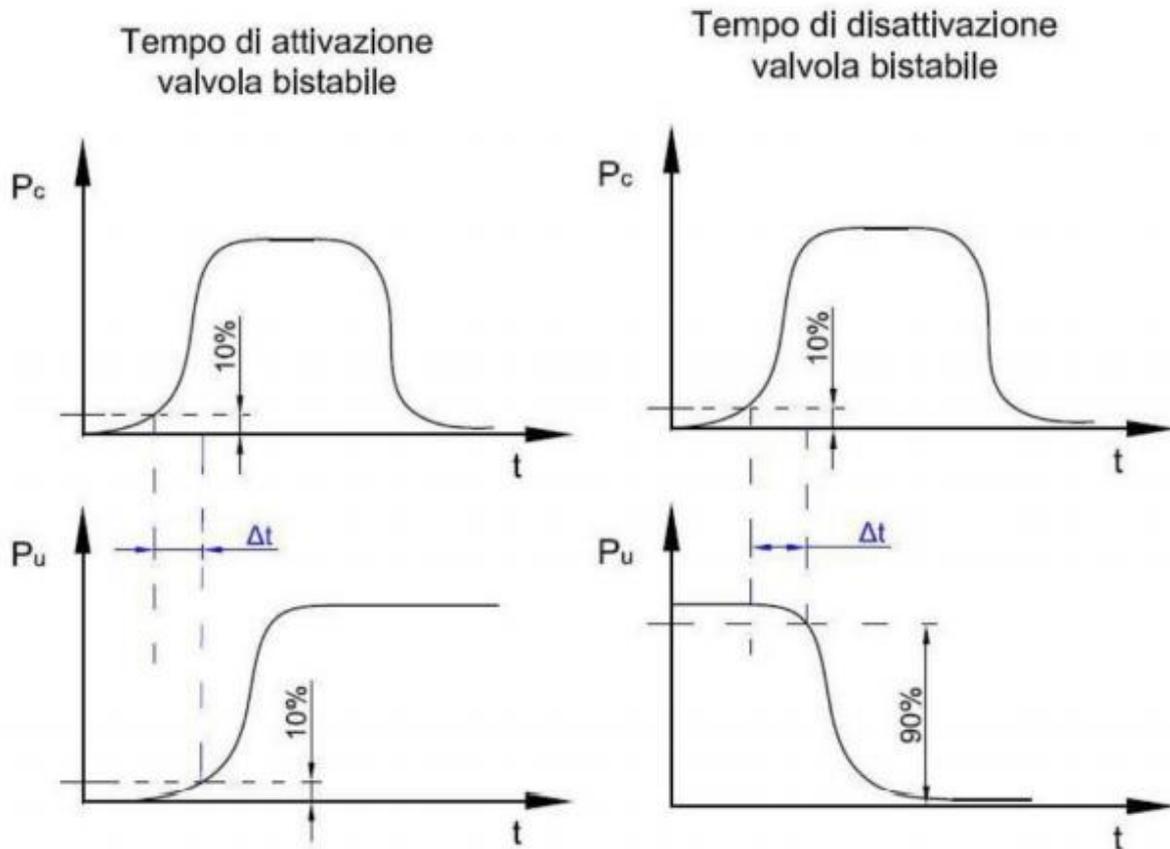


Figura 6: Tempi di attivazione e disattivazione per una valvola bistabile a comando pneumatico.

Come mostrato in Figura 6 il tempo di risposta di attivazione per una valvola bistabile è rappresentato dall'intervallo di tempo che intercorre dal raggiungimento del 10% del valore della pressione di comando di regime al raggiungimento del 10% del valore della pressione di uscita di regime. Il tempo di risposta di disattivazione è rappresentato dall'intervallo di tempo che intercorre dal raggiungimento del 10% del valore della pressione di comando di disattivazione al raggiungimento del 90% del valore della pressione di uscita di regime.

Il tempo di risposta a segnali a gradino può essere solo indicativo per valutare le frequenze di lavoro di una valvola, perché bisogna tenere conto della salita e discesa dei segnali, che nel caso di azionamenti pneumatici riguarda non solo i segnali di uscita ma anche quelli di comando, e del riscaldamento delle elettrovalvole che provoca aumenti progressivi di temperatura nel tempo.

## 2.1 Tempi morti

Per valvole a comando pneumatico viene definito come "tempo morto" il tempo che intercorre tra l'istante in cui la pressione del segnale di comando raggiunge rispettivamente in salita il 10% e in discesa il 90% del valore asintotico, e l'istante in cui la pressione in uscita dalla valvola raggiunge il 50% del suo valore asintotico.

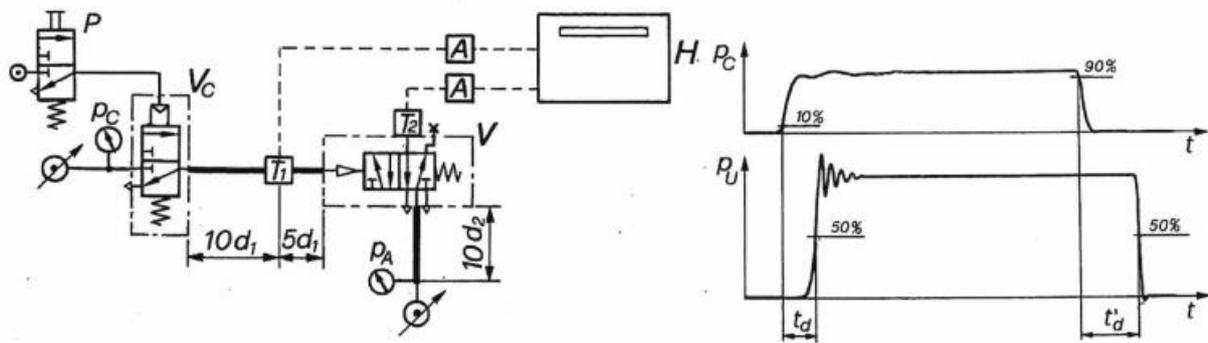


Figura 7: Valutazione tempi morti [2]

### 3. Descrizione banco prova

In Figura 8 è rappresentato il banco prova realizzato per la valutazione dei tempi di risposta.

L'interruttore 1 serve per scollegare o collegare il segnale di alimentazione di 230 V ac in ingresso all'alimentatore stabilizzato che ha in uscita 24 V dc per l'alimentazione delle bobine delle elettrovalvole. Lo switch 2 è utilizzato per alimentare le bobine per il comando di commutazione delle elettrovalvole 7 e 9. Muovendo lo switch verso il basso arriva il segnale elettrico alla bobina dell'elettrovalvola 9, con la commutazione del cassetto si attiva l'uscita dell'elettrovalvola, in questo modo l'aria compressa dall'alimentazione passa attraverso l'elettrovalvola e arriva nella camera di comando della valvola in prova 5 facendo commutare il cassetto, con la commutazione di quest'ultimo si attiva l'uscita della valvola in cui è presente il trasduttore di pressione. Muovendo lo switch in posizione centrale si disattiva il comando per l'elettrovalvola 9, in questo caso l'azione opposta della molla chiude l'uscita della valvola mandando a 0 il segnale di pressione misurato dal sensore piezoresistivo presente sul tubo ISO; tuttavia, il segnale di uscita dalla valvola in prova non va a 0 poiché si tratta di una valvola bistabile con comando pneumatico e quindi rimane nella condizione precedente. Muovendo lo switch in direzione opposta si ha l'alimentazione della bobina dell'elettrovalvola 7, quest'ultima dà il comando per la commutazione del cassetto della stessa elettrovalvola che vince gli attriti e l'azione della molla per attivare l'uscita, in questo caso l'aria compressa arriva nella camera di comando opposta della valvola in prova che facendo commutare il cassetto chiude l'uscita.

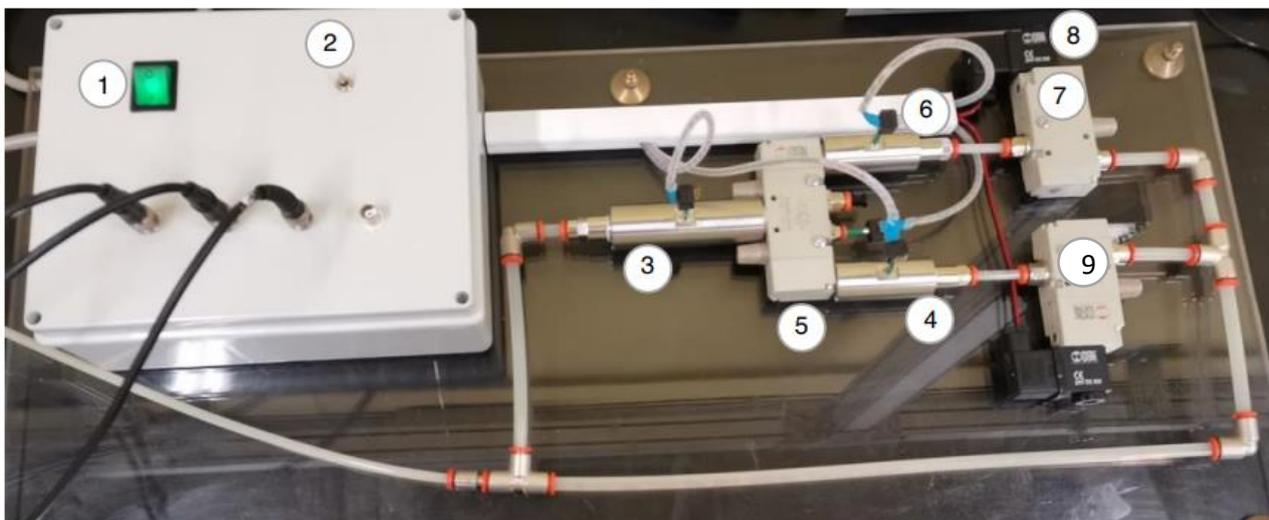


Figura 8 Banco prova tempi di risposta iniziale

1	Interruttore
2	Interruttore switch
3	Tubo ISO 1/4"
4	Tubo ISO 1/8" (x2)
5	Valvola in prova
6	Trasduttore di pressione (x4)
7	Elettrovalvola di comando per la disattivazione
8	Solenioide per elettrovalvola
9	Elettrovalvola di comando per l'attivazione

Tabella 1 Componenti banco prova

Per completare il banco secondo normativa manca ancora il serbatoio, dimensionato in maniera tale che la pressione di alimentazione, durante la fase di commutazione della valvola, non scenda al di sotto del 3% del suo valore nominale. Tuttavia, sono state fatte alcune acquisizioni per testare il corretto funzionamento del banco. I segnali in uscita dai trasduttori di pressione vengono letti mediante un oscilloscopio.



Figura 9 Sistema di acquisizione dati (oscilloscopio)

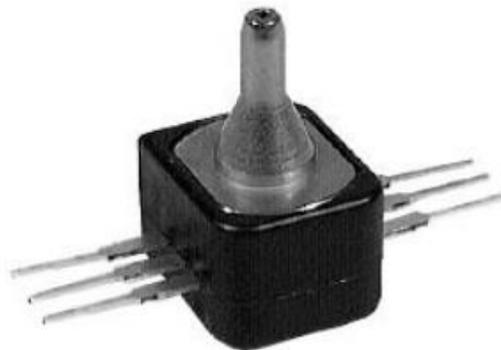
### 3.1. Trasduttori di pressione

Il trasduttore di pressione è uno strumento di misura in cui in ingresso vi è un segnale di pressione e in uscita un segnale elettrico che viene inviato al sistema di acquisizione dati. I trasduttori di pressione sono costruiti in modo da avere un'adeguata prontezza e sensibilità con una propria frequenza di risonanza sufficientemente elevata e in grado di fornire una risposta fedele del segnale pneumatico.

Il trasduttore utilizzato per le prove sperimentali è il modello 40PC150G2A prodotto da Honeywell, mostrato in Figura 10, è di tipo piezoresistivo, ossia produce una tensione in uscita in seguito alla variazione di resistenza di un elemento piezoresistivo deformato dalla pressione. La variazione di resistenza tramite un ponte di Wheatstone è convertita in una tensione ed inviata ai tre pin di uscita.

Nel banco prova vengono utilizzati 4 trasduttori di pressione, come indicato nella normativa 12238, due trasduttori, montati sui tubi di misura ISO, misurano le pressioni di comando, un trasduttore per misurare la pressione in uscita dalla valvola e il quarto, montato su tubo di misura ISO, per rilevare correttamente la pressione di alimentazione della valvola.

Il modello utilizzato è alimentato a una tensione costante di 5 V e ha un campo di misura compreso tra 0 e 10 bar relativi e un'uscita analogica in tensione che varia da 0.5 V a 4.5 V.



*Figura 10: Trasduttore di pressione 40PC150G2A*

È necessario effettuare un test di calibrazione per attestare il corretto funzionamento dello strumento e per valutare il guadagno per associare ai valori di pressione un valore di tensione.

Vengono realizzate quattro prove separate, una per ogni trasduttore.

Il trasduttore presenta 3 PIN, i PIN 1 e 2 sono l'alimentazione mentre il pin 3 è l'uscita del segnale.

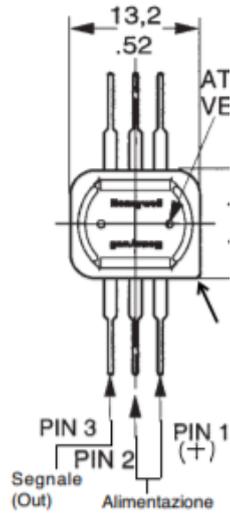


Figura 11: Procedura collegamento cavi con PIN del trasduttore di pressione

Per la taratura si è utilizzato un calibratore di pressione portatile modello DPI 610 mostrato in Figura 12. Lo strumento ha una valvola di scarico, una pompa per far aumentare la pressione e una manopola per aumentare la pressione in modo fine.

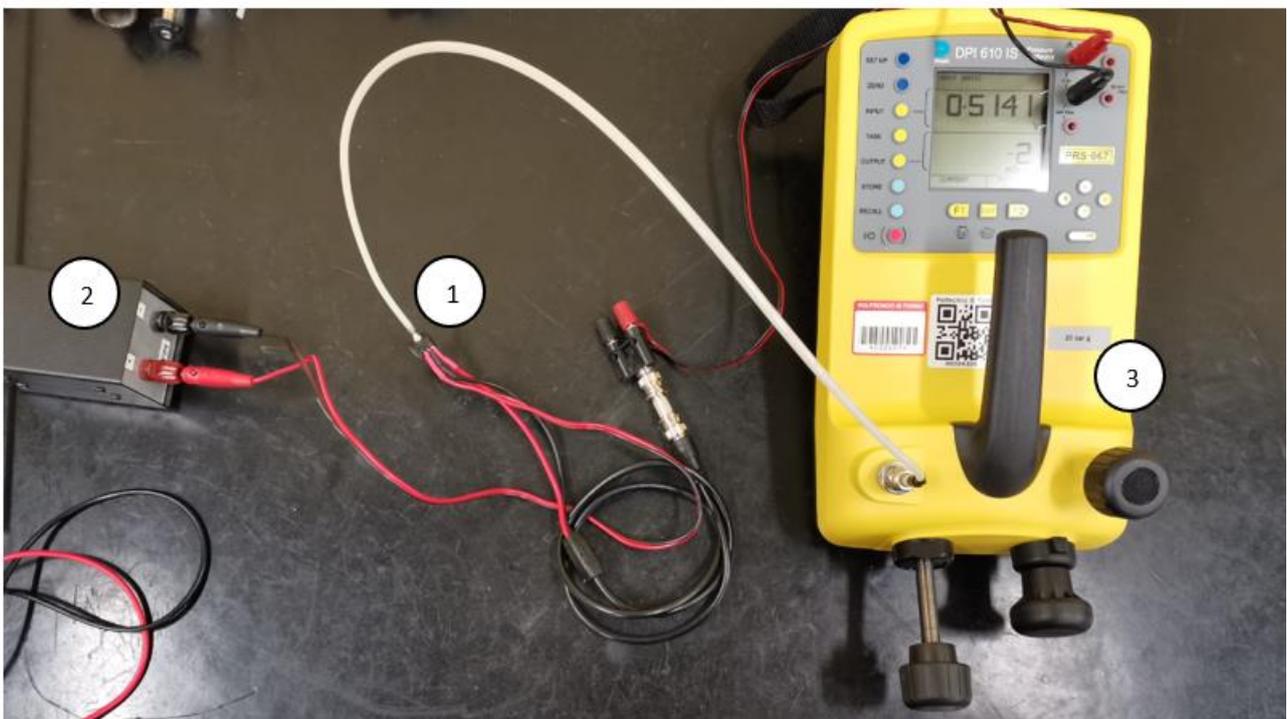
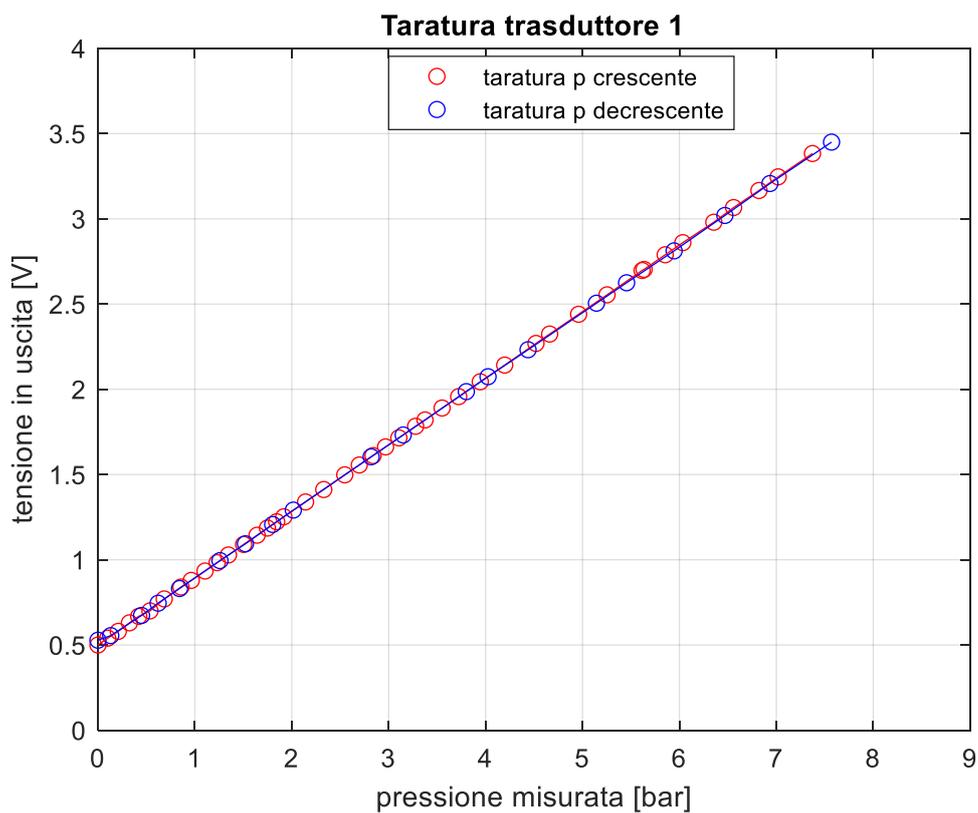


Figura 12: Taratura trasduttore di pressione

1	Sensore in prova
2	Alimentatore stabilizzato 5V DC
3	Calibratore di pressione portatile modello DPI 610

Le prove vengono eseguite facendo variare la pressione 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.

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



*Figura 13: Caratteristica trasduttore 1*

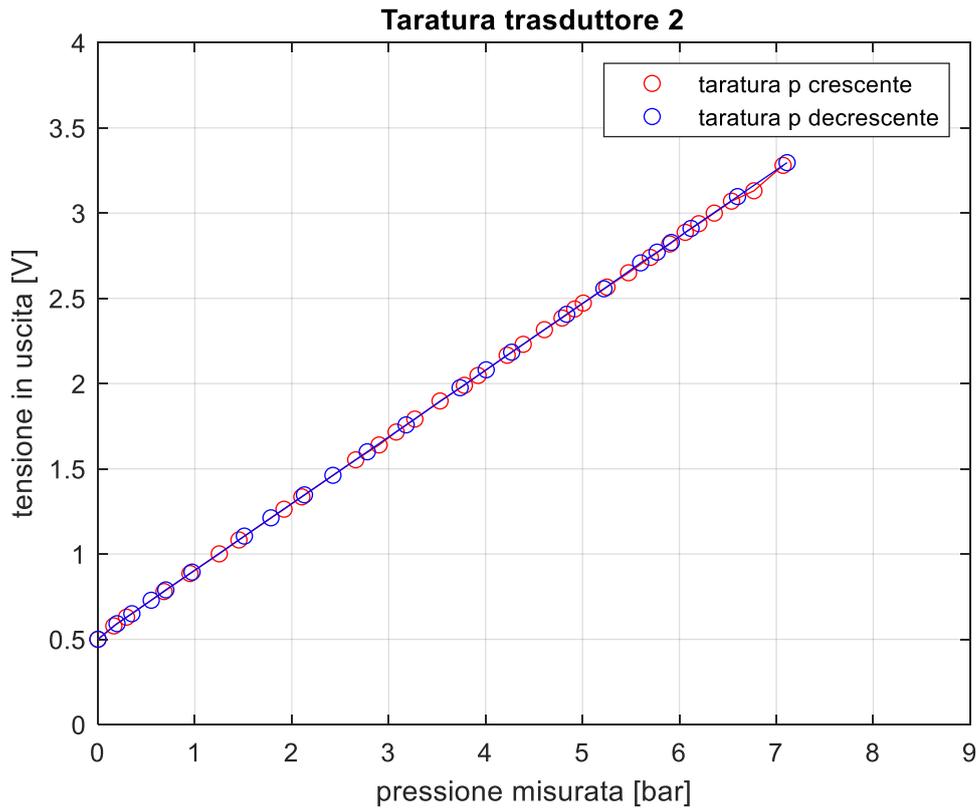


Figura 14: Caratteristica trasduttore 2

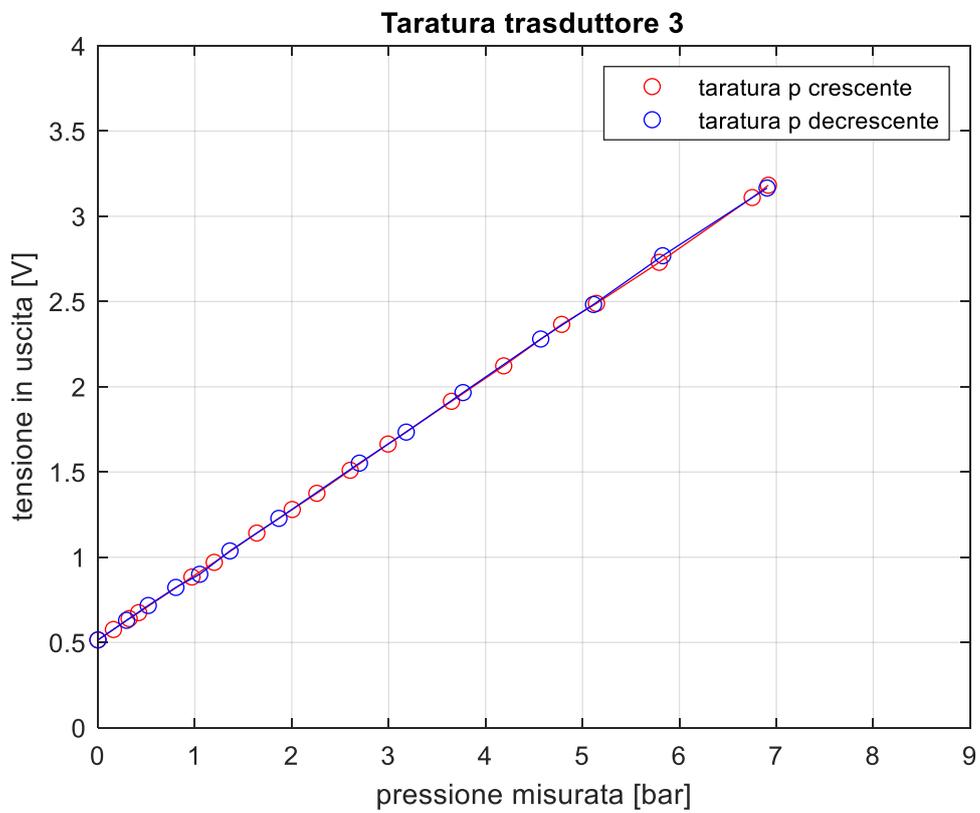


Figura 15: Caratteristica trasduttore 3

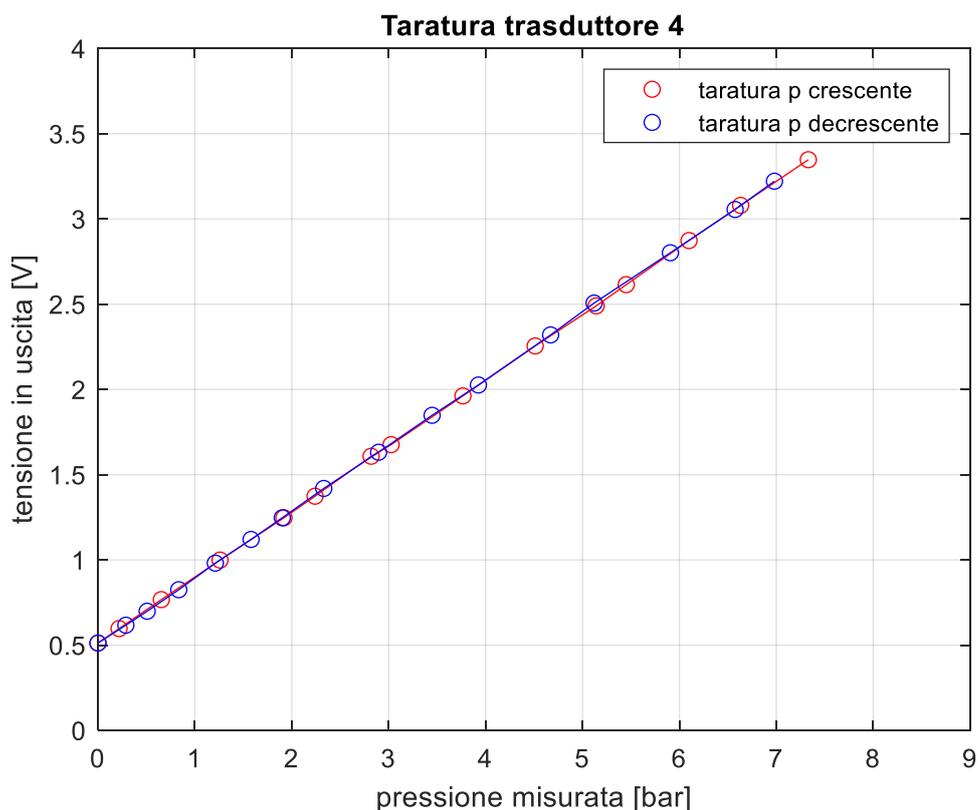


Figura 16: Caratteristica trasduttore 4

Come si può osservare dalle figure precedenti i trasduttori hanno un comportamento lineare della tensione al variare della pressione e non presenta fenomeni di isteresi in quanto le curve di salita e di discesa della pressione sono quasi sovrapposte.

Andando ad interpolare le curve con una retta, utilizzando la funzione matlab polyfit, è possibile ricavare il coefficiente angolare e l'ordinata nell'origine delle curve dei trasduttori. Questi dati 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 per i quattro trasduttori sono i seguenti:

	$K_T \left[ \frac{V}{bar} \right]$	$V_0 [V]$
Trasduttore 1 ( $p_{monte}$ )	0.39	0.51
Trasduttore 2 ( $p_{comapertura}$ )	0.39	0.51
Trasduttore 3 ( $p_{uscita}$ )	0.38	0.51
Trasduttore 4 ( $p_{comchiusura}$ )	0.39	0.51

Tabella 2: Caratteristica trasduttori di pressione

Il modello utilizzato per correlare i segnali elettrici misurati ai segnali di pressione è il seguente:

$$V_T = K_T p + V_0$$

$$[V] = \left[ \frac{V}{\text{bar}} \right] p + [V]$$

### 3.2 Valvola in prova

La valvola di prova utilizzata, in Figura 17, è una valvola pneumatica della MetalWork serie 70 (7020011200) a cassetto bistabile 5/2 a comando pneumatico di taglia 1/4".

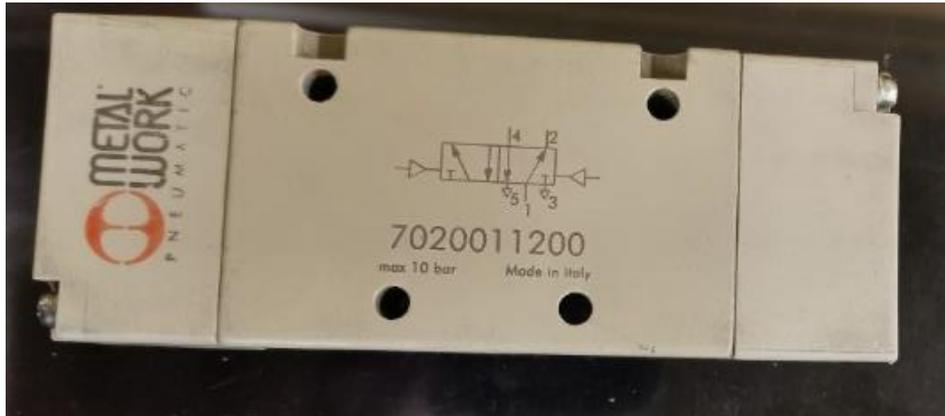


Figura 17: Valvola in prova

Dal catalogo MetalWork ci vengono fornite, per ogni taglia di valvole, le curve di portata al variare della pressione di alimentazione. La portata di un fluido viene modellata tramite le formule riportate dalla normativa ISO 6358 che utilizzano la conduttanza e il rapporto critico.

In particolare, il rapporto critico è  $b=0,27$  mentre la conduttanza  $C=264,26 \text{ NI}/(\text{min} \cdot \text{bar})$ .

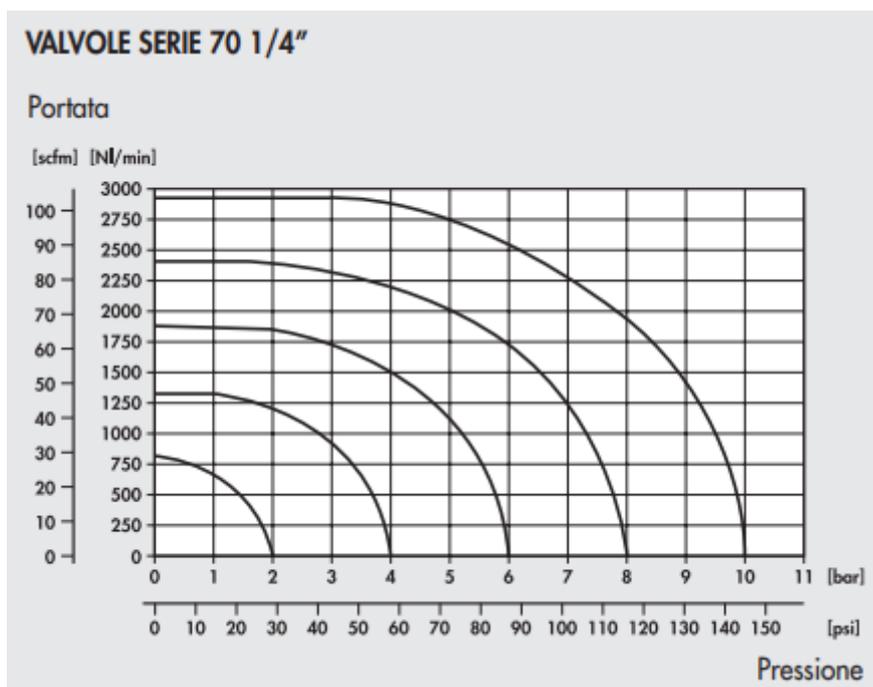


Figura 18: Curve di portata da catalogo MetalWork

Dagli andamenti presenti in Figura 18 possiamo osservare una netta distinzione tra la parte subsonica e la parte sonica in cui la portata è costante. Nella curva a pressione di alimentazione inferiore pari a 2 bar non si vede una netta distinzione tra le due parti.

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

Il tratto subsonico segue la seguente legge:

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

Mentre il tratto sonico segue la seguente legge:

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

### 3.3 Elettrovalvole di pilotaggio

In Figura 19 è rappresentata una delle due elettrovalvole per il comando della valvola in prova. Entrambe le elettrovalvole sono della serie 70 MetalWork (7020020200) e sono a cassetto 3/2 monostabili 1/4'' ad azionamento elettrico tramite solenoide. Ogni elettrovalvola ha il suo solenoide Metalwork a 24V corrente continua in grado di azionare l'elettrovalvola di pilotaggio, mostrato in Figura 20.



Figura 19: Elettrovalvole di pilotaggio



*Figura 20: Solenoide MetalWork*



*Figura 21: Valvola di comando con solenoide*

### 3.4 Componenti elettrici

Le elettrovalvole sono alimentate a 24V corrente continua, è stato scelto un alimentatore Meanwell da barra din 24V DC 2,5 A, a valle dell'alimentatore vi è lo switch che permette di alimentare separatamente le elettrovalvole per andare a commutare il cassetto della valvola in prova. Mentre i 4 trasduttori di pressione sono alimentati a 5V dc da un alimentatore 5V 2 AMP. Gli alimentatori con i vari collegamenti elettrici sono nella scatola di derivazione, all'esterno della scatola vi è lo switch, l'interruttore e quattro connettori BNC per i segnali di uscita dei trasduttori di pressione.



Figura 22: Alimentatore 24V dc per bobine elettrovalvole



Figura 23: Alimentatore 5V dc per sensori di pressione

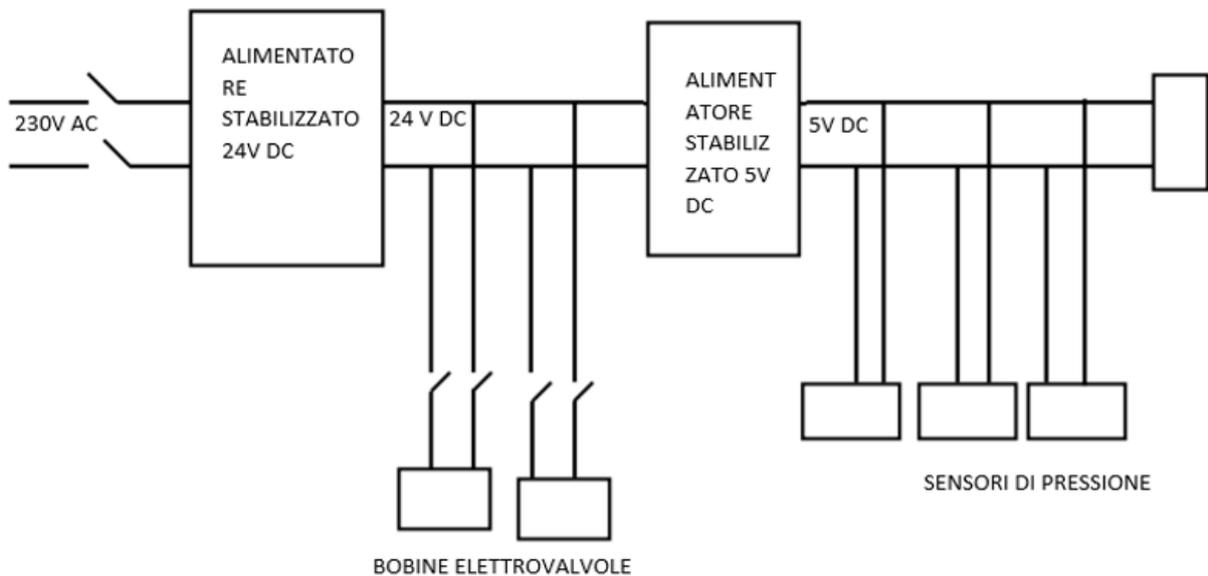


Figura 24: Schema elettrico

In Figura 24 è rappresentato schematicamente lo schema elettrico per l'alimentazione delle bobine delle elettrovalvole e per i trasduttori di pressione piezoresistivi. Il primo alimentatore stabilizzato ha in ingresso una tensione pari a 230V AC e un'uscita pari a 24V DC che è la tensione per alimentare le elettrovalvole utilizzate, la tensione a 24V DC è inoltre l'input per il secondo alimentatore

stabilizzato che ha in uscita la tensione di 5V DC per l'alimentazione dei quattro sensori di pressione utilizzati.

### 3.5 Gruppo FRL

Il gruppo FRL è un componente formato da tre dispositivi: filtro, riduttore e lubrificatore. Il filtro ha il compito di eliminare le impurità, viene montato il più vicino possibile al componente da proteggere. Il riduttore serve per regolare la pressione dell'aria compressa in uscita, ciascun componente richiede il giusto livello di pressione. Il lubrificatore è necessario per le parti in movimento. Il gruppo FRL è posto tra l'alimentazione e il banco prova. Il gruppo FRL utilizzato è della Metalwork di taglia 1/4" rappresentato in Figura 25.



Figura 25 Gruppo FRL

### 3.6 Tubi di misura della pressione

I trasduttori per la misura della pressione devono essere collocati su un apposito tubo di misura; a tale scopo, si usano gli stessi tubi di misura della pressione previsti dalla norma ISO 6358-1.

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 a monte 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.



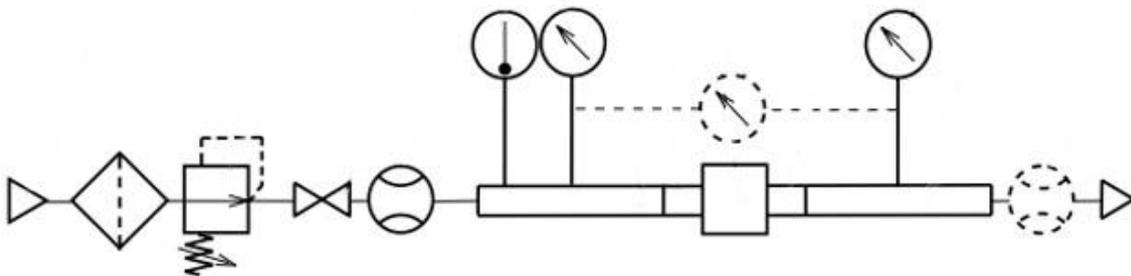
*Figura 26 Tubo ISO 1/4"*



*Figura 27 Tubo ISO 1/8"*

### 3.7 Circuito di prova per test con pressione di monte costante

Come da normativa 6358-1 se i tubi di misurazione della pressione possono essere collegati a monte e a valle del componente in prova, deve essere utilizzato il circuito di prova adatto come quello mostrato nella Figura 28.



*Figura 28 Circuito di prova per misurazione di pressione [4]*

Il componente in prova deve essere installato e utilizzato nel circuito di prova in conformità con le istruzioni per l'uso del produttore.

Devono essere utilizzati tubi di misurazione della pressione conformi alla Figura 29. Dimensioni tipiche dei tubi per la misurazione della pressione sono specificati nella tabella 3. Il tubo deve essere dritto, con una superficie liscia, superficie interna circolare, e un diametro costante per tutta la sua

lunghezza. La mezzeria longitudinale del tubo deve intersecare con l'asse dei fori e l'asse dei fori deve essere normale alla mezzeria longitudinale. La giunzione del foro con la superficie interna del tubo deve avere uno spigolo vivo ed essere esente da sbavature. Non ci devono essere ostacoli o collegamenti di derivazione diversi da quelli specificati.

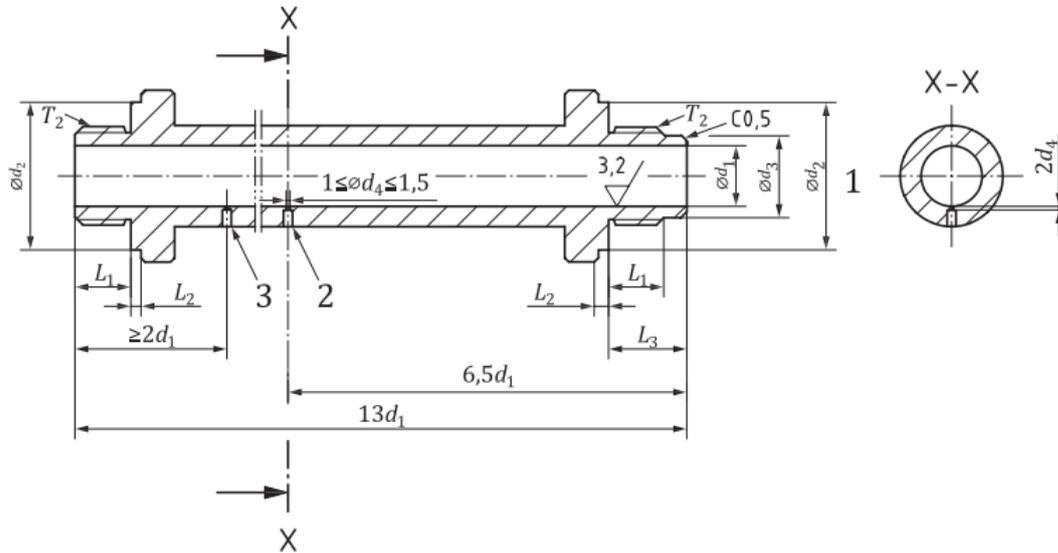


Figura 29 Sezione tubo di misura della pressione [4]

Dimensioni tipiche di tubi di misura della pressione:

$T_2^a$	$d_1$	$d_2^b$	$d_3^c$		$L_1^b$		$L_2^b$	$L_3$	
	min.		nom.	tol.	nom.	tol.		nom.	tol.
G 1/8	6	14,5	8	-0,040 -0,076	5,5	0 -0,2	1	7,5	0 -0,4
G 1/4	9	18,5	11	-0,050 -0,093	6,5	0 -0,4	1,5	9,5	0 -0,4
G 3/8	12,5	22,5	14,5	-0,050 -0,093	7,5	0 -0,4	1,5	10,5	0 -0,4
G 1/2	16	26,5	18	-0,050 -0,093	9	0 -0,4	1,5	12	0 -0,4
G 3/4	22	32,5	24	-0,065 -0,117	10,5	0 -0,4	1,5	13,5	0 -0,4
G 1	28	39	30	-0,065 -0,117	11,5	0 -0,4	1,5	14,5	0 -0,4
G 1 1/4	36	49	38	-0,080 -0,142	16,5	0 -0,4	2,5	21,5	0 -0,4

Tabella 3: Caratteristiche tubi di misura delle pressioni [4]

### 3.8 Procedura di test alternativo

Questa procedura di prova alternativa si applica solo alla prova con pressione di monte costante e non si applica alla prova di pressione a monte variabile, e consente l'utilizzo dei tubi misuratori di pressione specificati nella norma ISO 6358.

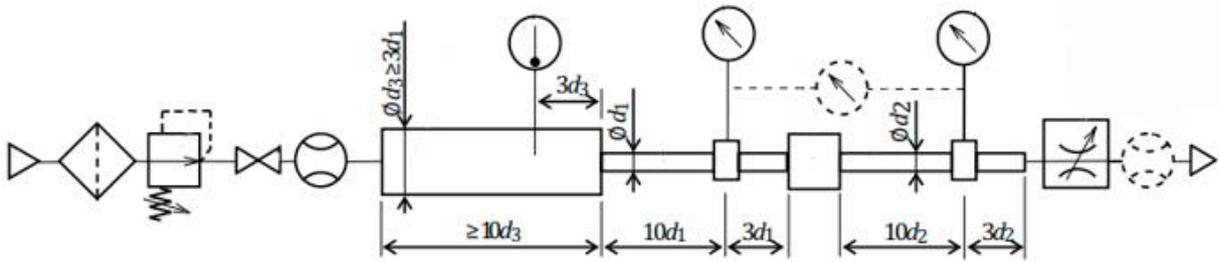


Figura 30 Circuito alternativo per prove con pressione di monte costante [4]

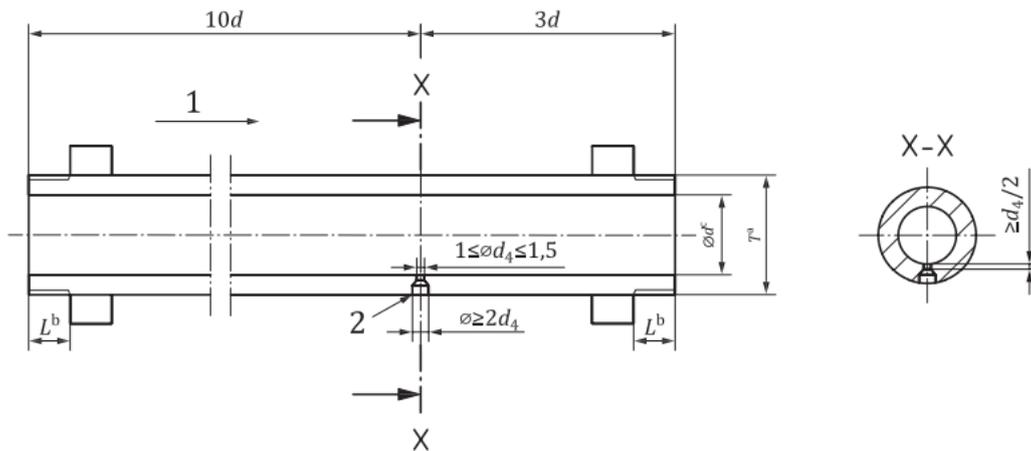


Figura 31 Tubi di misura per circuito di prova alternativo [4]

In questo caso gli attacchi per la misura della pressione all'uscita dalla valvola sono posti a una distanza pari a dieci volte il diametro interno  $d$ , poiché disturbano il flusso dando vorticosità. Mentre a monte gli attacchi sono posizionati vicino alla valvola in prova, a una distanza pari a  $3d$  per avere una misura della pressione nelle immediate vicinanze della valvola. Tuttavia, per effettuare delle prove a pressione di monte variabile bisogna utilizzare i tubi di misura illustrati nel paragrafo precedente per questo motivo nel banco prova sono stati utilizzati i tubi di misura trattati nel paragrafo precedente.

#### 4. Calcolo tempi di risposta

In Figura 32 sono rappresentati i dati acquisiti dall'oscilloscopio per una prova eseguita. Le acquisizioni per tutte le prove presenti nell'elaborato sono state eseguite con una frequenza di campionamento pari a 2 KHz.

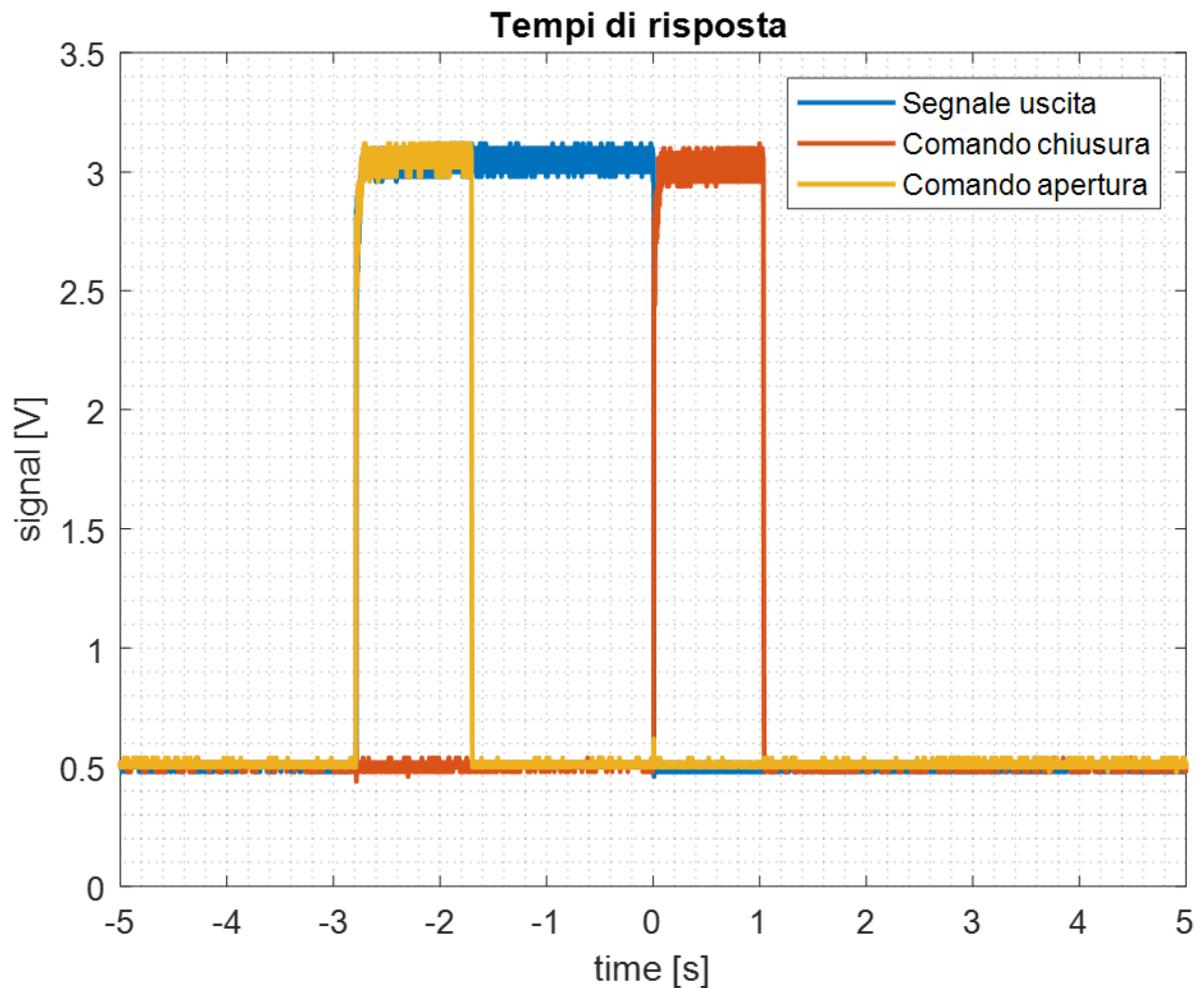


Figura 32 Acquisizione con  $f_c=2$  KHz

Le prove sono state effettuate a una pressione di alimentazione di 6,3 bar e i tempi di risposta sono stati calcolati secondo normativa ISO 12238. Il tempo di attivazione corrisponde all'intervallo di tempo che intercorre tra il 10% del segnale di comando di apertura e il 10% del segnale di uscita. Il tempo di disattivazione è l'intervallo di tempo che intercorre tra il 10% del segnale di comando di chiusura e il 90% del segnale in uscita.

L'analisi sui dati raccolti nelle tre prove ha portato alla realizzazione della seguente tabella nella quale sono evidenziati i tempi di risposta della valvola a segnali di comando di attivazione e disattivazione.

ATTIVAZIONE	Prova 1	Prova 2	Prova 3	Media	Unità di misura
Offset segnali	0.51	0.51	0.51	0.51	V
Tensione uscita in regime	2.93	2.93	2.93	2.93	V
10% tensione uscita	0.75	0.75	0.75	0.75	V
Tensione comando attivazione	2.97	2.97	2.97	2.97	V
10% tensione di attivazione	0.75	0.75	0.75	0.75	V
$\Delta T$ attivazione	2	2	2	2	ms

*Tabella 4 Calcolo tempi di risposta attivazione*

DISATTIVAZIONE	Prova 1	Prova 2	Prova 3	Media	Unità di misura
Offset segnali	0.51	0.51	0.51	0.51	V
Tensione uscita in regime	2.93	2.93	2.93	2.93	V
90% tensione uscita	2.69	2.69	2.69	2.69	V
Tensione comando disattivazione	2.94	2.94	2.94	2.94	V
10% tensione di disattivazione	0.75	0.75	0.75	0.75	V
$\Delta T$ disattivazione	2	2	3	2.33	ms

*Tabella 5 Calcolo tempi di risposta disattivazione*

Nelle 3 prove effettuate si trovano dei tempi di risposta simili. In particolare, il tempo di attivazione è pari a 2 ms in tutte e tre le prove mentre il tempo di disattivazione è di circa 2.33 ms.

#### 4.1 Calcolo tempi di risposta, filtraggio dei segnali con media mobile

Una tecnica molto semplice per ottenere segnali più puliti consiste nell'applicare una media mobile al segnale.

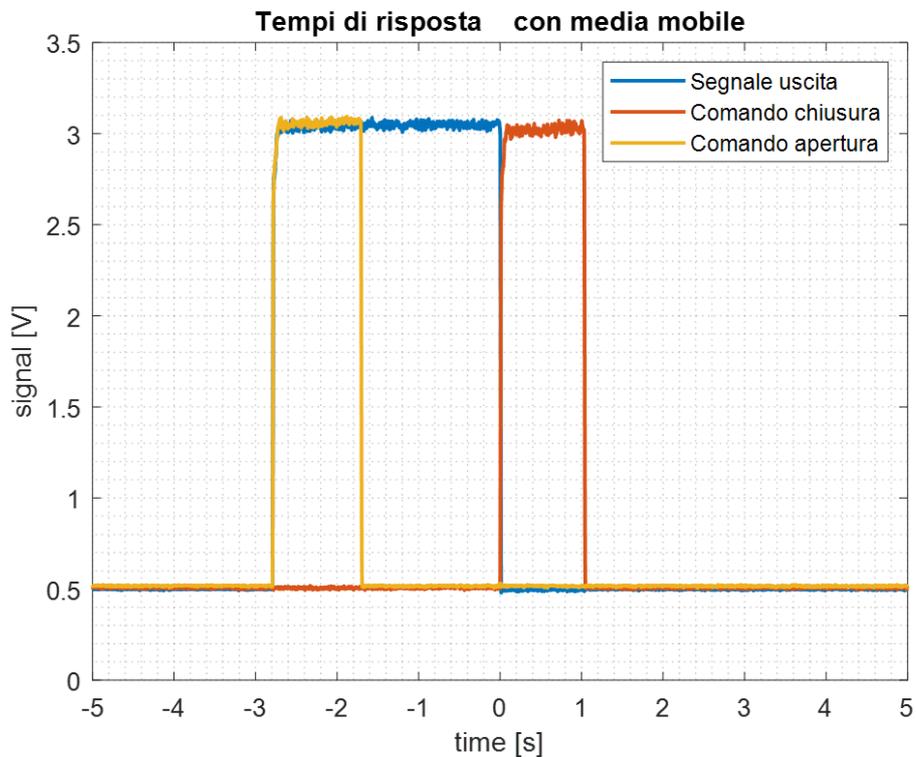
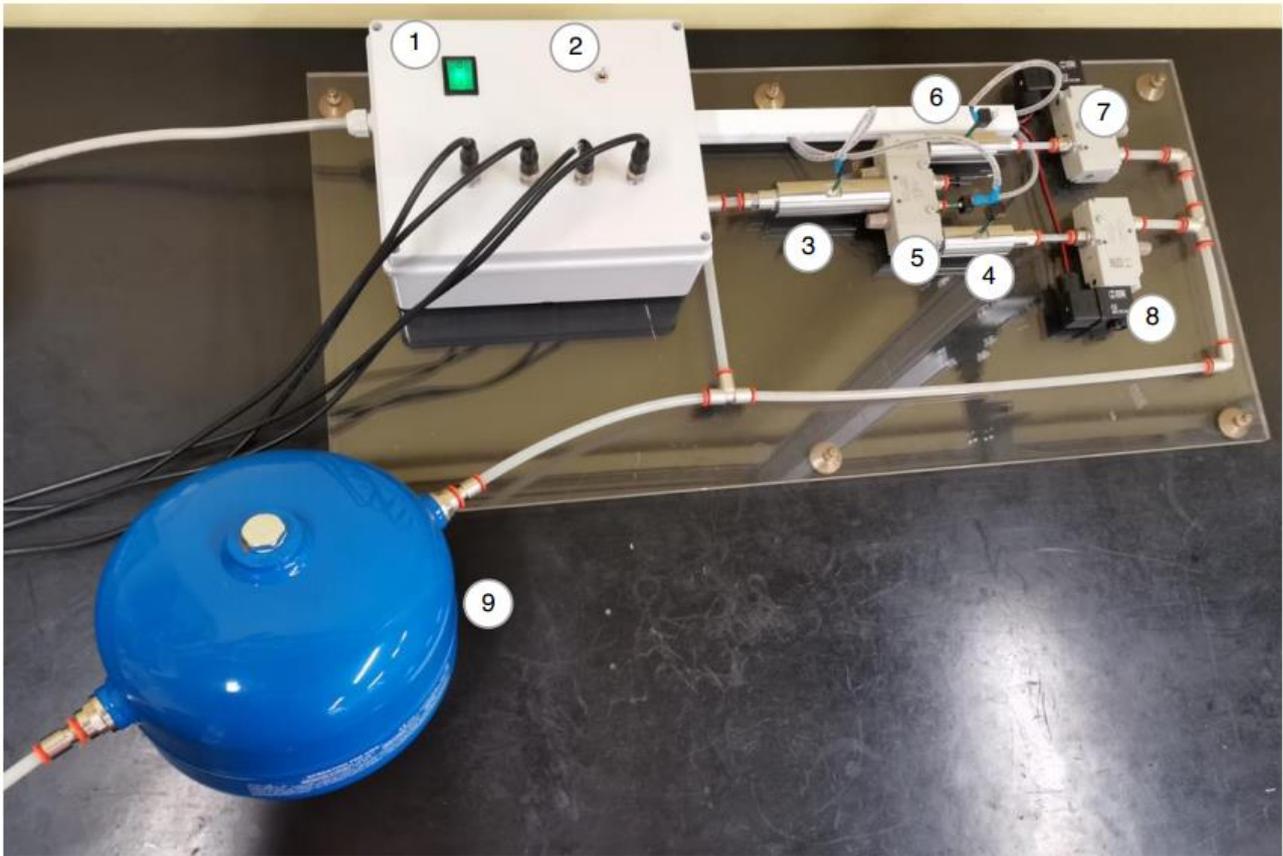


Figura 33 Acquisizione filtrata con media mobile con  $f_c=2\text{KHz}$

I segnali a seguito dell'applicazione della media mobile con parametro  $\text{span}=10$  non presentano notevoli modifiche. In particolare, i valori medi restano uguali e i tempi di risposta sono i medesimi e pari a 2 ms. Con la media mobile il valore di un punto viene sostituito con la media dei valori precedenti di una quantità pari allo span e dei valori successivi di una quantità pari allo span.

Pertanto, è utile filtrare i segnali con media mobile (non con span troppo elevati per non andare a modificare troppo i segnali) per ridurre i rumori, e per avere segnali più puliti sui quali andare a calcolare i tempi di risposta della valvola pneumatica in prova.



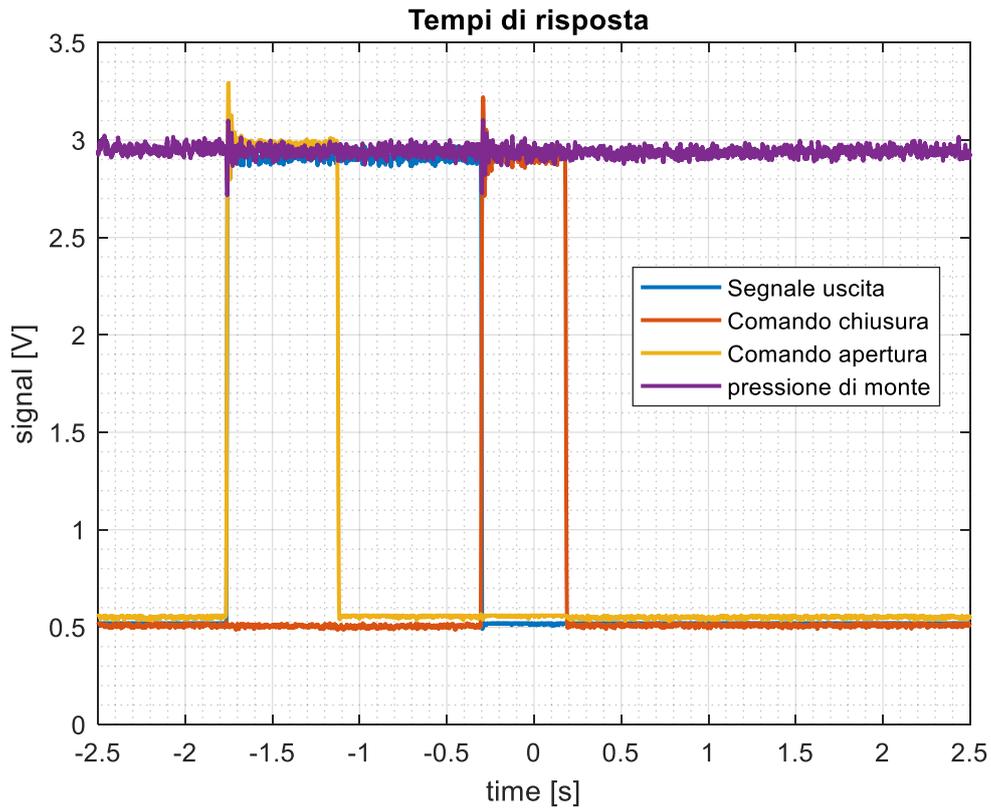


*Figura 36: Banco prova tempi di risposta con serbatoio*

1	Interruttore
2	Interruttore switch
3	Tubo ISO 1/4"
4	Tubo ISO 1/8" (x2)
5	Valvola in prova
6	Trasduttore di pressione (x4)
7	Elettrovalvola di comando (x2)
8	Solenioide per elettrovalvola
9	Serbatoio

*Tabella 6 Descrizione elementi all'interno del banco prova*

In Figura 36 è rappresentato il banco prova per la valutazione dei tempi di risposta con la presenza del serbatoio posto a monte della valvola in prova. Con questa configurazione sono state effettuate delle acquisizioni per valutare i tempi di risposta della valvola in prova.



*Figura 37: acquisizione con serbatoio con  $f_c=2\text{KHz}$*

Osservando l'andamento del segnale della pressione di monte della valvola in prova possiamo subito osservare come questa vari molto meno nel momento della commutazione del cassetto della valvola in prova. Osservando la Figura 37 si possono anche notare degli overshoot dei segnali di comando e del segnale di uscita nell'istante di commutazione del cassetto. In Figura 38 sono raffigurati i segnali di tensione misurati dai trasduttori per la valutazione dei tempi di risposta. L'introduzione del serbatoio permette di stabilizzare la pressione di alimentazione entro il range del 3% come prescritto da normativa.

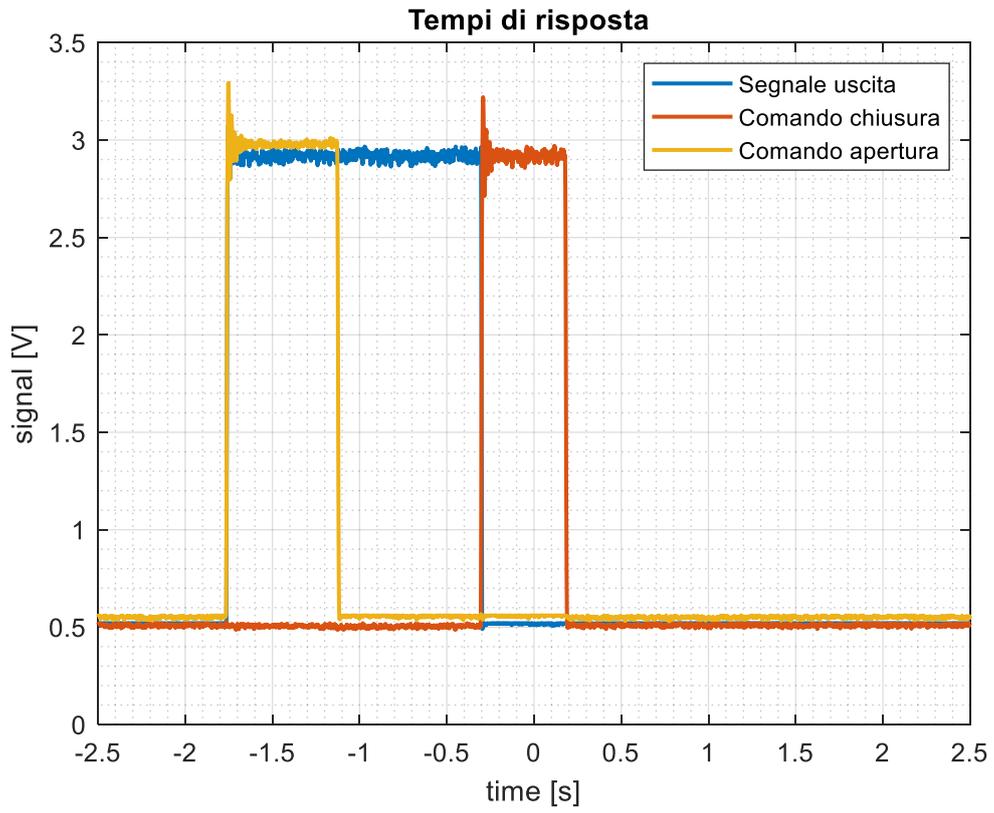
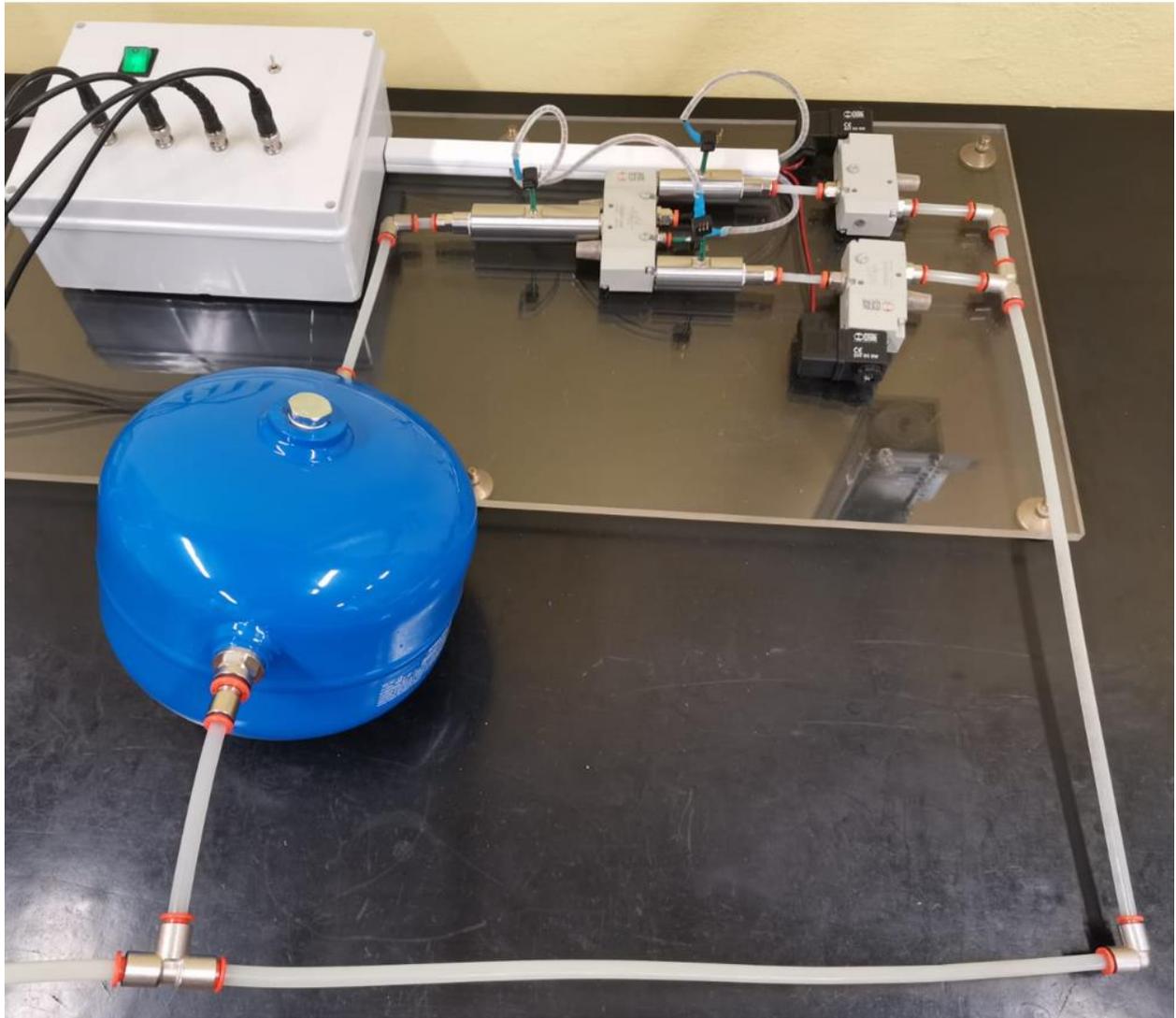


Figura 38 Andamento segnale uscita e segnali comando,  $f_c=2Kz$

#### 4.3 Nuova configurazione banco prova tempi di risposta

In Figura 39 è rappresentato il banco prova in una nuova configurazione, in cui il serbatoio è collegato direttamente al tubo di misura della valvola in prova, mentre le elettrovalvole di pilotaggio vengono alimentate direttamente dal gruppo FRL senza passare per il serbatoio, come descritto da normativa.



*Figura 39: Nuova configurazione banco prova tempi di risposta*

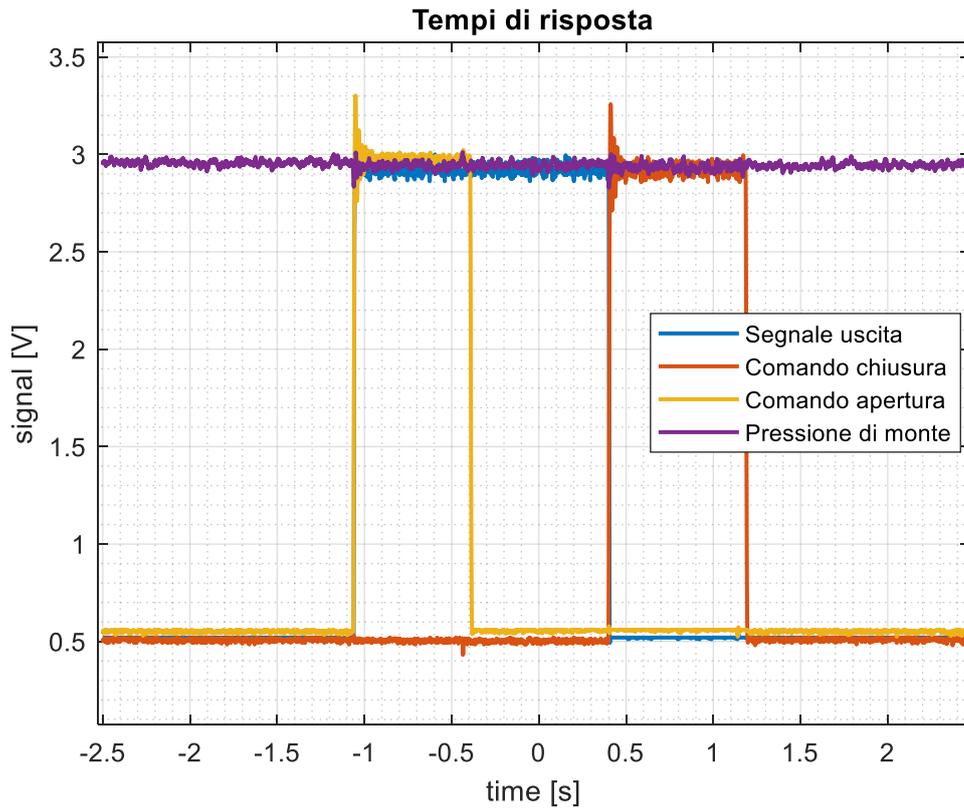


Figura 40 Acquisizione con nuova configurazione acquisizione a 2kHz

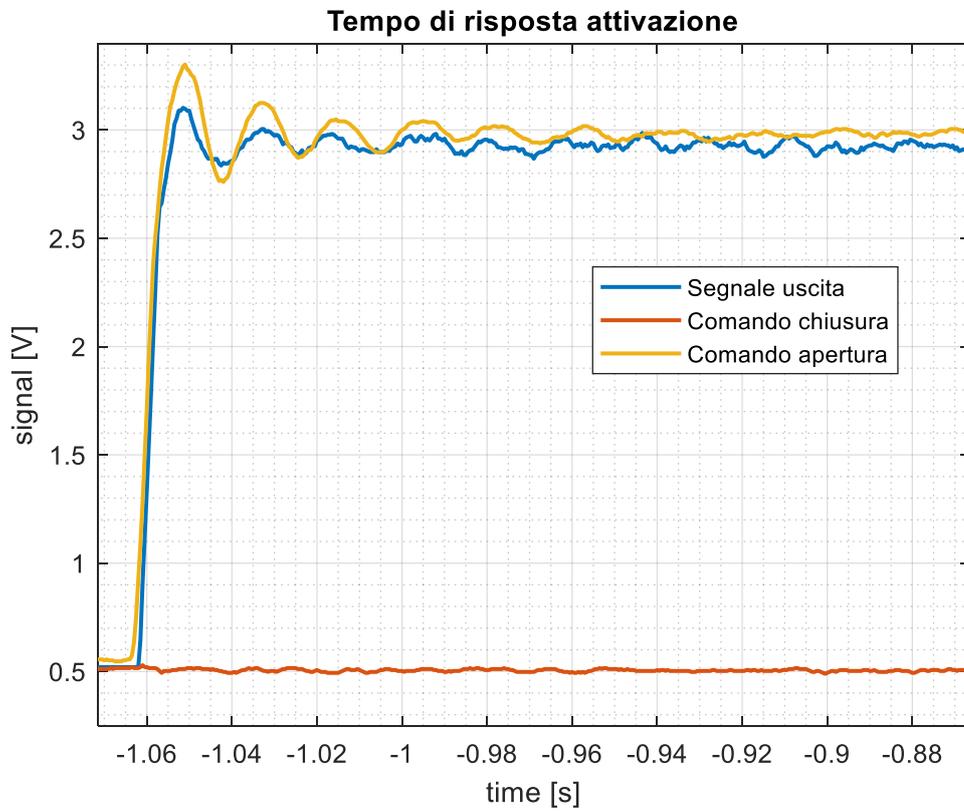
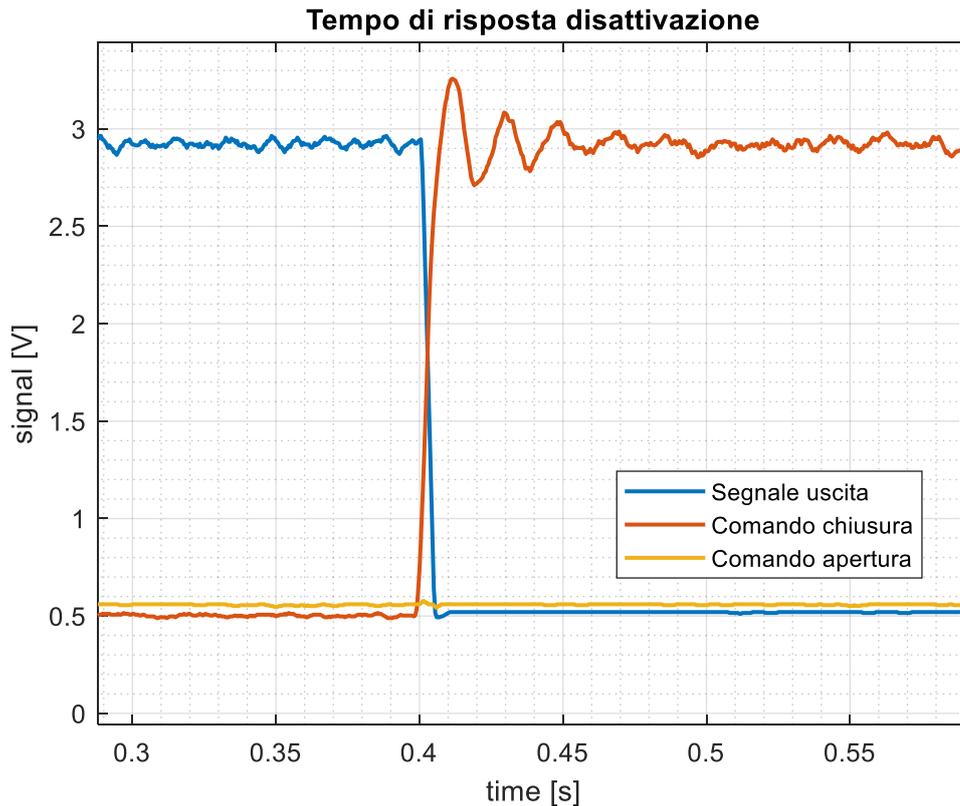


Figura 41 Ingrandimento



*Figura 42 Ingrandimento*

In Figura 40 sono rappresentati gli andamenti dei segnali di comando di apertura e chiusura, del segnale di uscita e della pressione a monte della valvola in prova. Si può subito osservare come a seguito del cambiamento della configurazione, la pressione di monte varia molto meno rispetto al caso precedente, ciò è visibile in Figura 43 in cui si vede come la pressione di monte non ha variazioni brusche in corrispondenza degli istanti in cui la valvola commuta, il serbatoio riesce a stabilizzare la pressione che non scende al di sotto del 3% della pressione di alimentazione, nella Figura 43 i segmenti azzurri delimitano il campo di valori accettabili, infatti il segmento superiore è posto al valore di tensione di alimentazione di regime più il 3% e il segmento inferiore superiore è posto al valore di tensione di alimentazione meno il 3% del suo valore di regime, il segnale non oltrepassa tali segmenti questo conferma il fatto che la pressione a monte della valvola è stabile e non varia troppo. Per ridurre ancora le oscillazioni di pressione si può collegare il serbatoio direttamente al tubo di misura della pressione a monte della valvola in prova utilizzando un tubo più corto, riducendo la distanza e con un tubo di diametro maggiore; tuttavia, anche senza queste accortezze la normativa è rispettata. Con gli ingrandimenti presenti nella Figura 41 e Figura 42 è possibile osservare il ritardo del tempo di attivazione e disattivazione e come dopo un breve periodo transitorio il segnale si stabilizza andando a regime.

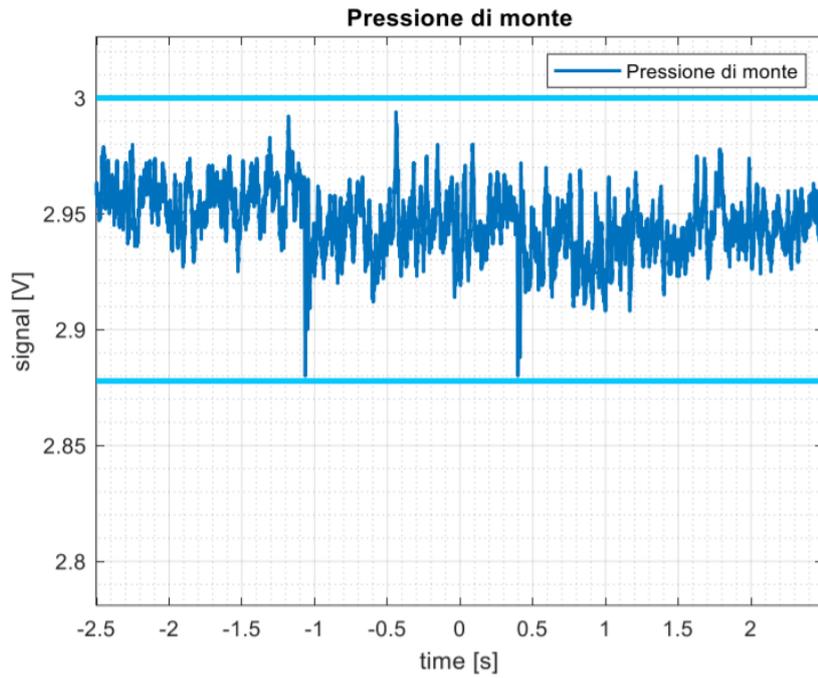


Figura 43 Segnale pressione di monte della valvola in prova,  $f_c=2\text{KHz}$

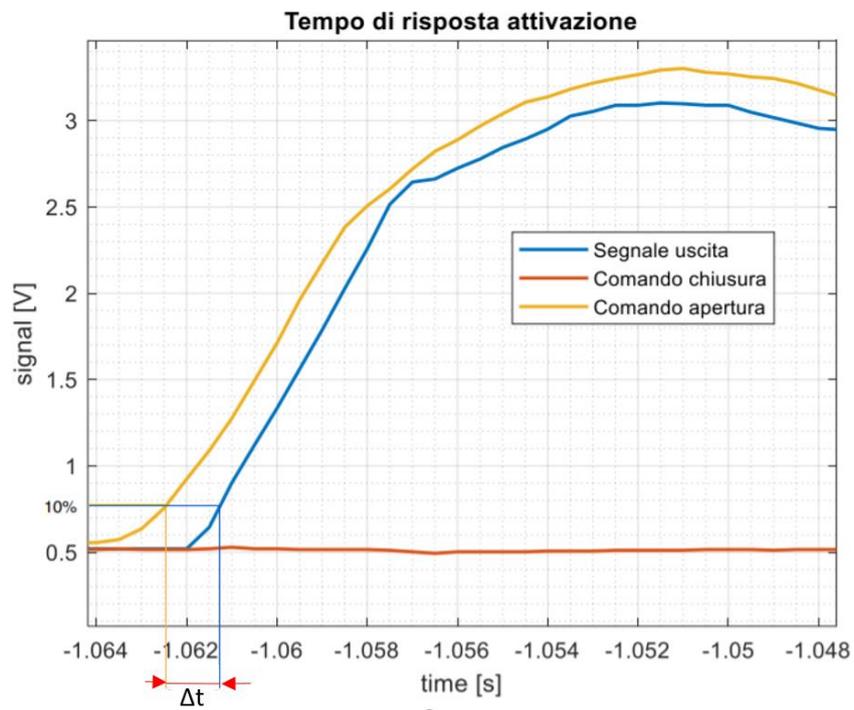


Figura 44: Ingranamento per valutazione tempo di risposta attivazione,  $f_c=2\text{KHz}$

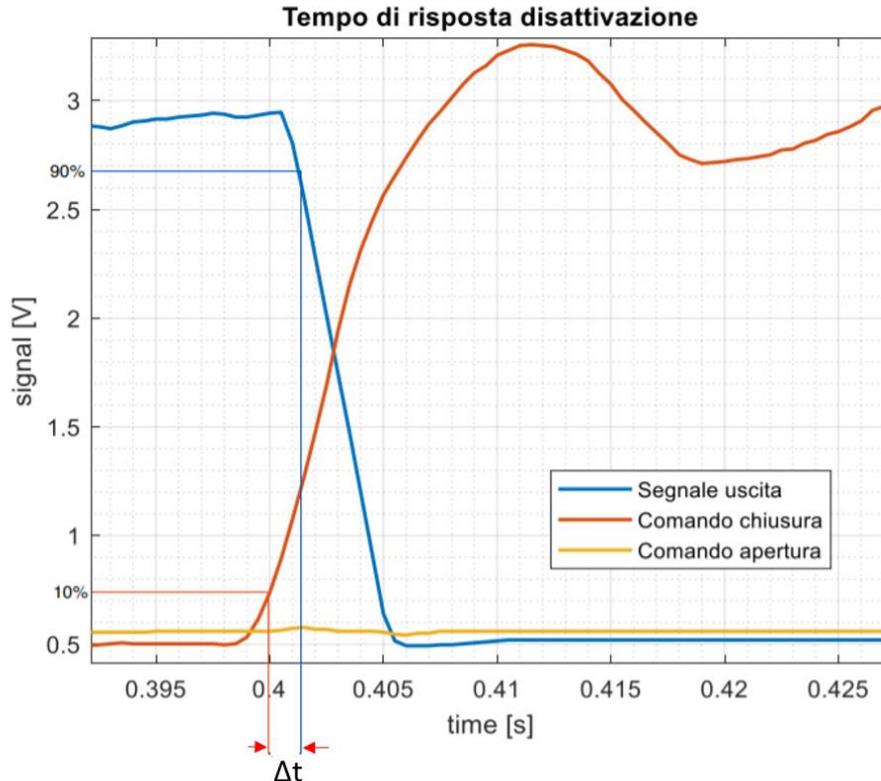


Figura 45: Ingrandimento per valutazione tempo di risposta disattivazione,  $f_c=2\text{KHz}$

In Figura 44 e Figura 45 sono riportati i segnali e i valori per il calcolo dei tempi di risposta di attivazione e disattivazione, entrambi sono stati calcolati secondo normativa. Il tempo di risposta di attivazione è il tempo che intercorre tra il tempo in cui il segnale di comando di apertura raggiunge il 10% del valore di regime e il tempo in cui il segnale di uscita raggiunge il 10% del suo valore di regime. Il tempo di disattivazione è stato calcolato come l'intervallo di tempo che intercorre tra il tempo in cui il segnale di comando chiusura è al 10% del suo valore di regime e l'istante di tempo in cui il segnale di uscita raggiunge il 90% del suo valore di regime. I valori utilizzati per il calcolo dei tempi di risposta e i relativi tempi di attivazione e disattivazione sono evidenziati nelle figure.

#### 4.4 Valutazione tempi di risposta della valvola in prova

Il paragrafo seguente tratta la valutazione dei tempi di risposta con il banco prova nella nuova configurazione in presenza del serbatoio. In Figura 46 sono rappresentati gli andamenti per il calcolo dei tempi di risposta con un'acquisizione a 2 kHz e segnale filtrato con  $\text{spam}=15$ , con tale filtraggio numerico si vanno a ridurre le rumorosità dei segnali.

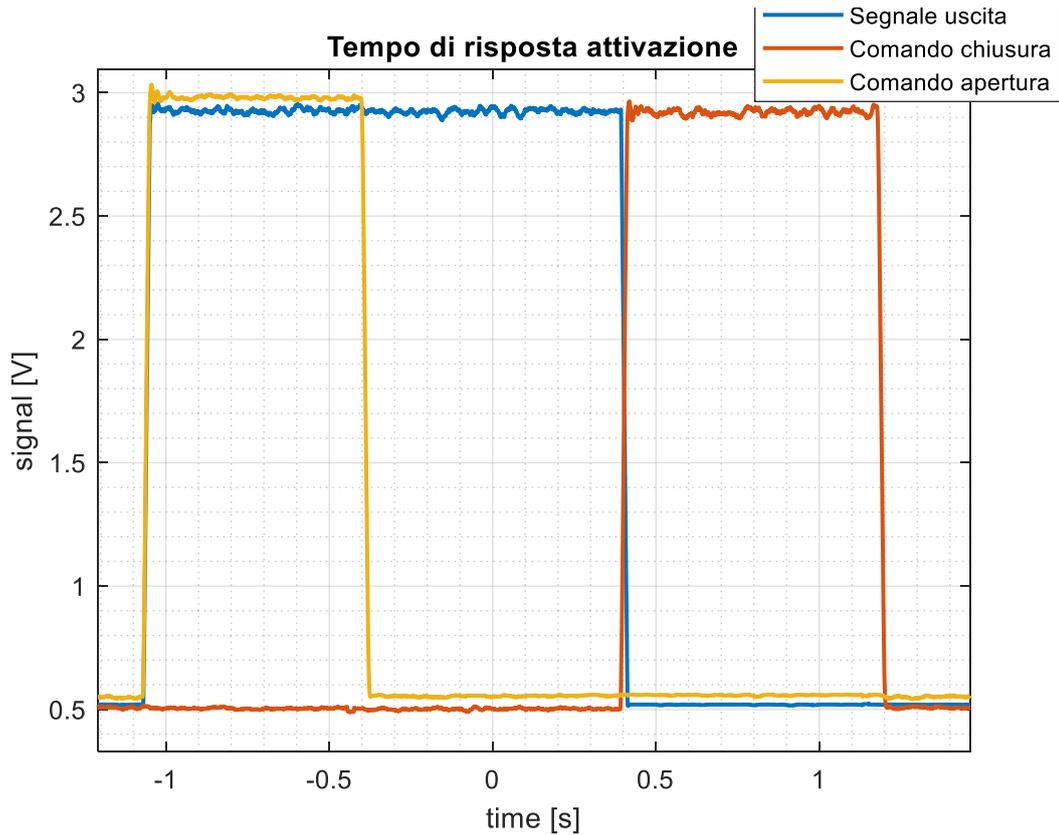


Figura 46: Segnali per valutare tempi di risposta acquisizione a 2 kHz filtrati

In Figura 47 è riportato l'andamento del segnale misurato dal trasduttore posto sul tubo di misura della pressione posto a monte della valvola in prova. Possiamo subito notare come tale segnale a seguito di operazione di filtraggio numerico abbia un andamento maggiormente lineare e in corrispondenza dell'istante di commutazione della valvola il segnale non scende al di sotto del 3% del valore di regime.

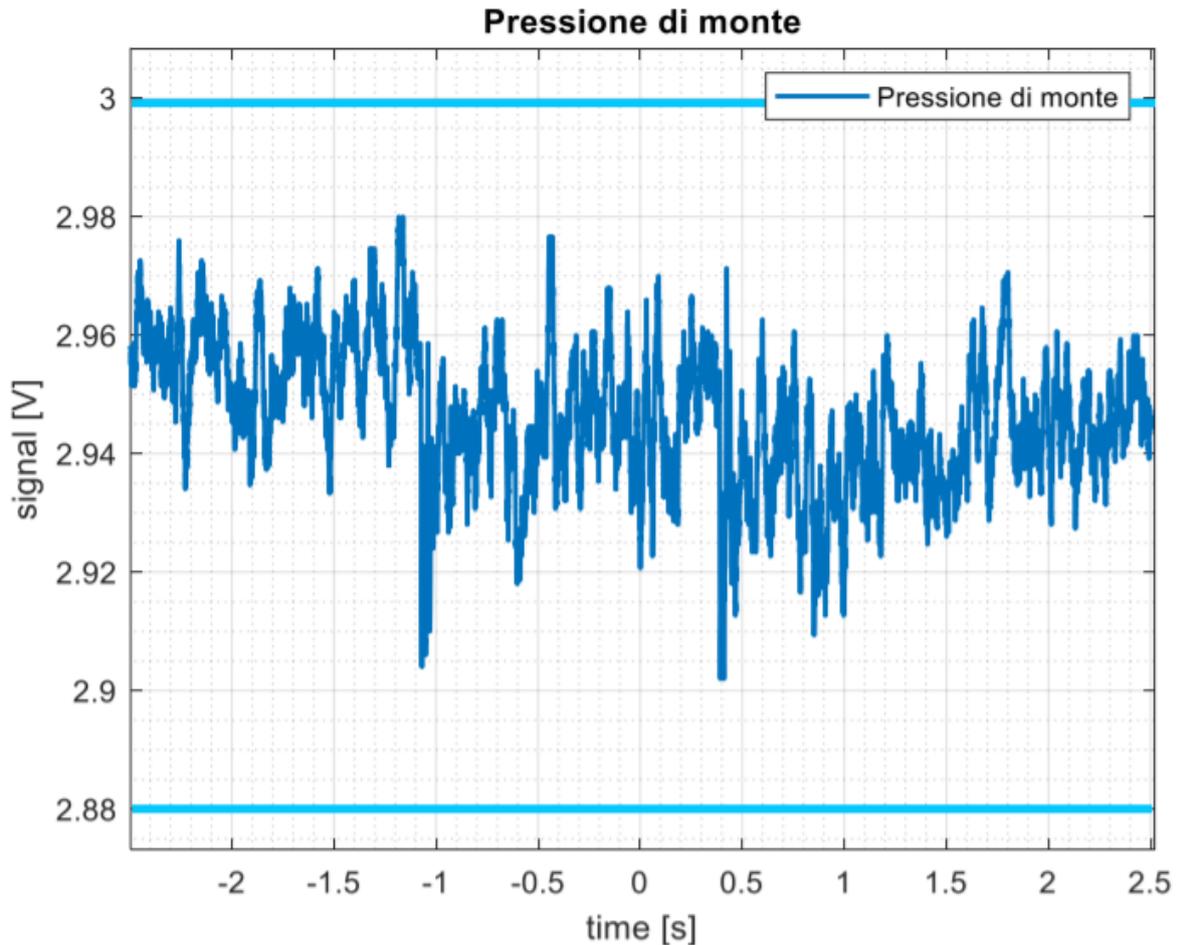


Figura 47: Andamento pressione di monte segnale filtrato,  $f_c=2\text{KHz}$

Nei seguenti grafici sono rappresentati gli andamenti dei segnali di pressione ricavabili dai segnali di tipo elettrico misurati dai trasduttori piezoresistivi e dai loro corrispettivi coefficienti. In Figura 48 sono rappresentati gli andamenti dei segnali di pressioni di pilotaggio e di uscita, mentre in Figura 49 è rappresentato l'andamento del segnale di pressione di alimentazione della valvola in prova, anche in questo caso si nota come in corrispondenza dei segnali di comando e quindi della commutazione del cassetto si ha un abbassamento della pressione che tuttavia non scende al di sotto del 3% della pressione di alimentazione. Figura 50, Figura 51, e Figura 52 si riferiscono al tempo di risposta in attivazione, in particolare dall'ingrandimento mostrato in Figura 52 si può valutare il tempo di risposta di attivazione per la prova effettuata alla frequenza di campionamento pari a 2KHz. Figura 53, Figura 54 e Figura 55 si riferiscono al tempo di risposta di disattivazione, in particolare dall'ingrandimento mostrato di Figura 55 si può valutare il tempo di risposta di disattivazione per la prova effettuata alla frequenza di campionamento pari a 2KHz, in figura sono indicati i valori del 10 % del valore di pressione di pilotaggio di disattivazione di regime e il 90% del valore di pressione di uscita di regime necessari per il calcolo del tempo di risposta di disattivazione.

In Figura 48 sono rappresentati gli andamenti dei segnali di comando di apertura, di comando chiusura e di uscita espressi sotto forma di pressione in bar, tali segnali possono essere ricavati dai segnali elettrici acquisiti conoscendo i guadagni dei trasduttori di pressione.

$$p = (V_T - V_0)/K_T$$

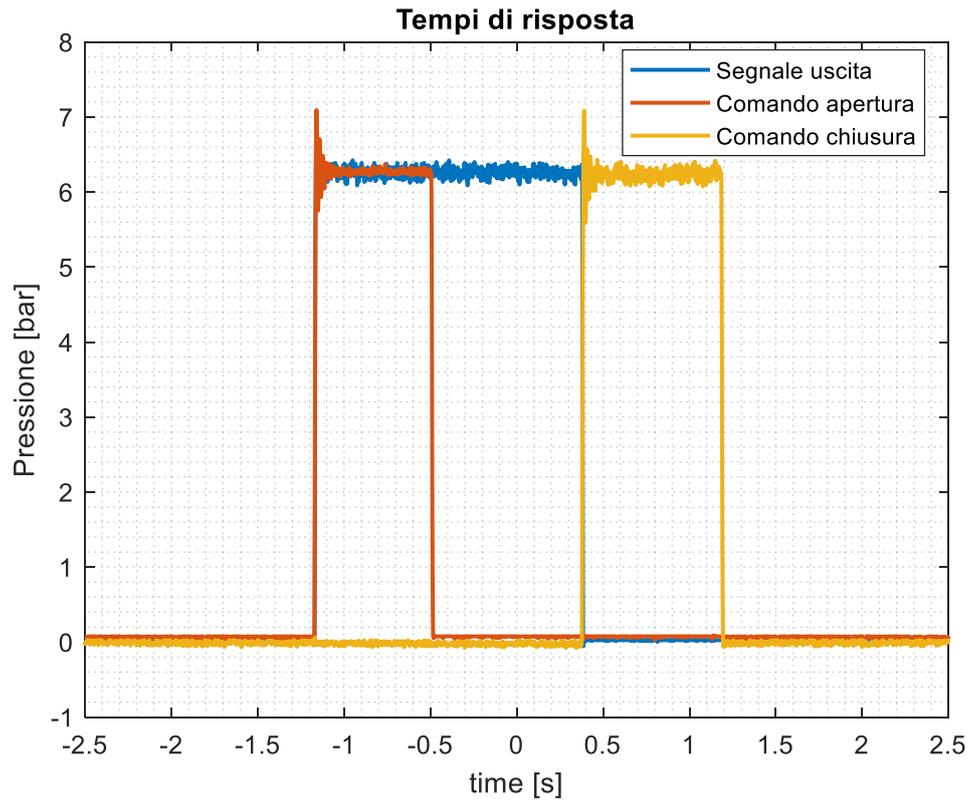


Figura 48: Segnali acquisizione 2KHz

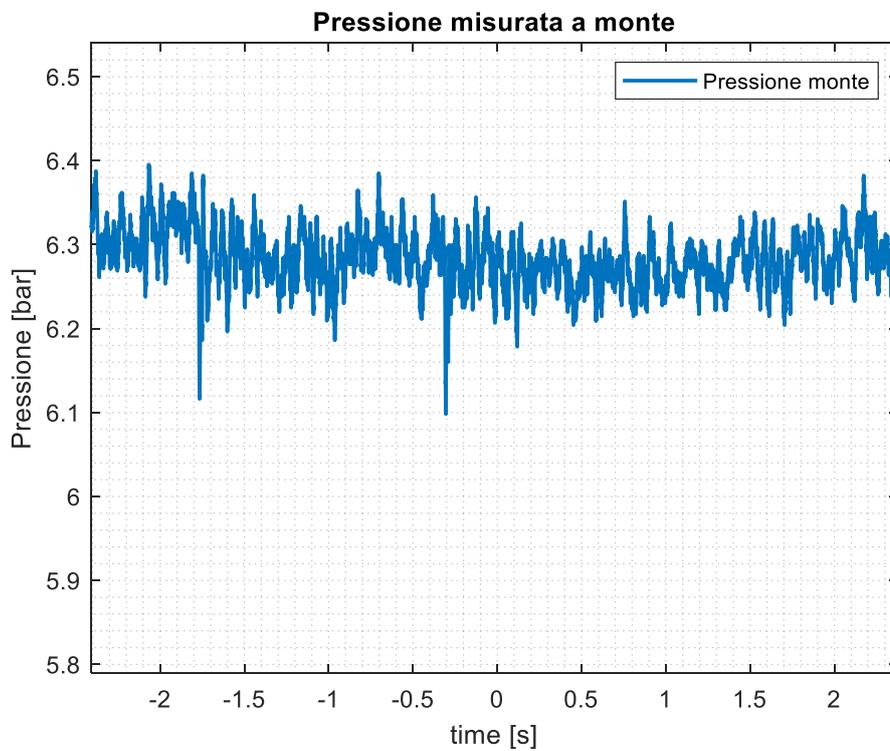


Figura 49: Andamento pressione misurata a monte della valvola,  $f_c=2\text{KHz}$

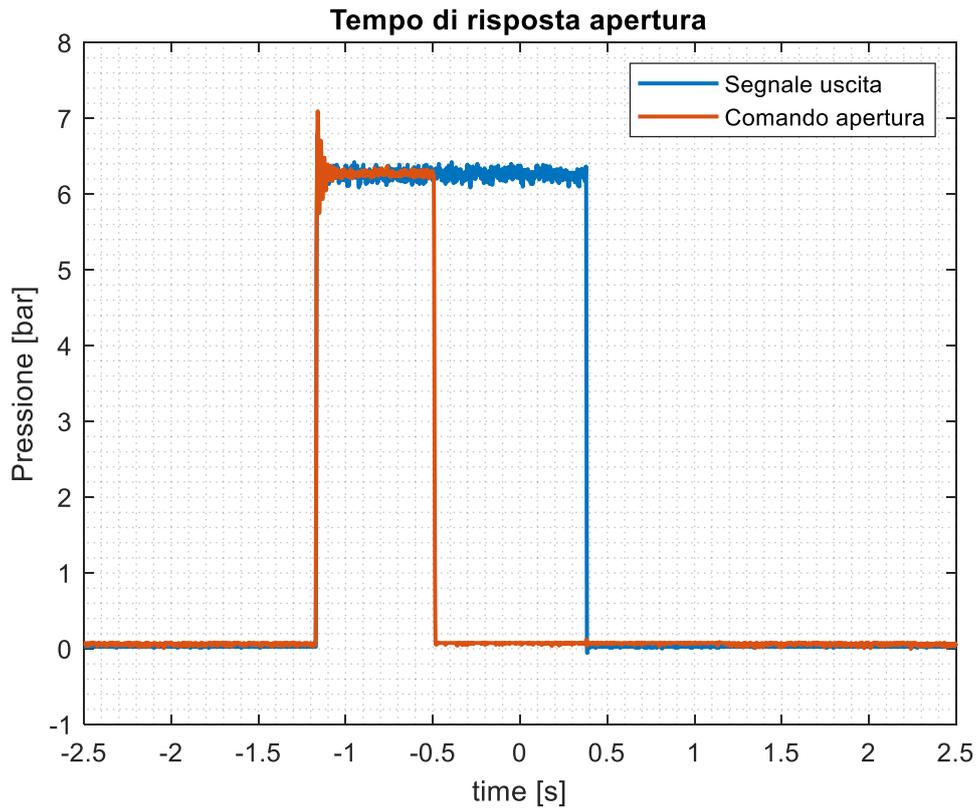


Figura 50: Tempo di risposta attivazione,  $f_c=2\text{KHz}$

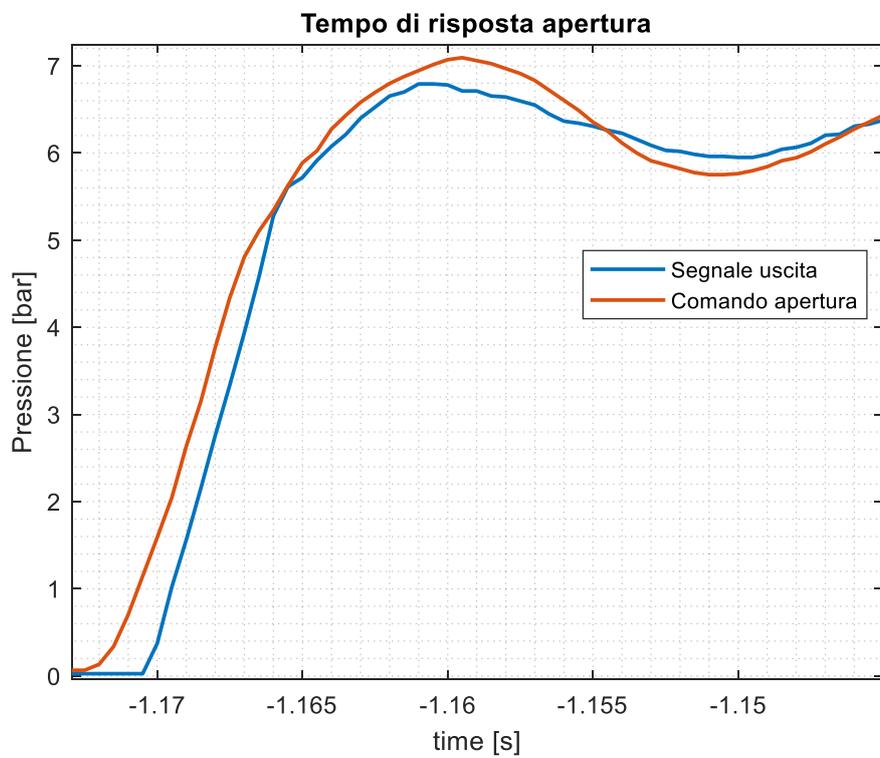


Figura 51: Ingrandimento tempo di risposta attivazione,  $f_c=2\text{KHz}$

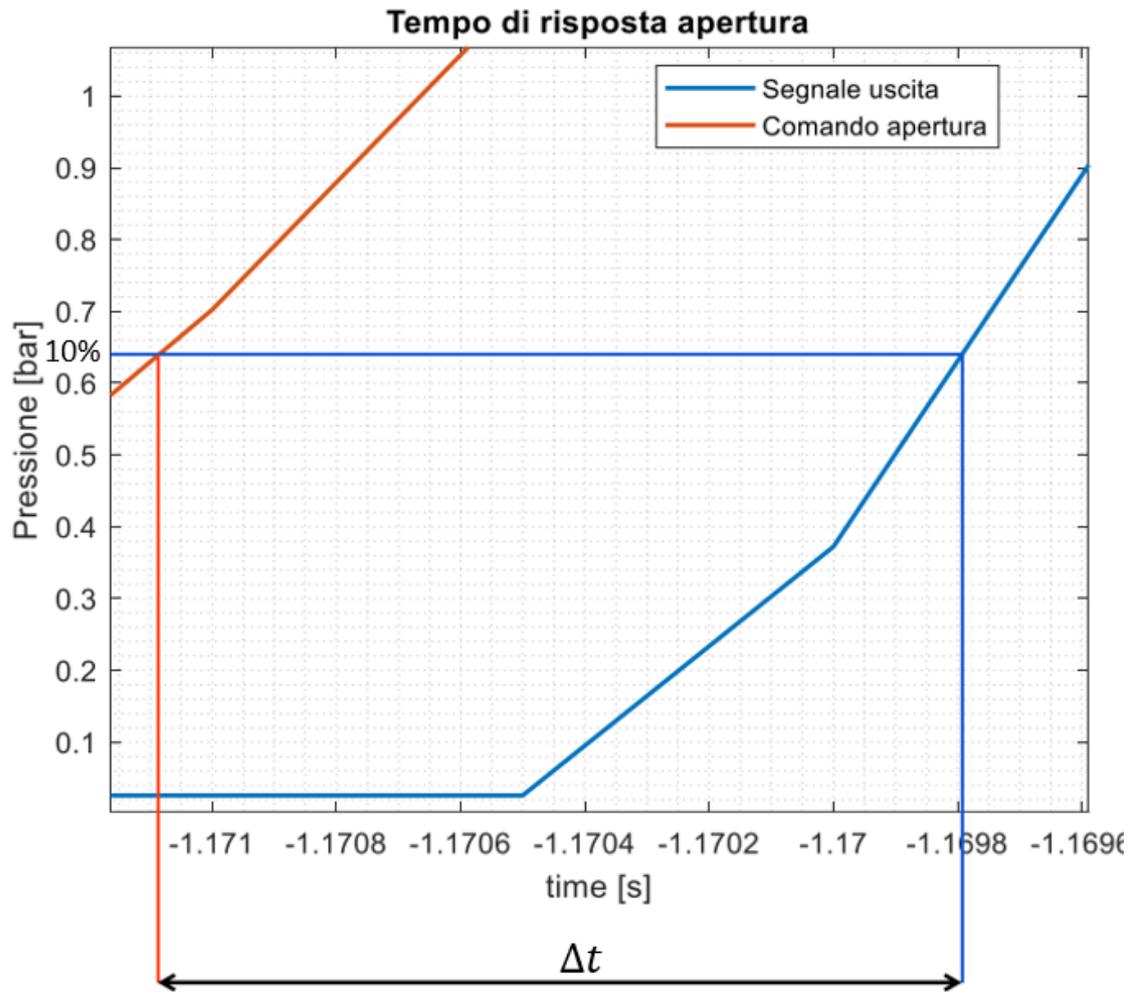


Figura 52: Tempo di risposta di attivazione,  $f_c=2\text{KHz}$

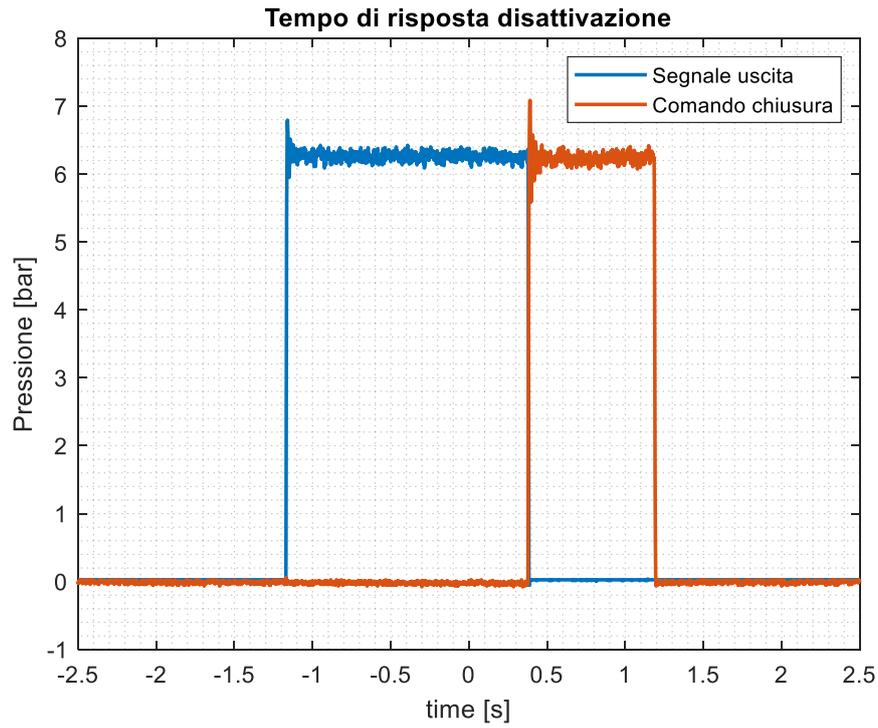


Figura 53: Tempo di risposta disattivazione,  $f_c=2\text{KHz}$

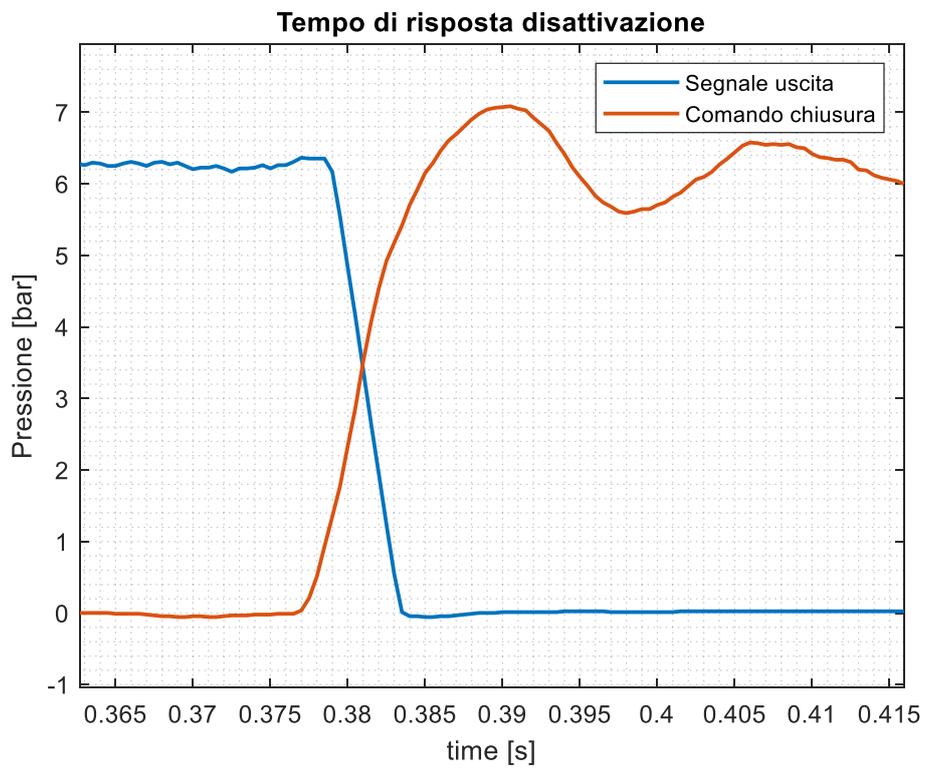


Figura 54: Ingrandimento tempo di risposta disattivazione,  $f_c=2\text{KHz}$

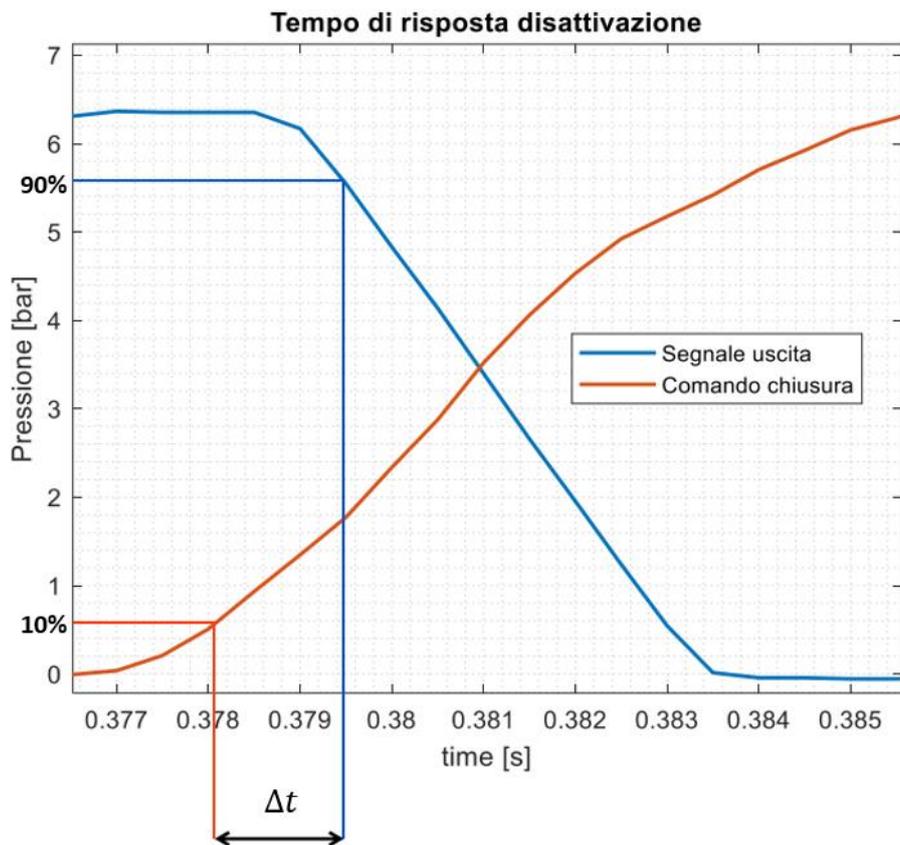


Figura 55: Tempo di risposta di disattivazione,  $f_c=2\text{KHz}$

Calcolo tempi di risposta		
Prova	ton [ms]	toff [ms]
1	2	2
2	2	2
3	2	1,5
4	2	2
5	2	2
6	2,5	2
7	3	3
8	2	2,5
9	1,5	1,5
10	2	2
11	2	2
12	2	2
13	2	2
14	1,5	1,5
15	1,5	2
16	2	1,5
17	2	2
18	2	2
19	2	1,5
20	2	2

Valore medio	2	1,95
Varianza	0,11	0,13
Deviazione standard	0,32	0,36
COV	0,16	0,18

Tabella 7 Calcolo tempi di risposta

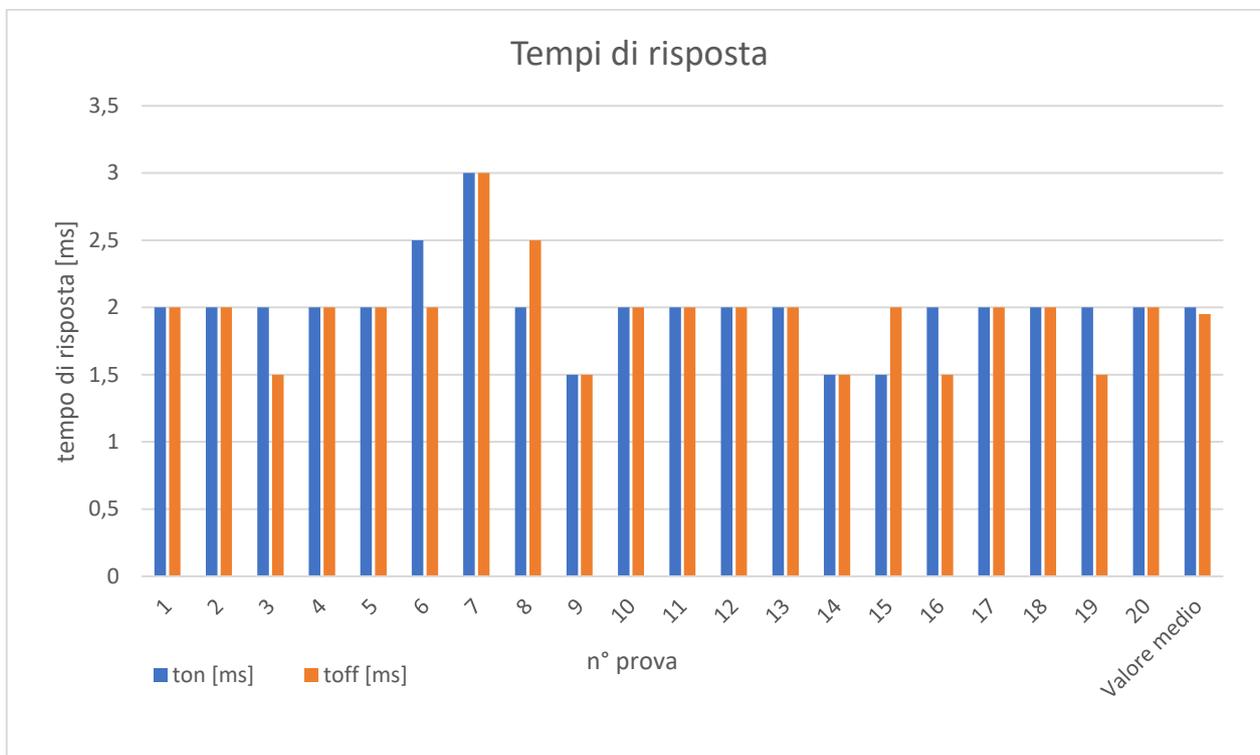


Figura 56: Calcolo tempi di risposta attivazione e disattivazione

Nelle 20 prove effettuate si trovano dei tempi di risposta simili. In particolare, il tempo di attivazione è pari a circa 2 ms mentre il tempo di disattivazione è di circa 1.95 ms. I tempi di attivazione e disattivazione sono simili in accordo con la simmetria della valvola. Poiché i valori di deviazione standard e COV (Coefficient of Variation) sono molto bassi si può affermare che i risultati ottenuti sono validi e tutte le prove sono state eseguite correttamente.

## 5. Prove a pressione di monte variabile

Per conoscere il comportamento del banco a pressioni di alimentazione diverse da 6,3 bar prevista da normativa, sono stati effettuati dei test a pressioni di alimentazione maggiori di 7,5 bar e a pressioni di alimentazioni minori di 5, 4, 3 e 2,5bar. Di seguito sono riportati i risultati ottenuti per le prove eseguite a queste pressioni di alimentazione e in particolare come cambiano i tempi di risposta.

### 5.1 Prova a pressione 7,5 bar

I grafici 57 e 58 mostrano gli andamenti dei segnali misurati dai sensori di pressione e acquisiti con l'oscilloscopio con frequenza di campionamento di 2KHz e pressione di alimentazione pari a 7,5 bar.

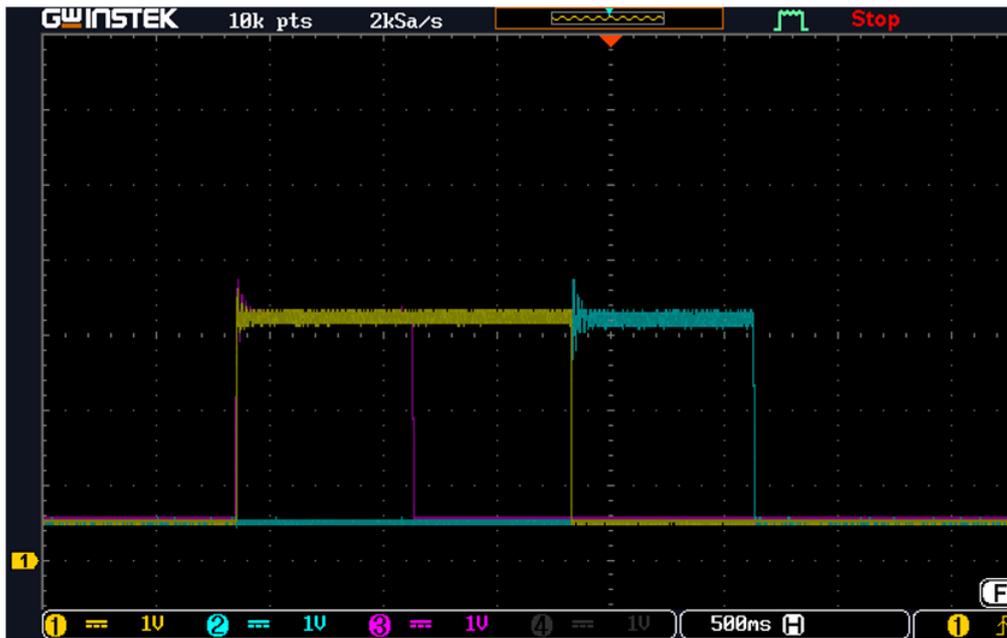


Figura 57: Acquisizione con oscilloscopio con pressione di alimentazione pari a 7,5 bar e frequenza di campionamento pari a 2KHz

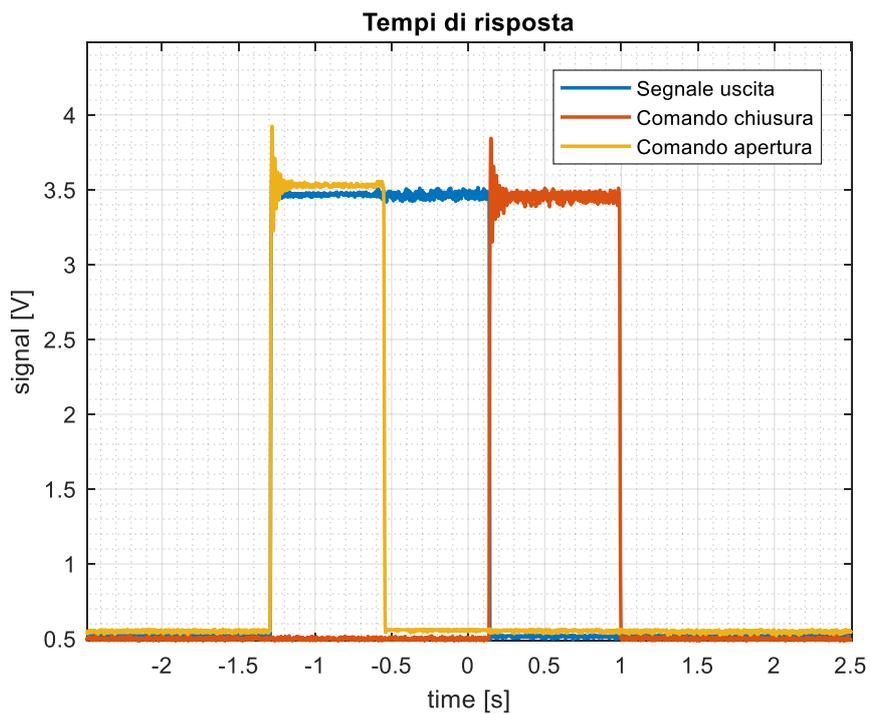


Figura 58: Prova con pressione di alimentazione di 7,5 bar,  $f_c=2\text{KHz}$

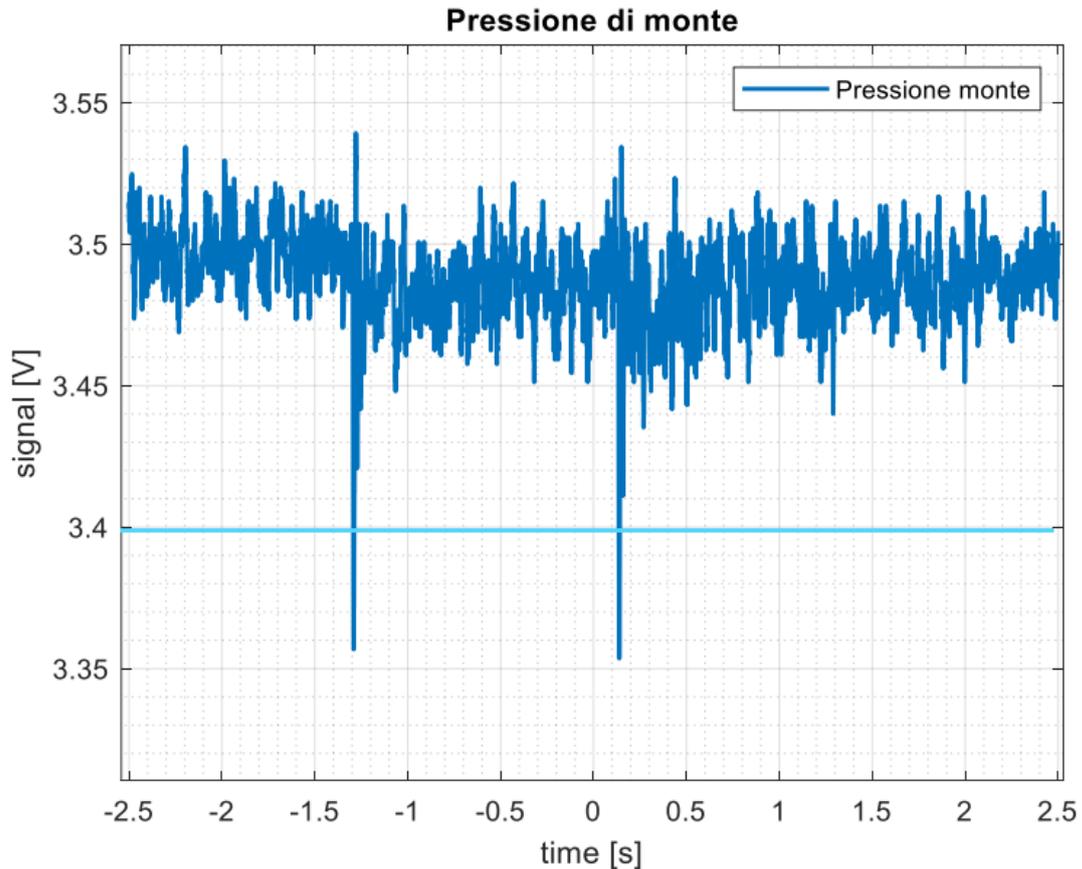


Figura 59: Andamento pressione misurata a monte di valvola in prova con pressione di alimentazione pari a 7,5bar,  $f_c=2\text{KHz}$

Osservando la Figura 59 si può notare che a seguito di un aumento della pressione di alimentazione pari a 7,5 bar la pressione misurata a monte della valvola ha maggiori oscillazioni. In questo caso la pressione scende al di sotto del 3% della pressione di alimentazione di regime, infatti, oltrepassa la linea azzurra che rappresenta il limite del 3%.

## 5.2 Valutazione tempi di risposta con pressione di alimentazione variabile

Nella tabella sottostante sono riportate le caratteristiche dei segnali acquisiti per la valutazione dei tempi di risposta della valvola in prova.

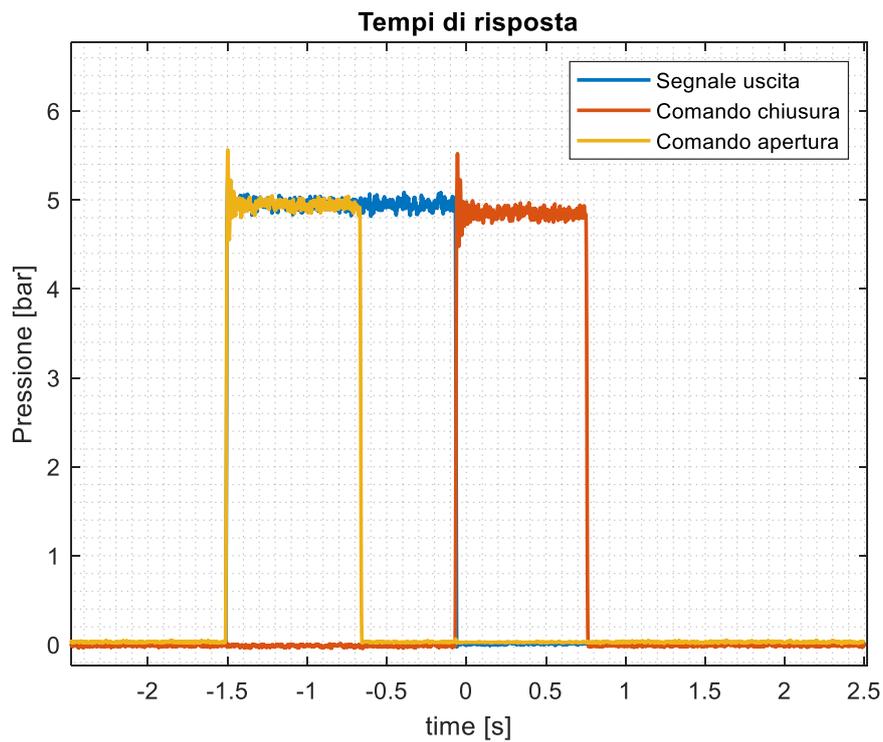
Pressione alimentazione [bar]	7,5	7	6,3	5	4	3	2,5
Offset segnali [V]	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
Tensione uscita in regime [V]	3,40	3,20	2,93	2,43	2,05	1,66	1,47
10% tensione uscita [V]	0,80	0,78	0,75	0,70	0,66	0,63	0,61
90% tensione uscita [V]	3,11	2,93	2,69	2,24	1,90	1,55	1,38
Tensione comando attivazione [V]	3,44	3,25	2,97	2,46	2,07	1,68	1,49
10% tensione di attivazione [V]	0,80	0,78	0,76	0,71	0,67	0,63	0,61

Tensione comando disattivazione [V]	3,41	3,22	2,95	2,44	2,06	1,67	1,48
10% tensione di disattivazione [V]	0,80	0,78	0,75	0,70	0,66	0,63	0,61

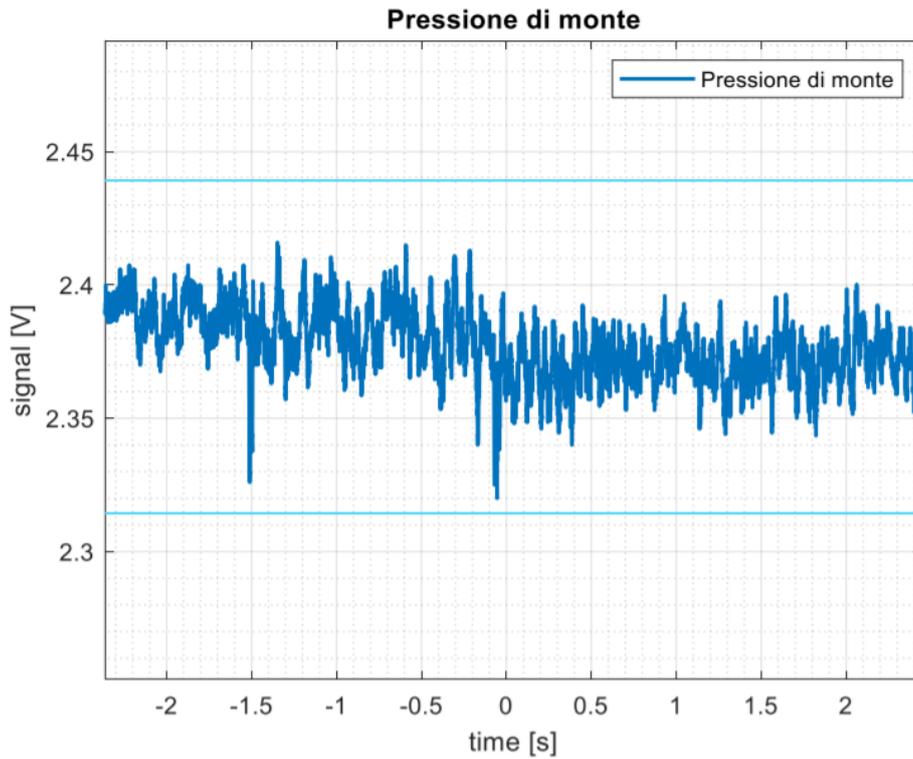
*Tabella 8 Valori per calcolo tempi di risposta dei segnali a diversi livelli di pressione di alimentazione*

Di seguito vengono riportati gli andamenti per livelli di pressione di alimentazioni variabili.

### 5.3 Prove con pressione di alimentazione pari a 5 bar



*Figura 60: Andamenti segnali con acquisizione a 2KHz e pressione di alimentazione pari a 5 bar*



*Figura 61: Andamento pressione di monte, acquisizione con pressione di alimentazione pari a 5 bar,  $f_c=2\text{KHz}$*

In Figura 61 è rappresentato l'andamento del segnale misurato dal trasduttore di pressione posto a monte della valvola in prova, è possibile notare come la pressione di monte scende in corrispondenza degli istanti di commutazione della valvola, in questo caso il segnale non oltrepassa la linea celeste, quindi, non scende al di sotto del 3% della pressione di alimentazione.

## 5.4 Prove con pressione di alimentazione pari a 4 bar

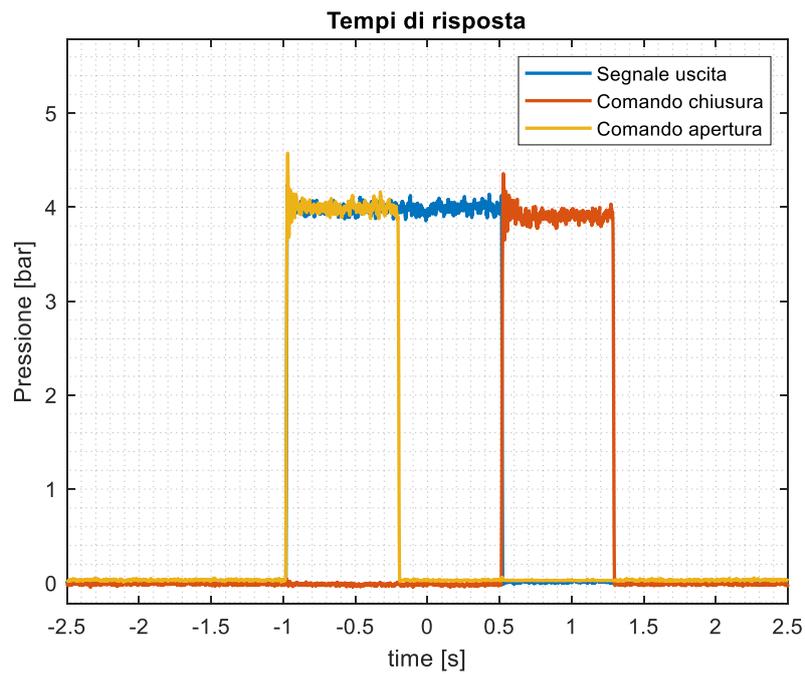


Figura 62: Andamenti segnali con acquisizione a 2KHz e pressione di alimentazione pari a 4 bar

## 5.5 Prove con pressione di alimentazione pari a 3 bar

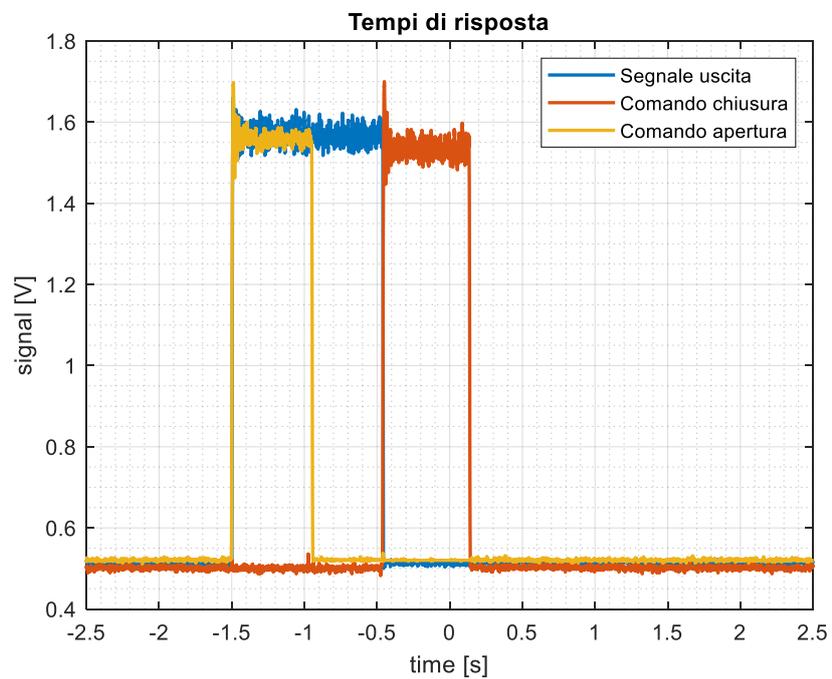


Figura 63: Andamenti segnali con acquisizione a 2KHz e pressione di alimentazione pari a 3 bar

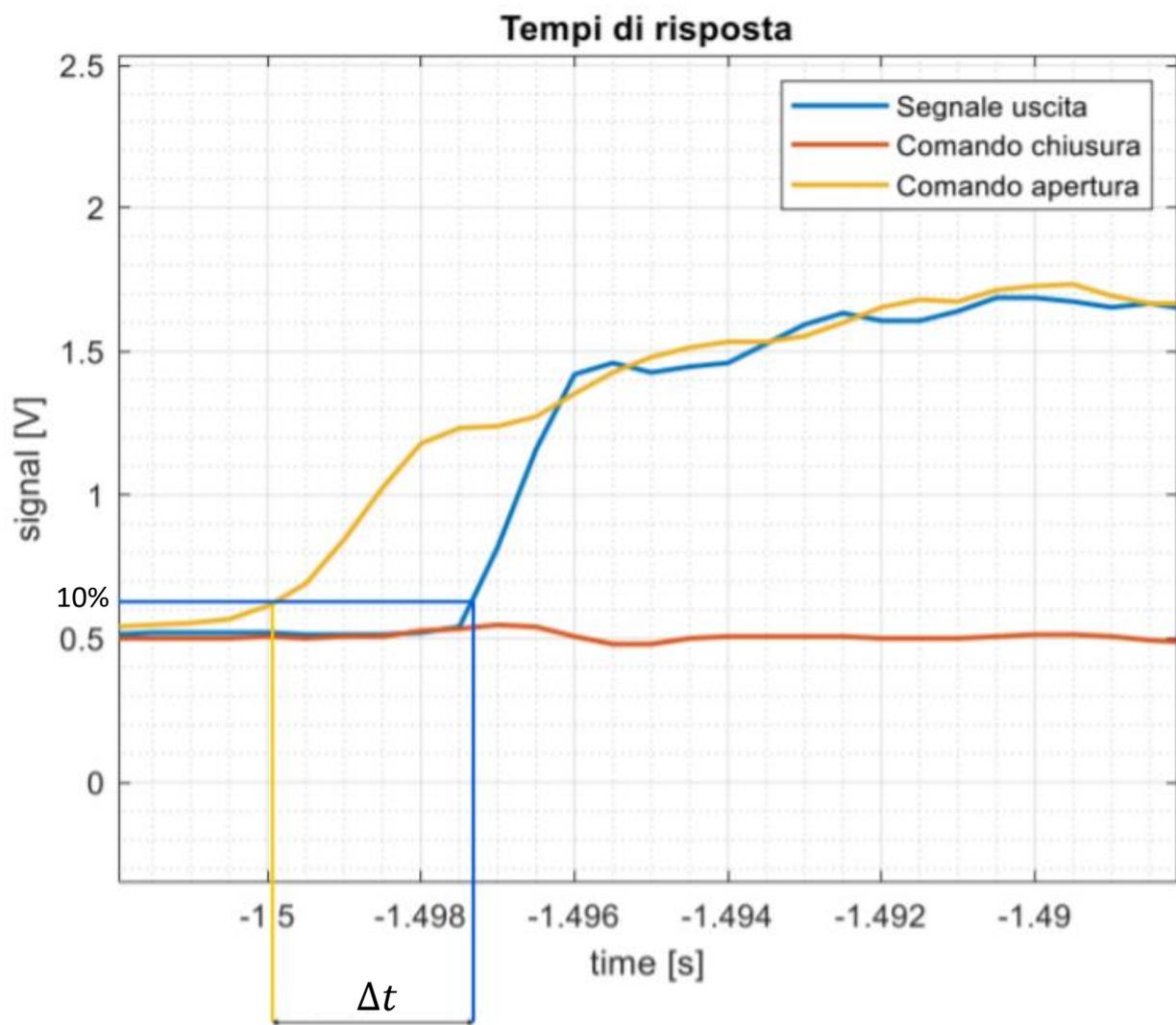


Figura 64: Valutazione di tempo di risposta di attivazione della valvola in prova,  $f_c=2\text{KHz}$

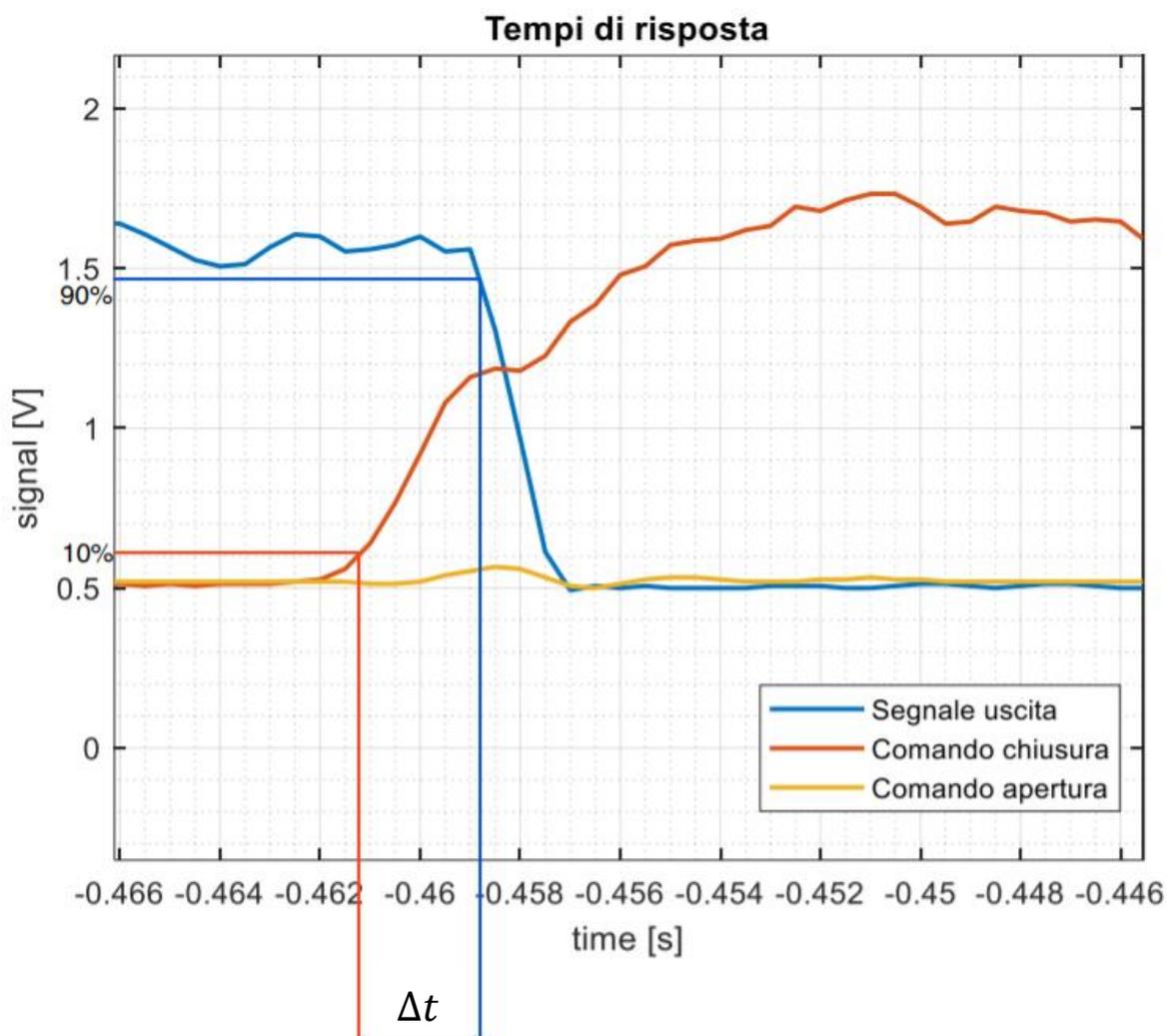


Figura 65: Valutazione tempo di risposta disattivazione della valvola in prova,  $f_c=2\text{KHz}$

In Figura 64 e Figura 65 sono riportati i segnali e i valori per il calcolo dei tempi di risposta di attivazione e disattivazione, entrambi sono stati calcolati secondo normativa. Il tempo di risposta di attivazione è il tempo che intercorre tra il tempo in cui il segnale di comando di apertura raggiunge il 10% del valore di regime e il tempo in cui il segnale di uscita raggiunge il 10% del suo valore di regime. Il tempo di disattivazione è stato calcolato come l'intervallo di tempo che intercorre tra il tempo in cui il segnale di comando chiusura è al 10% del suo valore di regime e l'istante di tempo in cui il segnale di uscita raggiunge il 90% del suo valore di regime. Analizzando i precedenti grafici possiamo subito notare gli overshoot dei segnali in corrispondenza dei segnali di commutazione della valvola in prova, successivamente si hanno delle oscillazioni del segnale per un breve periodo transitorio prima che i segnali si stabilizzano al valore di regime.

Possiamo anche notare come i tempi di risposta di attivazione e disattivazione sono maggiori rispetto alle prove con pressione di alimentazione pari a 6,3 bar.

Calcolo tempi di risposta al variare della pressione di alimentazione		
p=7,5 bar		
Prova	ton	toff
1	1,50	1,50
2	1,30	1,40
3	1,40	1,40
Media	1,40	1,43
Deviazione standard	0,10	0,06
Varianza		
COV	0,07	0,04
p=7 bar		
Prova	ton	toff
1	1,50	1,50
2	1,40	1,40
3	1,50	1,80
Media	1,47	1,57
Deviazione standard	0,06	0,21
Varianza	0,00	0,04
COV	0,04	0,13
p=5 bar		
Prova	ton	toff
1	2,50	2,50
2	2,30	2,50
3	2,40	2,40
Media	2,40	2,47
Deviazione standard	0,10	0,06
Varianza	0,01	0,00
COV	0,04	0,02
p=4 bar		
Prova	ton	toff
1	2,50	3,00
2	2,80	2,70
3	2,70	2,60
Media	2,67	2,77
Deviazione standard	0,15	0,21
Varianza	0,02	0,04
COV	0,06	0,08
p=3 bar		
Prova	ton	toff
1	4,50	4,80
2	4,60	4,60
3	4,90	4,80
Media	4,67	4,73
Deviazione standard	0,21	0,12
Varianza	0,04	0,01
COV	0,04	0,02
p=2,5 bar		

Prova	ton	toff
1	7,00	6,80
2	6,50	6,80
3	6,30	6,50
Media	6,60	6,70
Deviazione standard	0,36	0,17
Varianza	0,13	0,03
COV	0,05	0,03

Tabella 9 Calcolo tempi di risposta al variare della pressione di alimentazione

### 5.6 Analisi tempi di risposta di attivazione e disattivazione al diminuire della pressione di alimentazione

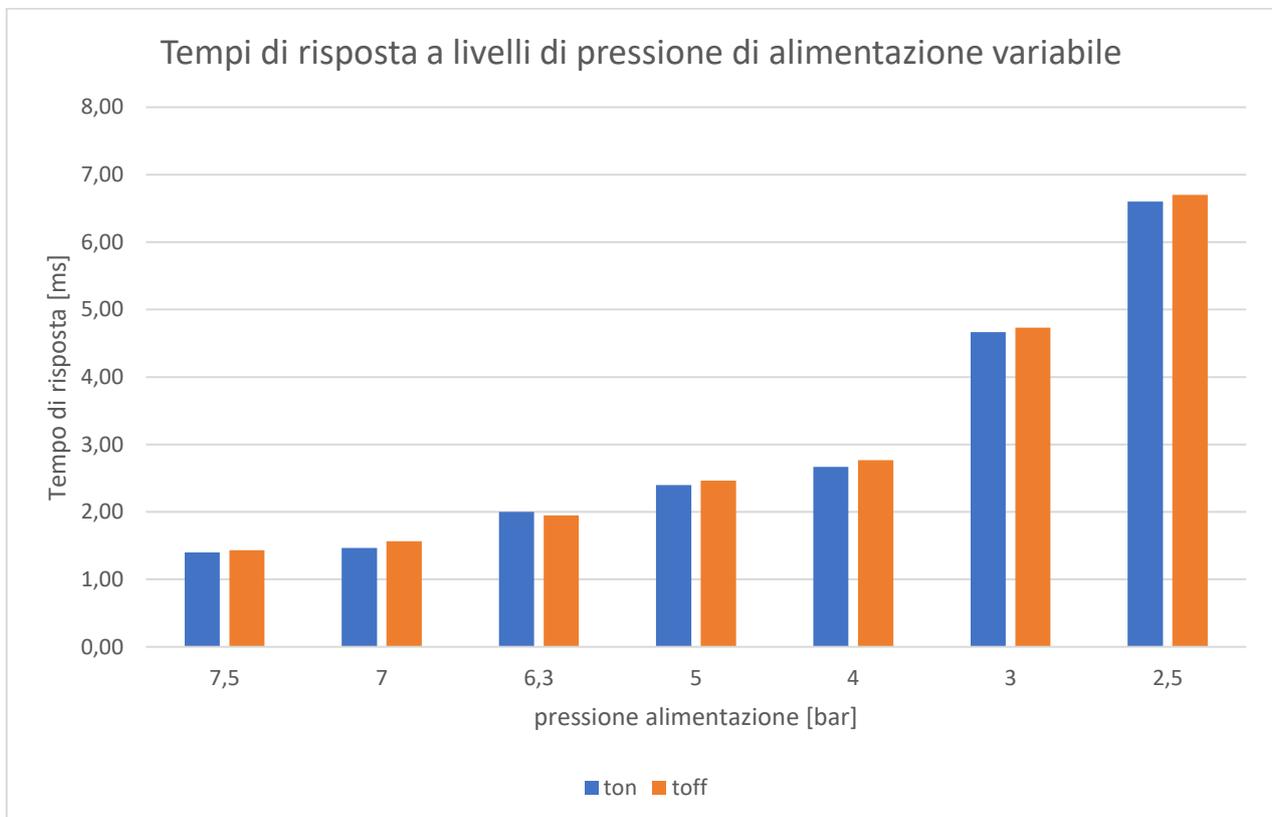
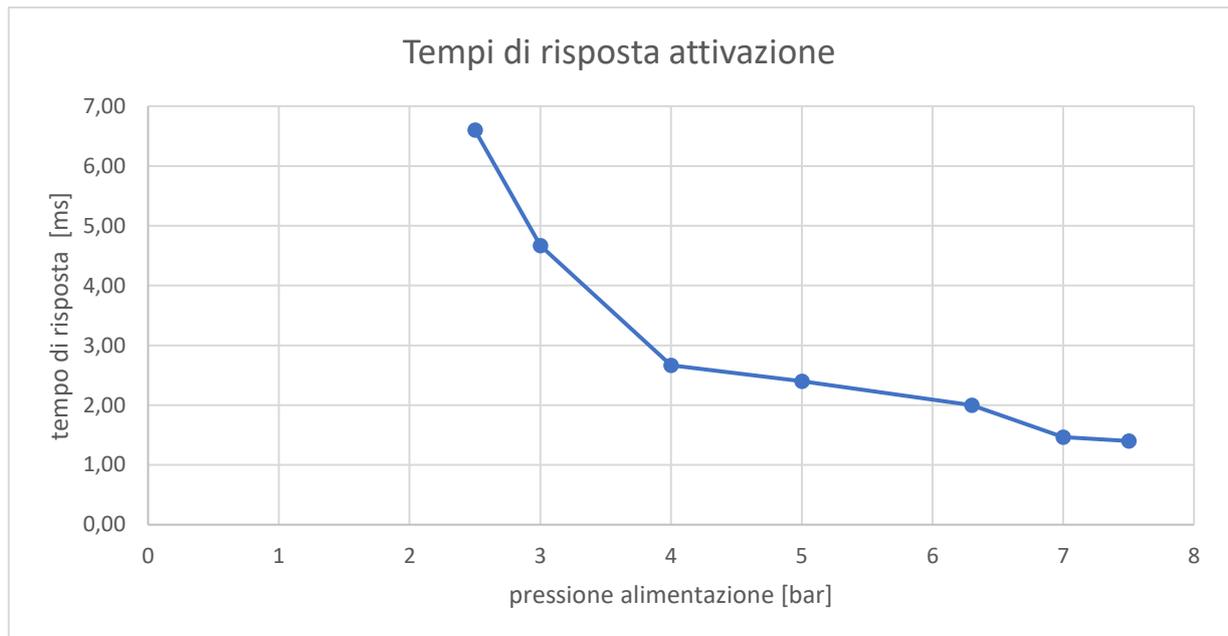


Figura 66: Tempi di risposta al variare della pressione di alimentazione



*Figura 67: Valutazione tempi di risposta di attivazione al variare della pressione di alimentazione*

Dai risultati illustrati nella tabella 9 possiamo osservare come per ogni prova a pressione di alimentazione diversa si ottengono dei tempi di risposta sia di attivazione che di disattivazione molto simili; quindi, i seguenti valori hanno una rilevanza sperimentale, indice del fatto che le prove sono state svolte seguendo la pratica progettuale, ciò è coerente con dei valori di deviazione standard e COV bassi.

Osservando in particolare i valori medi ottenuti si vede come i tempi di risposta, sia in attivazione che in disattivazione, aumentano al diminuire della pressione di alimentazione, in accordo con il fatto che la pressione inviata dalle elettrovalvole di comando che va ad agire agli estremi del cassetto della valvola in prova per la commutazione dello stesso è minore e quindi si ha una forza minore per spingere il cassetto della valvola in prova per la commutazione dello stesso è minore e quindi si ha una forza minore per spingere il cassetto.

In particolare, osservando l'andamento mostrato in Figura 67 si osserva come per valori di pressione di alimentazione al di sotto di 4 bar i tempi di risposta aumentano vertiginosamente, mentre per variazioni di pressione dai 7,5 ai 5 bar l'aumento dei tempi di risposta è più graduale.

## 6. Modello matematico

Nel seguente capitolo viene presentato il modello numerico della valvola in prova al fine di simulare le prestazioni dinamiche della valvola utilizzata e di confrontare di risultati teorici con i risultati ricavati sperimentalmente.

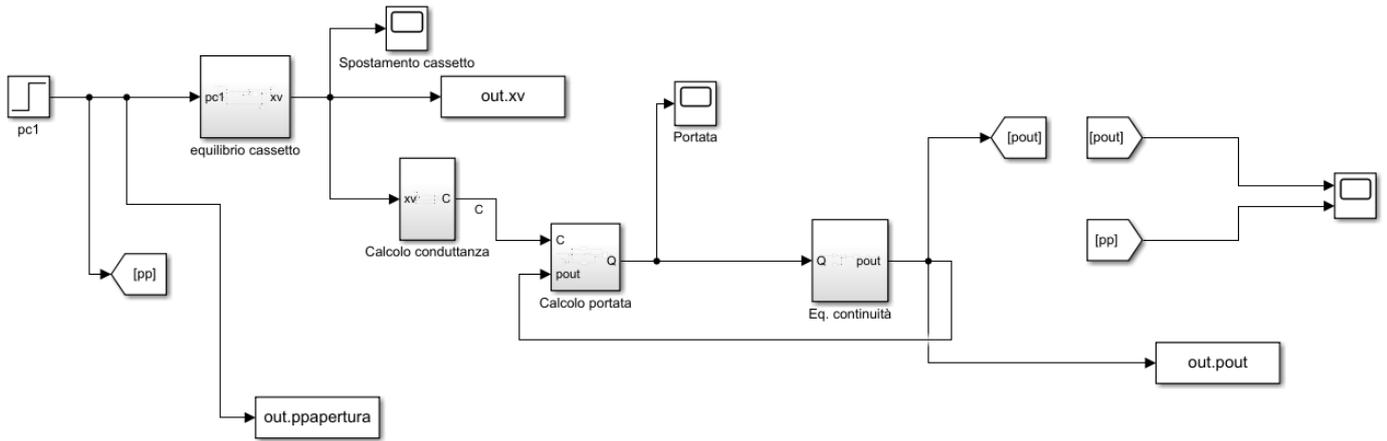


Figura 68: Modello matematico valvola in prova

La valvola di prova nel banco è una valvola bistabile a comando pneumatico 5 bocche 2 posizioni di lavoro di taglia 1/4". Il modello si basa su sottosistemi: equilibrio del cassetto, calcolo conduttanza per il calcolo della portata e l'equazione di continuità. In questo modello il segnale di comando per l'attivazione è rappresentato da un comando a gradino che parte da 0 bar e termina a 6.3 bar.

### 6.1 Equilibrio dinamico sul cassetto

Nel seguente paragrafo vengono illustrate le forze che agiscono sul cassetto, il quale rappresenta la parte mobile della valvola in prova, ed infine viene scritta l'equazione di equilibrio dinamico.

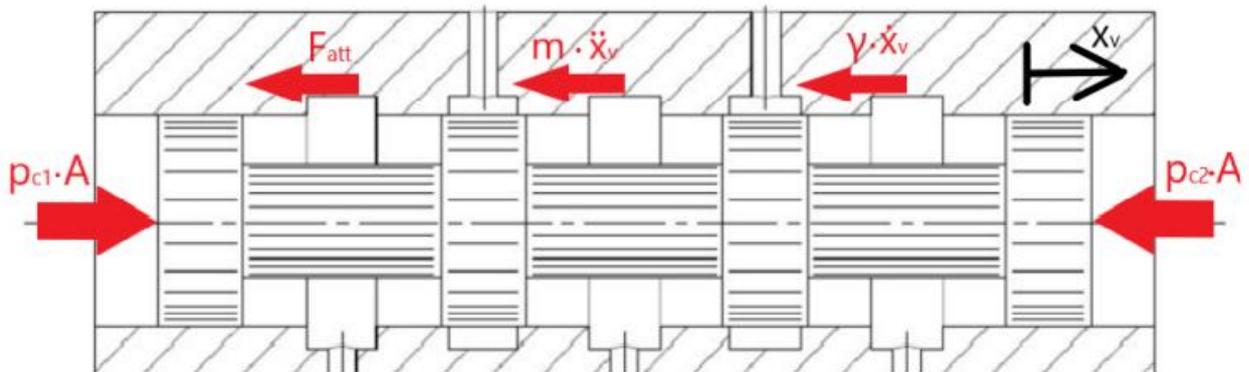


Figura 69: Forze agenti sul cassetto [5]

L'equazione di equilibrio dinamico è la seguente:

$$m \ddot{x}_v + \gamma \dot{x}_v + F_{att} + p_{c2} A = p_{c1} A$$

Dove:

- $m$ : massa cassetto
- $\gamma$ : coefficiente di attrito viscoso
- $A$ : sezione del cassetto sul quale agisce la pressione di comando
- $\dot{x}_v$ : velocità cassetto
- $\gamma \dot{x}_v$ : forza di attrito viscosa

- $\ddot{x}_v$ : accelerazione cassetto
- $x_v$ : spostamento cassetto
- $F_{att}$ : forza di attrito dovuta specialmente alle tenute tra cassetto e corpo valvola
- $p_{c1}$ : pressione di pilotaggio di attivazione
- $p_{c2}$ : pressione di pilotaggio di disattivazione

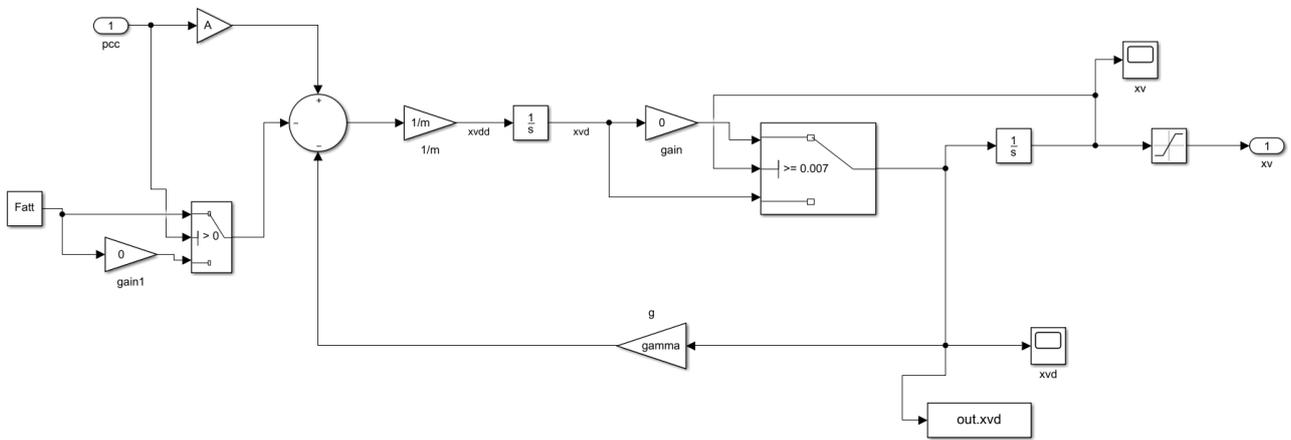


Figura 70: Equilibrio su cassetto

L'equilibrio sul cassetto è descritto nel modello Simulink dalla Figura 70.

Il sottosistema ha in input la pressione di pilotaggio  $p_{c1}$  che agendo sull'area trasversale del cassetto  $A$  genera la forza per la commutazione del cassetto, questa è ostacolata dall'inerzia e dagli attriti mentre la pressione nella camera di comando in cui agisce la pressione  $p_{c2}$  è posta pari alla pressione ambiente.

In Figura 71 e Figura 72 sono rappresentati gli andamenti della velocità e dello spostamento del cassetto in funzione del tempo. Dalla Figura 71 si osserva come la velocità cresce per poi arrivare a zero bruscamente, questo avviene nell'istante di tempo in cui il cassetto arriva a fine corsa. Lo spostamento in funzione del tempo è ottenuto come integrazione della velocità.

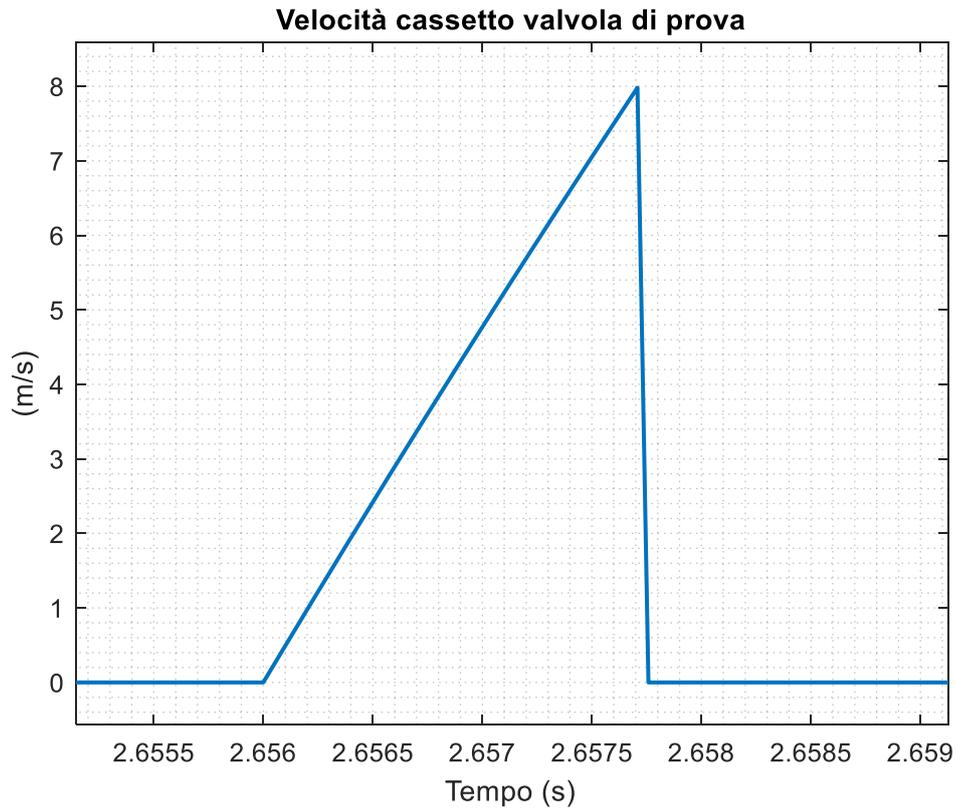


Figura 71: Velocità simulata del cassetto della valvola in prova

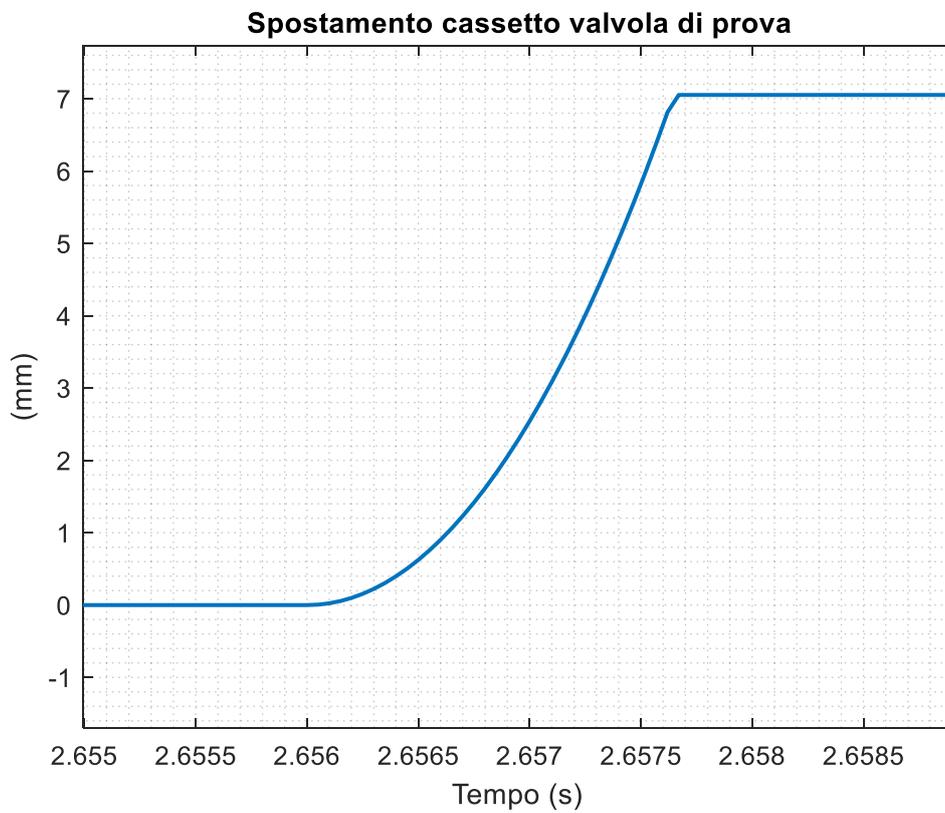


Figura 72: Spollamento simulato del cassetto della valvola in prova

## 6.2 Valutazione della portata

Con lo spostamento del cassetto  $x_v$  si apre l'aria di passaggio per l'uscita dell'aria compressa; quindi, si va a valutare la portata. La portata può essere valutata in funzione della conduttanza  $C$  e del rapporto critico della valvola  $b$ . La formulazione della portata è suddivisa nel tratto sonico e subsonico.

Quando  $r > b$  siamo nel tratto subsonico, quest'ultimo segue la legge:

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

Mentre quando  $r \leq b$  siamo nel tratto sonico:

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

Dove:

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

$b$ : rapporto critico delle pressioni

$C$ : conduttanza della valvola

$p_{in}$ : pressione di alimentazione

$p_{out}$ : pressione in uscita

$T_0$ : temperatura di riferimento pari a 298K

$T_1$ : temperatura aria in ingresso

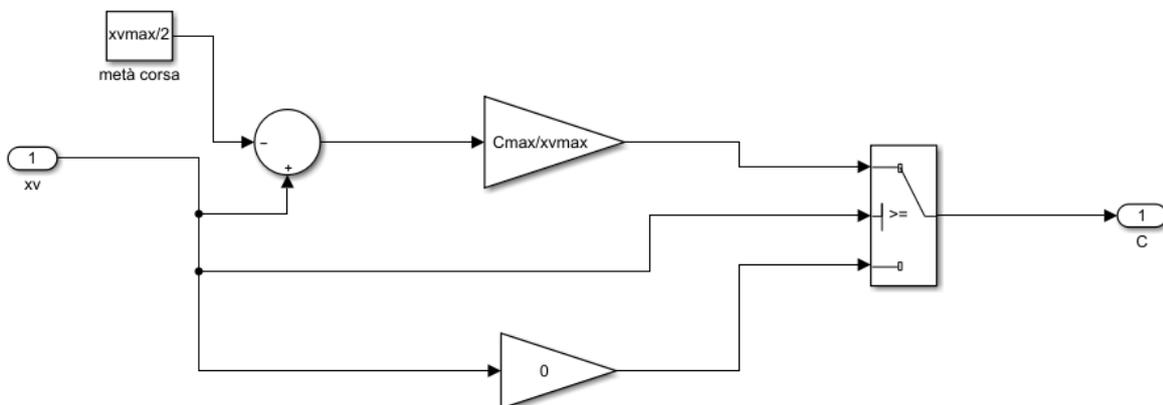


Figura 73: Valutazione conduttanza

In prima approssimazione si può considerare un legame di dipendenza lineare tra la conduttanza e lo spostamento del cassetto. La costante di proporzionalità è il rapporto tra la conduttanza massima della valvola e lo spostamento massimo del cassetto.

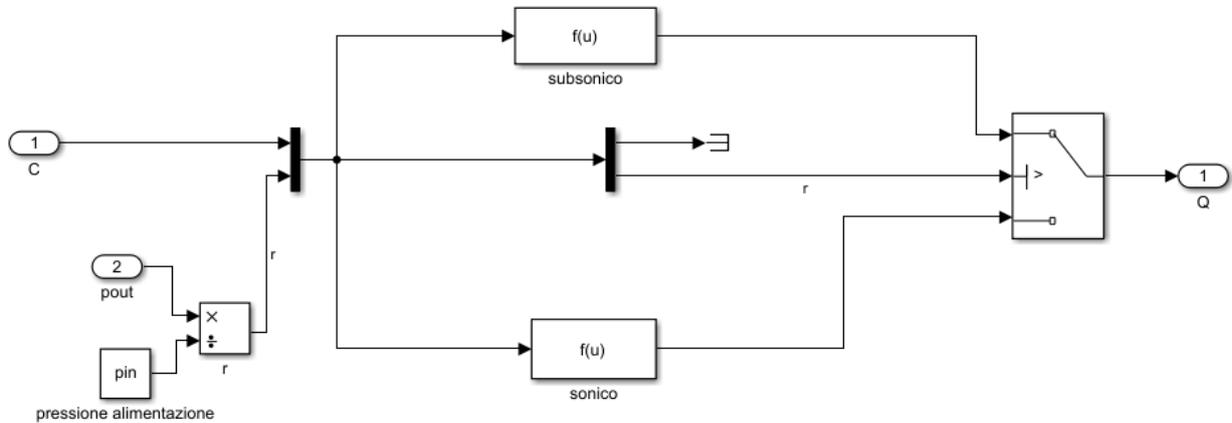


Figura 74: Valutazione della portata

In Figura 74 è riportato il sottosistema in Simulink per la valutazione della portata. In funzione del rapporto delle pressioni  $r$  si attiva il ramo superiore o inferiore. Quando  $r > b$  siamo nel tratto subsonico e quindi la portata è valutata con l'equazione del tratto subsonico descritta precedentemente, mentre nel caso opposto la portata è valutata con l'equazione del tratto sonico presente nel ramo inferiore.

In Figura 75 sono rappresentati i blocchi in linguaggio Simulink per la valutazione della pressione di uscita nel tempo. Per il calcolo della pressione in uscita si considera che il flusso di aria compressa va a riempire il volume interno alla valvola e il tubo di pressione in uscita dalla valvola sul quale è collegato il sensore di pressione.

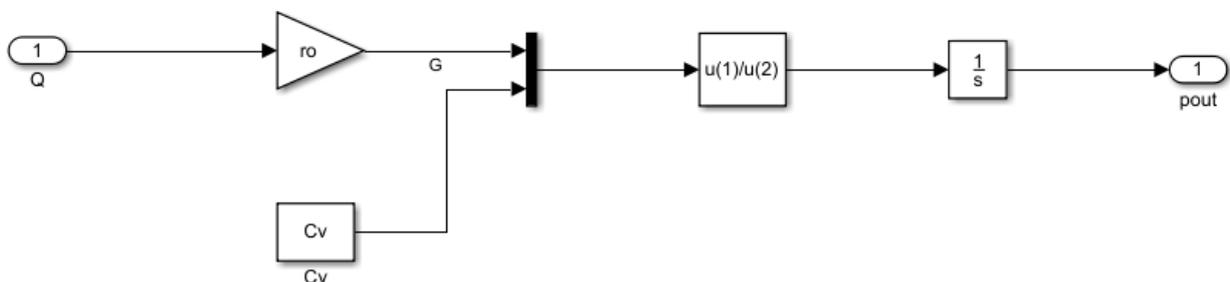


Figura 75: Equazione di continuità

### 6.3 Tempi di risposta valutati con il modello teorico

Nel seguente paragrafo vengono riportati i risultati ottenuti dal modello matematico. In particolare, in Figura 76 sono riportati gli andamenti della pressione di comando di apertura e del segnale di

uscita. In figura 76 si nota come i segnali non presentino overshoot e oscillazione a differenza dei segnali sperimentali. Dall'ingrandimento mostrato in Figura 77 si può valutare il tempo di risposta di attivazione, quest'ultimo si valuta sempre come l'intervallo di tempo che intercorre da quando il segnale di comando raggiunge il 10% del suo valore di regime a quando il segnale di uscita raggiunge il 10% del suo valore di regime. In questo caso il tempo di risposta in apertura è pari a circa 2,7 ms, tempo leggermente maggiore rispetto al tempo calcolato dai segnali sperimentali alla corrispondente pressione di alimentazione che è pari a 2 ms. Gli andamenti ottenuti ricalcano con buona approssimazione gli andamenti ottenuti dalle prove sperimentali e i tempi di risposta sono simili, questo ci da conferma della bontà del modello. Tuttavia per minimizzare l'errore tra curve teoriche e sperimentali si può intervenire sul modello andando a valutare la portata in funzione dell'area delle luci della valvola che vengono scoperte dallo spostamento del cassetto, questo perché la conduttanza varia al variare della luce di passaggio.

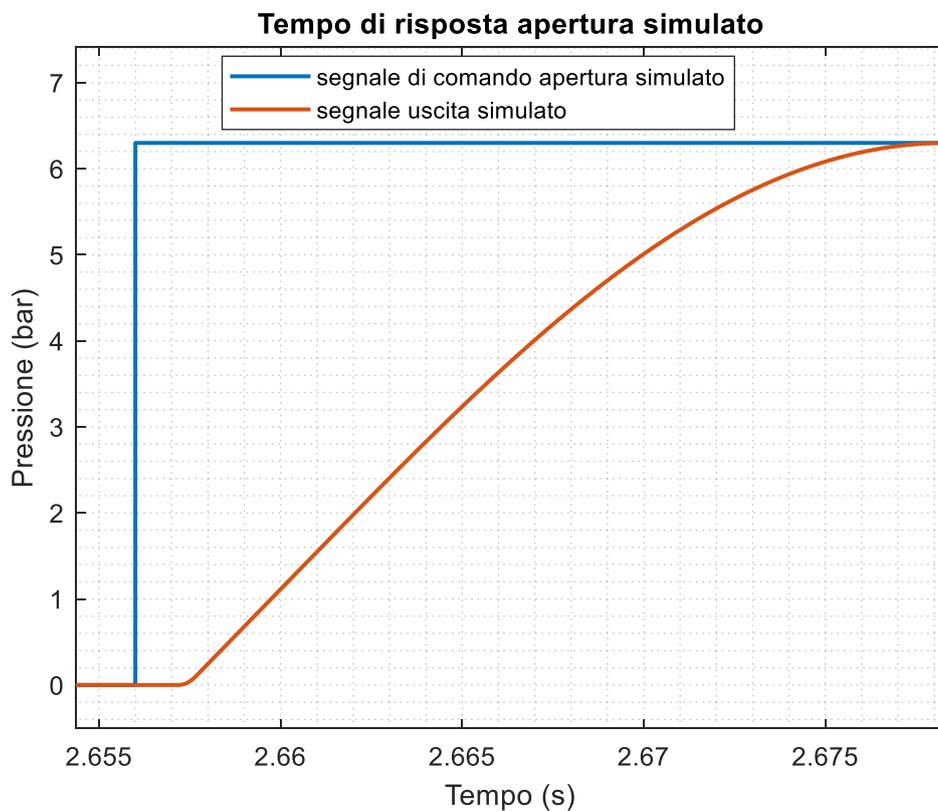


Figura 76: Segnale di comando apertura e segnale di uscita simulati

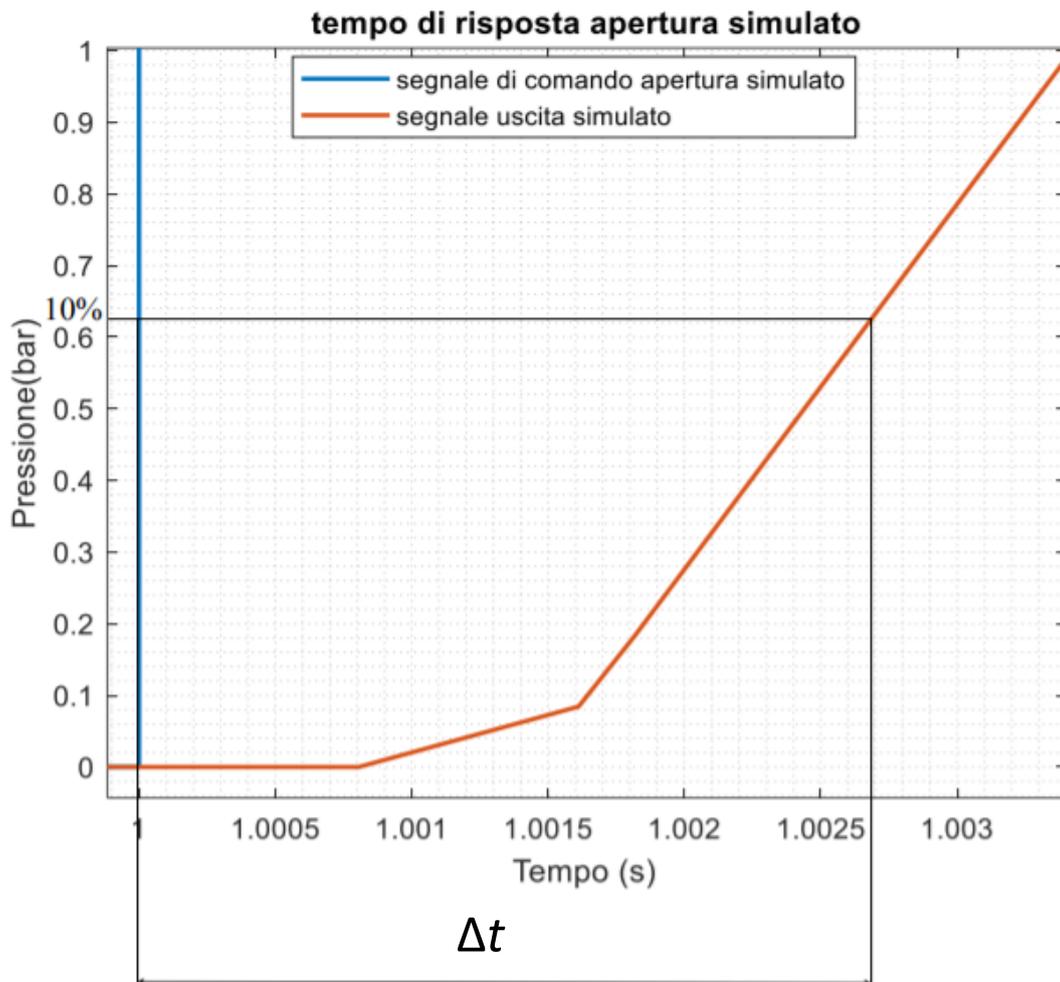


Figura 77: Calcolo tempo di risposta di apertura con segnali simulati

I parametri utilizzati all'interno del modello teorico di attivazione della valvola in prova sono esposti in tabella 10.

Parametri modello	
Grandezza	Valore
m [Kg]	0.017
$p_{c1}$ [bar]	6.3
A [m <sup>2</sup> ]	$1.33 \cdot 10^{-4}$
$x_{vmax}$ [m]	0.007
$p_{in}$ [bar]	6.3
b	0.63
$V_f$ [m <sup>3</sup> ]	$5.13 \cdot 10^{-6}$
R [J/(Kg*K)]	287
$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	12.047
$F_{att}$ [N]	1
$\gamma$ [N*s/m]	1.74

Tabella 10: Parametri utilizzati nel modello della valvola in prova

Dove:

- $m$ : massa cassetto valvola
- $p_{c1}$ : pressione di pilotaggio in apertura
- $p_{in}$ : pressione di alimentazione
- $b$ : rapporto critico valvola
- $V_f$ : volume tubo in uscita
- $R$ : costante dei gas
- $\rho$ : densità aria
- $x_{vmax}$ : spostamento massimo del cassetto
- $F_{att}$ : forza di attrito
- $\gamma$ : coefficiente di attrito viscoso

In Figura 78 sono riportati gli andamenti delle pressioni di comando e delle pressioni di uscita dalla valvola in prova sia teoriche che simulate e si può notare la differenza nel periodo transitorio in quanto gli andamenti teorici non presentano l'overshoot che invece è presente negli andamenti sperimentali in corrispondenza dell'istante di commutazione della valvola. La maggior differenza si ha negli andamenti dei segnali di comando in quanto il segnale di pilotaggio nel modello è stato simulato come un segnale a gradino e quindi non viene considerato il ritardo del segnale di comando. Inoltre il tempo di risposta di attivazione calcolato sugli andamenti teorici è pari a 2,7 ms, mentre il tempo calcolato sui dati sperimentali è pari a 2 ms.

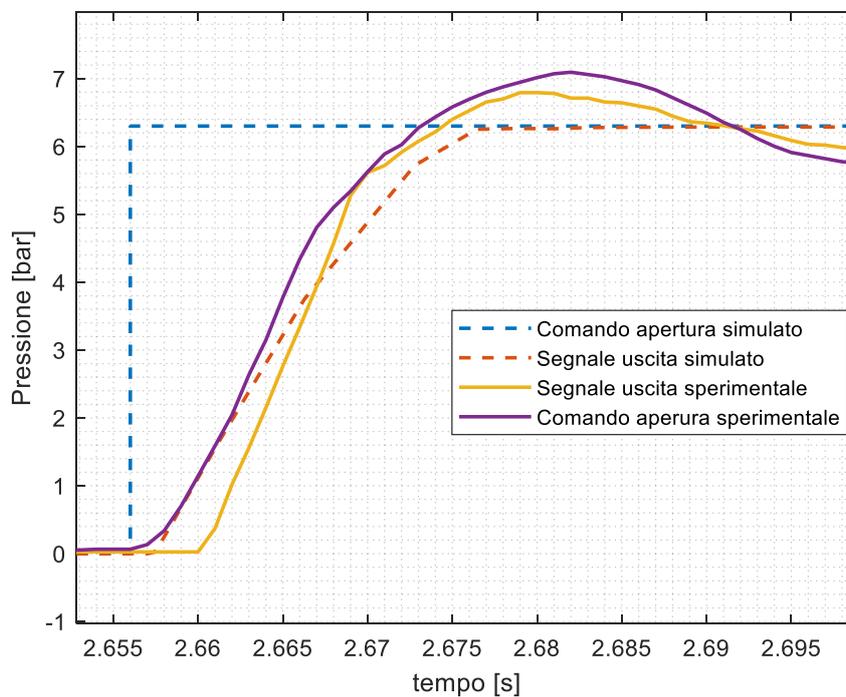


Figura 78: Confronto andamenti teorici e sperimentali

#### 6.4 Analisi parametrica e ottimizzazione dei parametri di attrito

Per far sì che gli andamenti teorici siano il più vicini possibili ai risultati sperimentali si procede con un'ottimizzazione dei parametri di attrito  $F_{att}$  e  $\gamma$ . Tale ottimizzazione è stata effettuata con la funzione di Matlab "fminsearch" che fa variare i parametri  $F_{att}$  e  $\gamma$  per minimizzare la funzione di errore che in questo caso corrisponde alla somma delle differenze tra andamenti sperimentali e teorici. Grazie a tale ottimizzazione si ottengono i seguenti parametri:  $F_{att}=0.189$  N e  $\gamma=0.98$  [N\*s/m], andando a inserire nel modello i valori trovati a seguito dell'ottimizzazione si ottengono gli andamenti presenti in Figura 79. In particolare, dall'ingrandimento presente in Figura 80 è possibile andare a valutare il tempo di risposta di attivazione che corrisponde a 1.9 ms, molto simile al valore del tempo di risposta ottenuto dagli andamenti sperimentali che è pari a 2 ms. Dal confronto presente in Figura 82 si osserva come a seguito dell'ottimizzazione dei parametri gli andamenti sperimentali seguono maggiormente gli andamenti teorici.

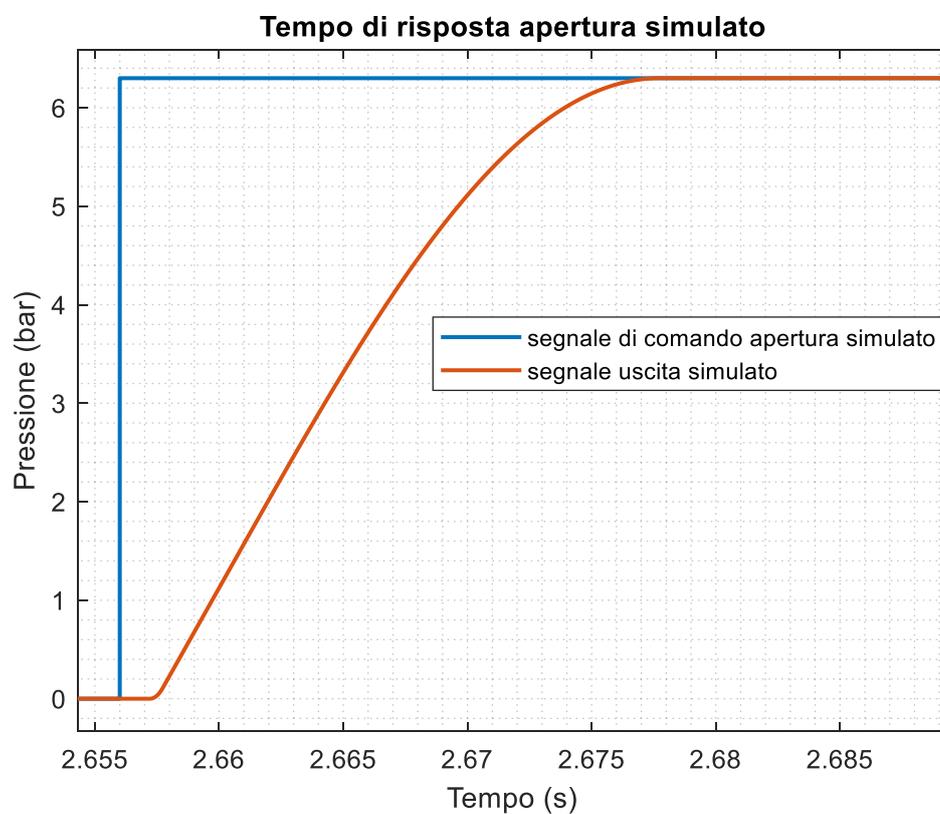


Figura 79: Segnale di comando apertura e segnale di uscita simulati con parametri di attrito ottimizzati

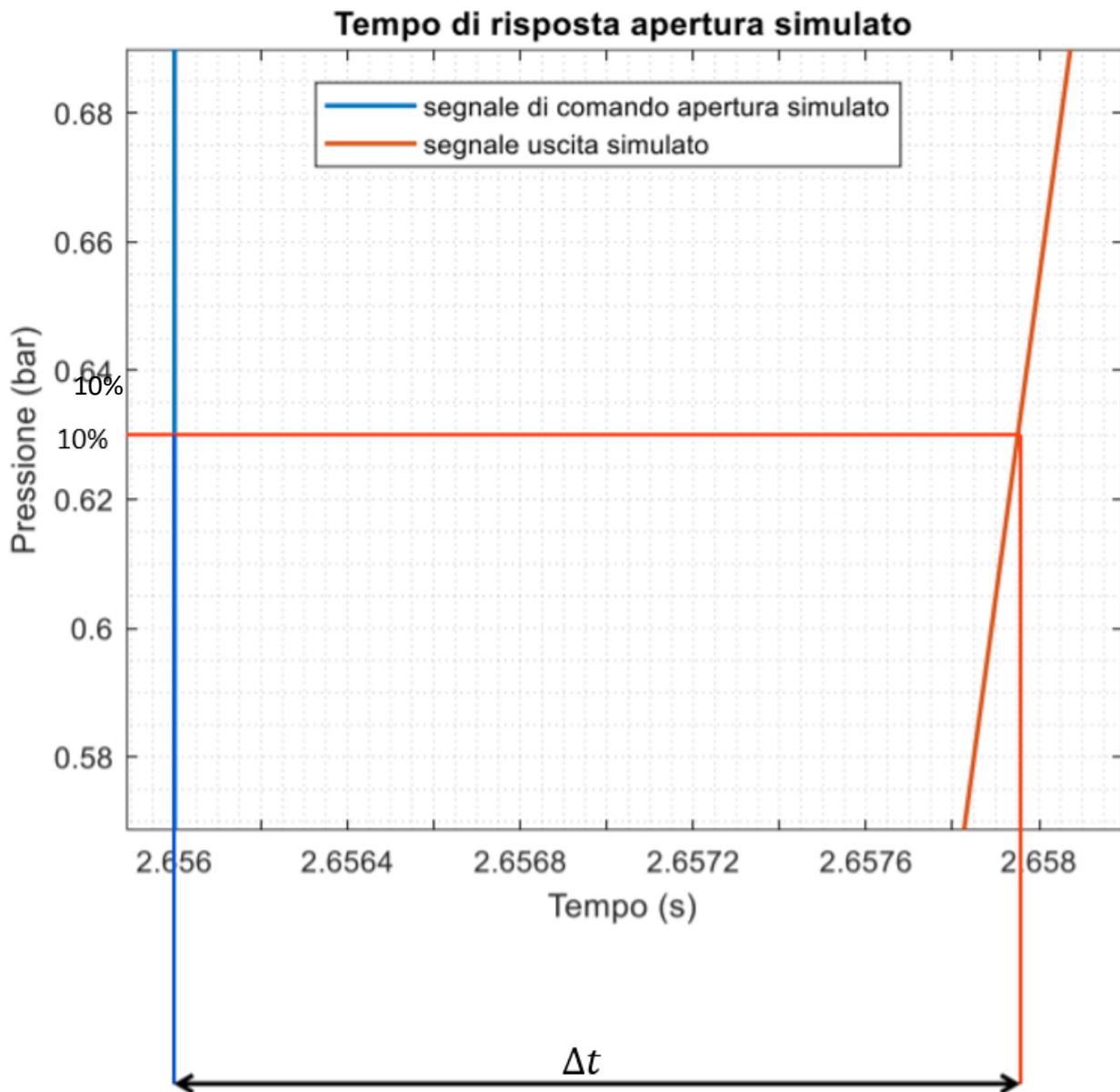


Figura 80: Calcolo tempo di risposta di apertura con segnali simulati

In figura 80 è presente il confronto tra gli andamenti del modello prima e dopo l'ottimizzazione dei parametri di attrito. Il segnale di comando di apertura a gradino è il medesimo, mentre si nota la differenza tra i segnali di uscita, in particolare i tempi di ritardo del segnale di uscita rispetto al segnale di comando alle varie pressioni è inferiore per l'andamento ottenuto dal modello con i parametri di attrito ottimizzati.

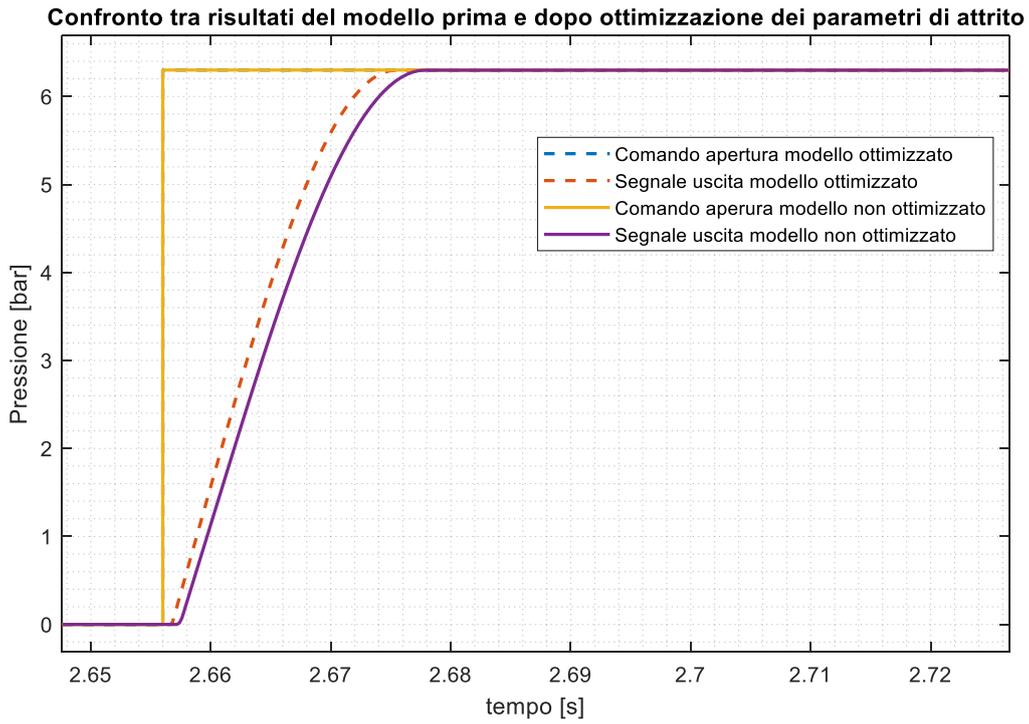


Figura 81: Confronto tra risultati del modello prima e dopo ottimizzazione dei parametri di attrito

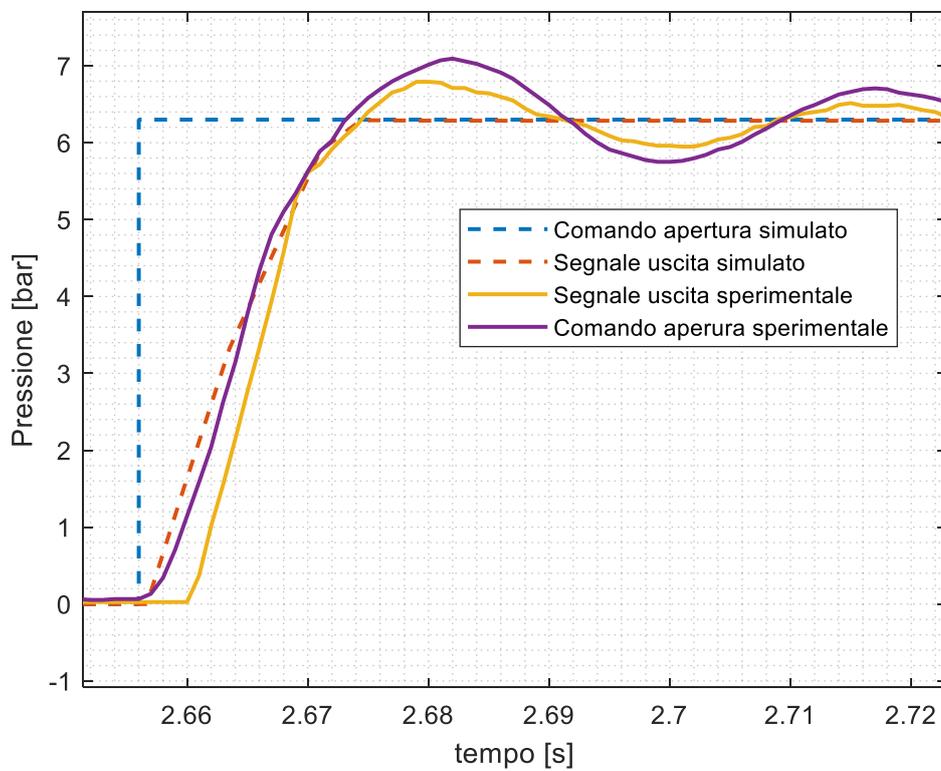


Figura 82: Confronto tra andamenti teorici e sperimentali

In figura 82 è possibile osservare il comportamento dei segnali sperimentali di comando di attivazione e di uscita durante il transitorio. I segnali prima di arrivare a regime oscillano con una frequenza simile pari a circa 28.6 Hz essendo il periodo dell'oscillazione  $T$  pari a 35 ms.

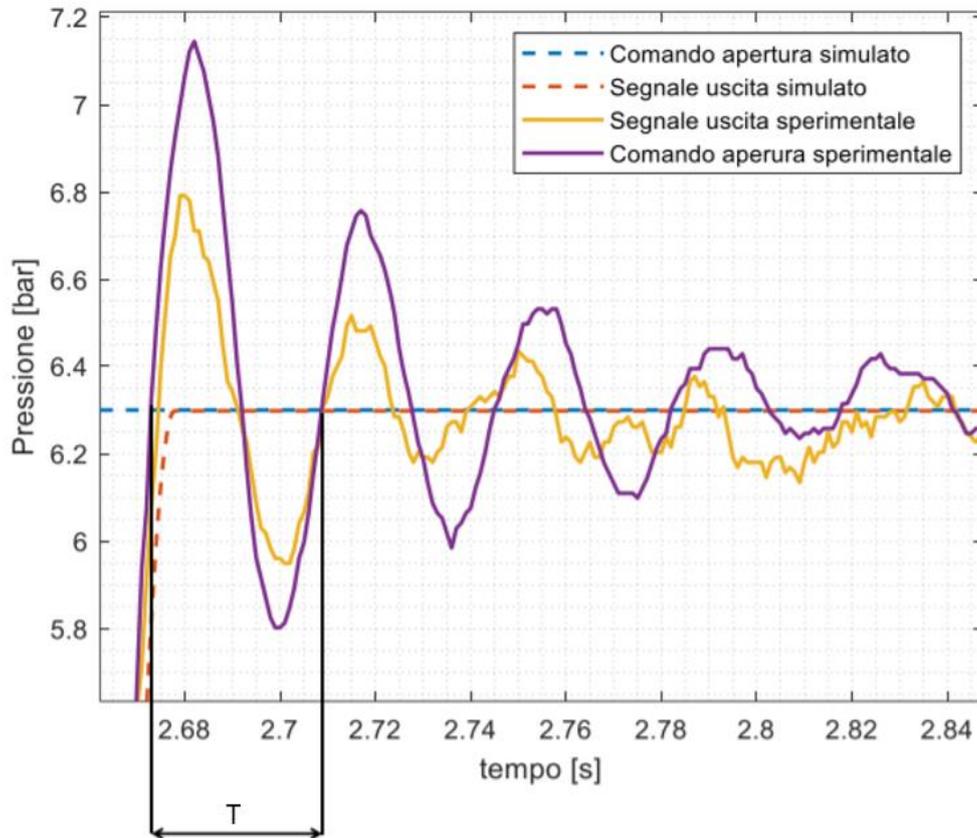


Figura 83: Valutazione del periodo delle oscillazioni durante il transitorio

Confronto tra risultati con parametro di attrito Fatt variabile

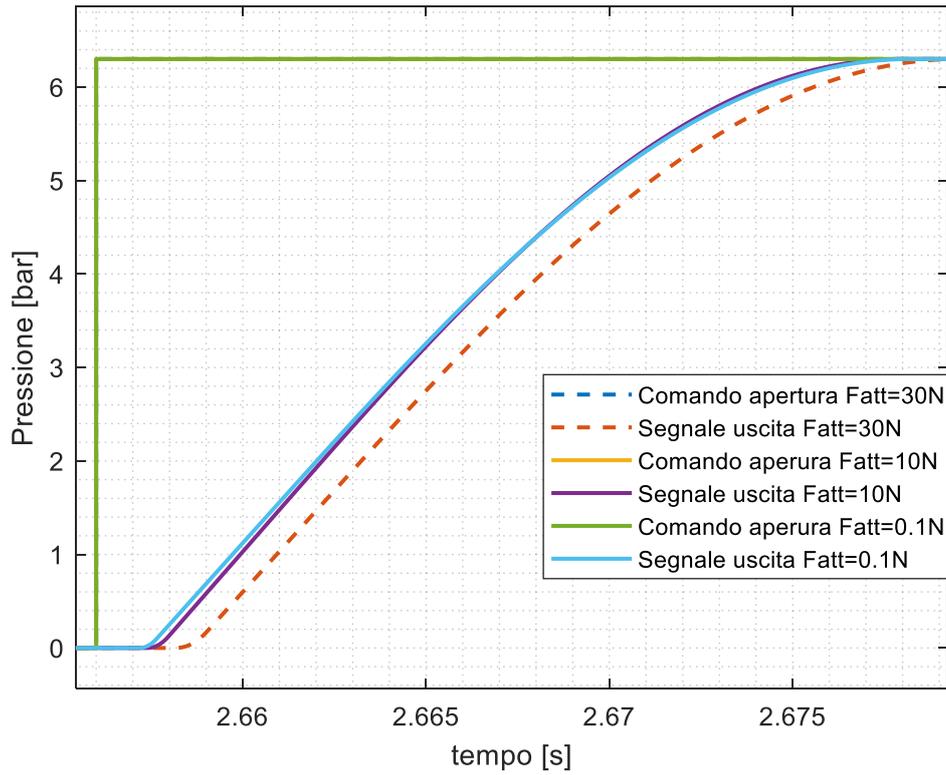


Figura 84: Influenza del parametro Fatt

Confronto tra risultati con parametro di attrito Fatt variabile

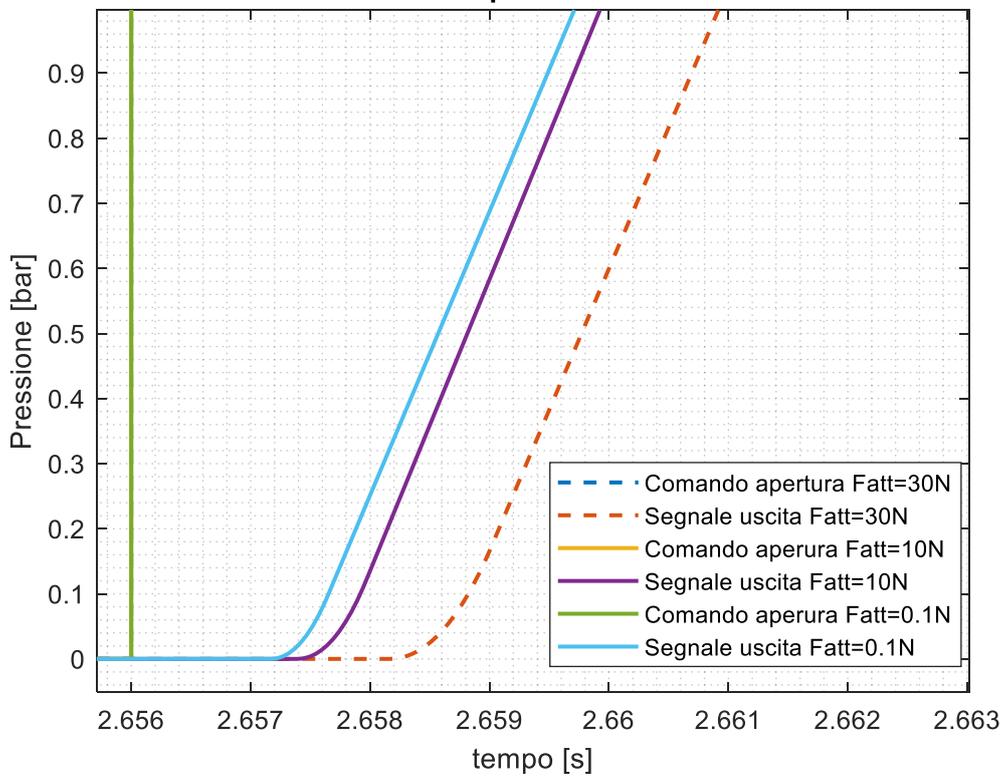


Figura 85: Influenza del parametro Fatt sui tempi di risposta

In Figura 84 sono rappresentati i segnali di comando di attivazione e di uscita simulati al variare del parametro di attrito  $F_{att}$  mantenendo  $\gamma$  costante e pari a  $1.74 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}$ , dove con  $\gamma$  e  $c_{att}$  si indica il coefficiente di attrito viscoso, si può osservare come, all'aumentare di tale parametro, aumenti il ritardo del segnale di uscita rispetto al segnale di comando. Dall'ingrandimento presente in Figura 85 si osserva come aumenta il tempo di risposta di attivazione con l'aumento di  $F_{att}$ , nella tabella sottostante sono riportati i valori del tempo di risposta per i valori di  $F_{att}$  pari a 0.1 N, 10 N e 30 N.

Tempo di risposta modello con $F_{att}$ variabile	
$F_{att}$ [N]	$t_{on}$ [ms]
0.1	2.9
10	3.2
30	4

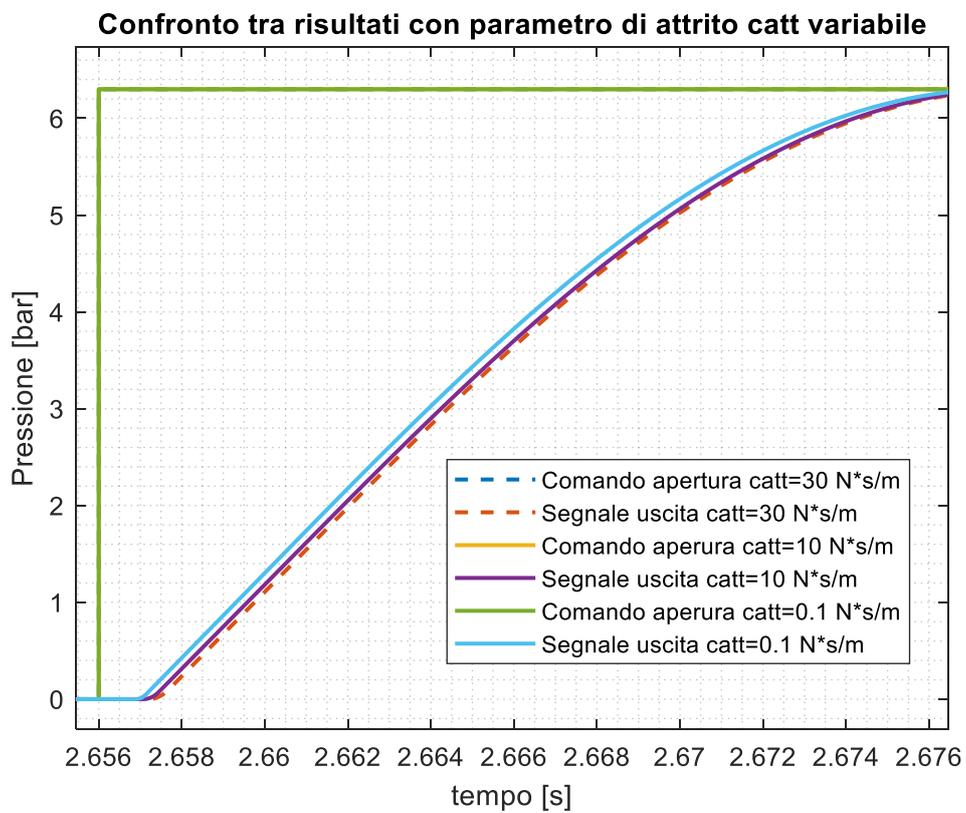
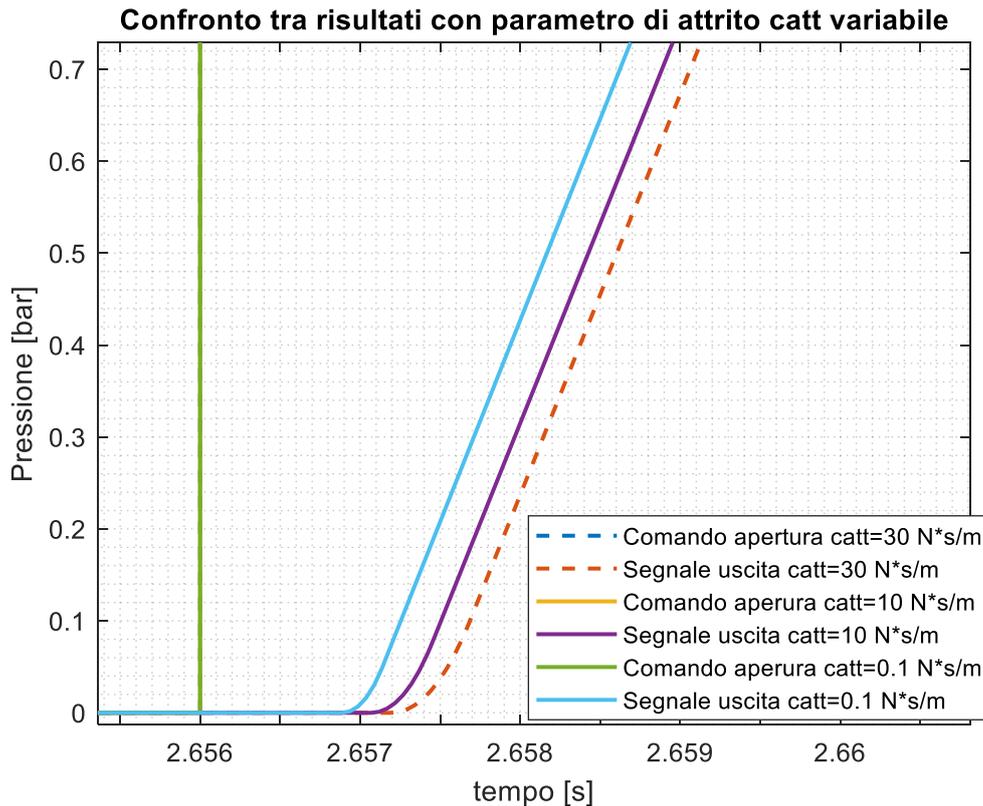


Figura 86: Influenza del parametro  $c_{att}$



*Figura 87: Influenza del parametro catt sui tempi di risposta*

In figura 86 sono rappresentati i segnali di comando di attivazione e di uscita simulati al variare del parametro di attrito  $\gamma$  mantenendo  $F_{att}$  costante e pari a 1 N, si può osservare come, all'aumentare di tale parametro, aumenti il ritardo del segnale di uscita rispetto al segnale di comando. Dall'ingrandimento presente in Figura 87 si osserva come aumenta il tempo di risposta di attivazione con l'aumento di  $\gamma$  nella tabella sottostante sono riportati i valori del tempo di risposta per i valori di  $\gamma$  pari a 0.1 N\*s/m, 10 N\*s/m e 30 N\*s/m.

Tempo di risposta con $\gamma$ variabile	
$\gamma$ [N*s/m]	ton [ms]
0.1	2.5
10	2.9
30	3.1

D'analisi effettuata è chiaro come all'aumentare dei parametri di attrito aumentino i tempi di risposta, questo avviene poiché la forza di attrito si oppone al moto e quindi serve una forza di comando maggiore per far muovere il cassetto e aprire la luce di passaggio dell'aria compressa. Si può osservare che a seguito dell'aumento del parametro  $F_{att}$  si ha un notevole incremento del tempo di risposta, confrontando i grafici 86 e 84 si nota come il parametro  $F_{att}$  abbia maggiore influenza rispetto a  $\gamma$ .

Con i parametri trovati a seguito dell'ottimizzazione si va a valutare il comportamento del modello con pressioni di alimentazioni inferiori a 6.3 bar. In particolare, in Figura 88 è rappresentato il confronto tra segnali di comando e di uscita sperimentali e simulati con pressione di alimentazione pari a 2.3 bar. Dal grafico presente in Figura 89 è possibile identificare il tempo di risposta di attivazione calcolato sui segnali ottenuti dalla simulazione e si ottiene un tempo di risposta pari a 4 ms mentre il tempo di risposta calcolato sui segnali sperimentali alla stessa pressione è pari a circa 6.6 ms.

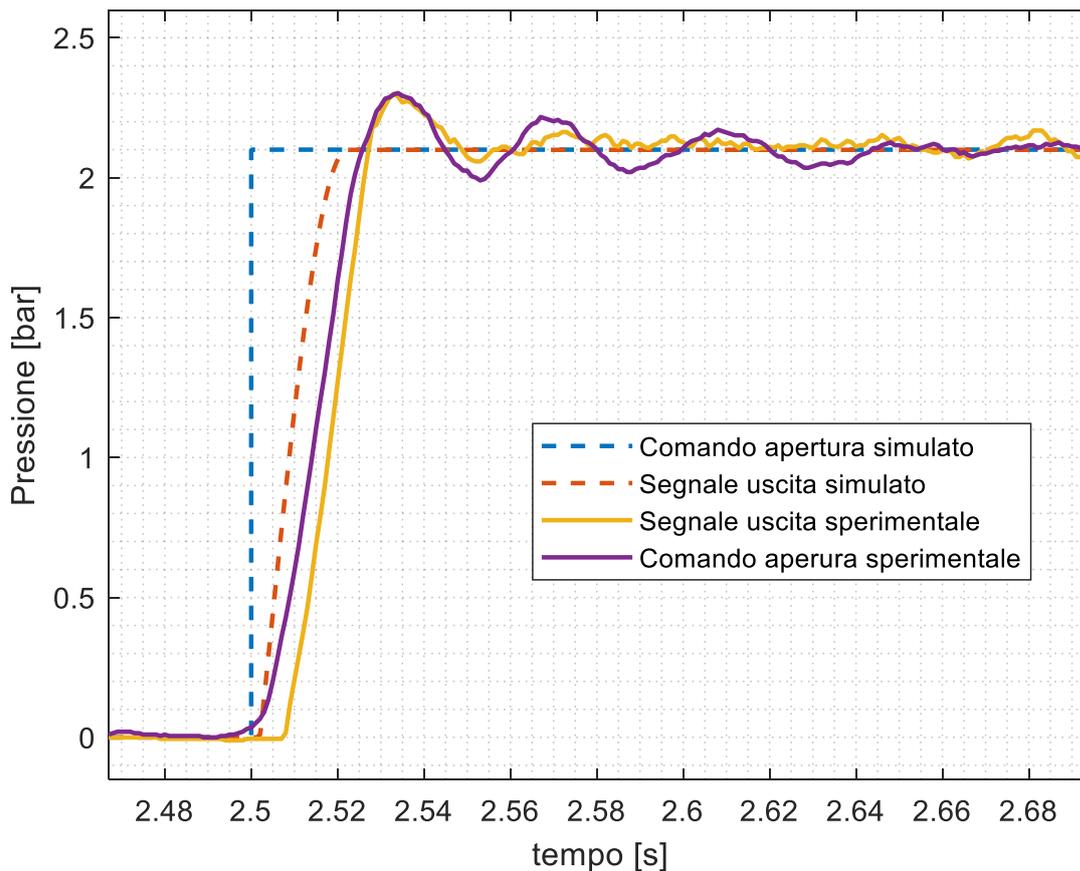


Figura 88: Segnali simulati e sperimentali con pressione di alimentazione pari a 2.2 bar

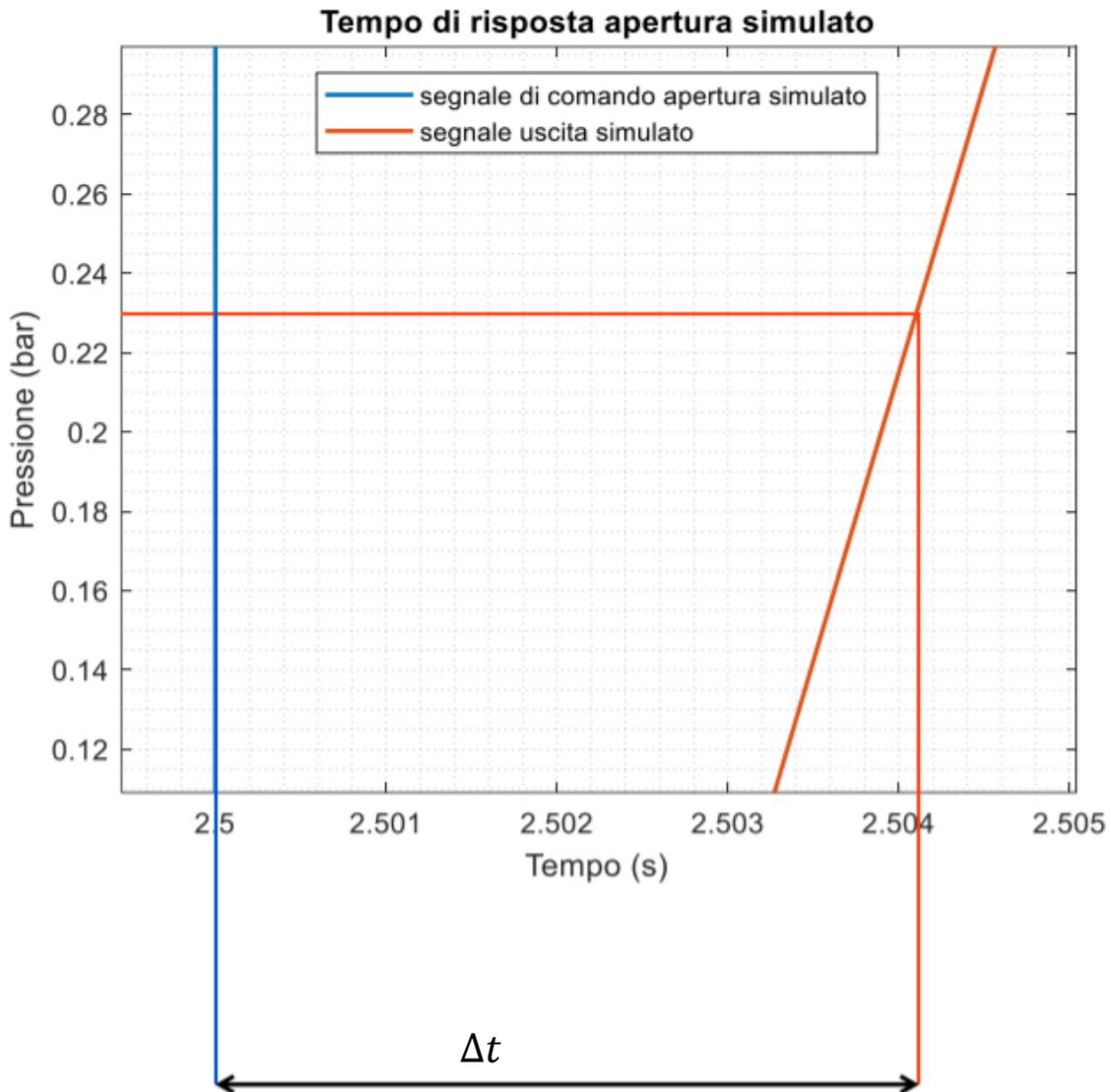


Figura 89: Calcolo tempo di risposta di attivazione con segnali simulati e pressione di alimentazione pari a 2.3 bar

### 6.5 Modello di disattivazione

Nel seguente paragrafo viene descritto il modello matematico che simula la disattivazione della valvola in prova. In Figura 90 sono rappresentati i blocchi che compongono il modello di disattivazione, in input si ha la pressione di comando  $p_{c2}$  che è simulata da un gradino, come per il modello di attivazione, è composto da 4 sottosistemi che descrivono rispettivamente l'equilibrio sul cassetto, il calcolo della conduttanza, il calcolo di portata e infine l'equazione di continuità. La pressione in uscita dalla valvola non va subito a zero con l'applicazione del gradino ma questo avviene con un certo ritardo dovuto dal volume da svuotare, dalla resistenza del raccordo e del tubo e dal fatto che la forza  $F$  dovuta alla pressione di comando aumenta fino a vincere le forze di aderenza per far muovere il cassetto. L'equazione di equilibrio sulla parte mobile della valvola è il seguente:

$$(p_{c2} - p_{c1}) A - \gamma \dot{x}_v - F_{attr} - m \ddot{x}_v = 0$$

In Figura 91 è possibile osservare il sotto blocco Simulink che rappresenta l'equazione di equilibrio sul cassetto. A differenza del modello di attivazione in questo caso i versi delle forze di attrito e della forza d'inerzia sono opposti al vettore spostamento posto come positivo da sinistra verso destra nel grafico di Figura 69, questo perché lo spostamento è opposto. Nei grafici seguenti vengono esplicitati i sotto blocchi presenti nel modello, a differenza del primo modello in questo caso si ha una portata negativa di svuotamento e la pressione parte dal valore della pressione di regime posto a 6.3 bar fino ad arrivare a 0 bar.

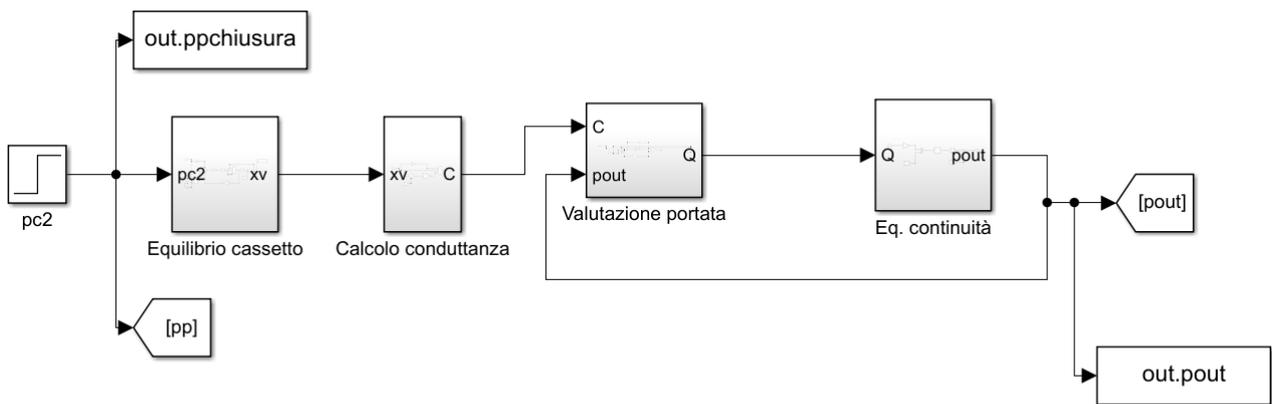


Figura 90: Modello Simulink disattivazione

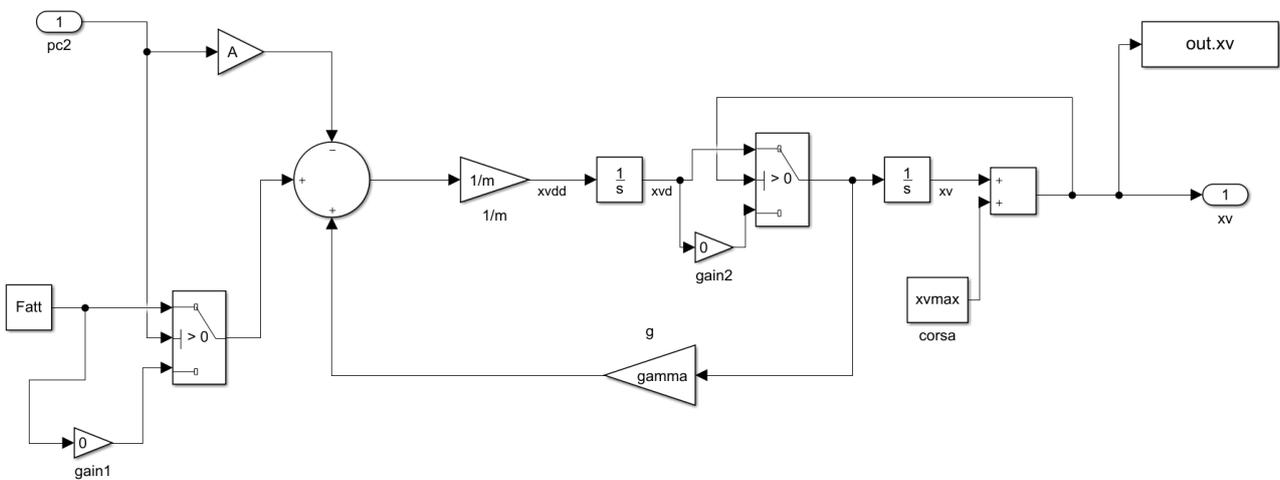


Figura 91: Blocco Simulink equilibrio cassetto

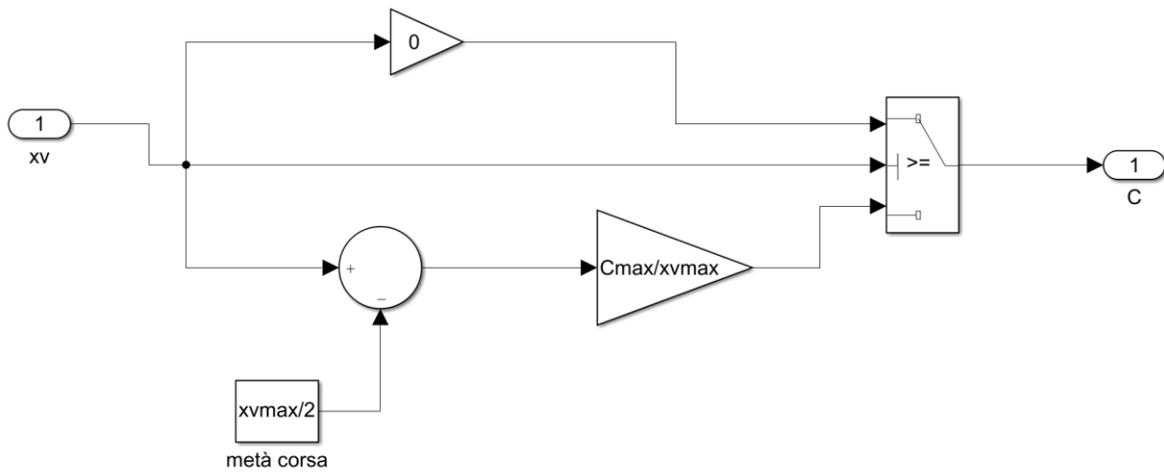


Figura 92: Calcolo conduttanza

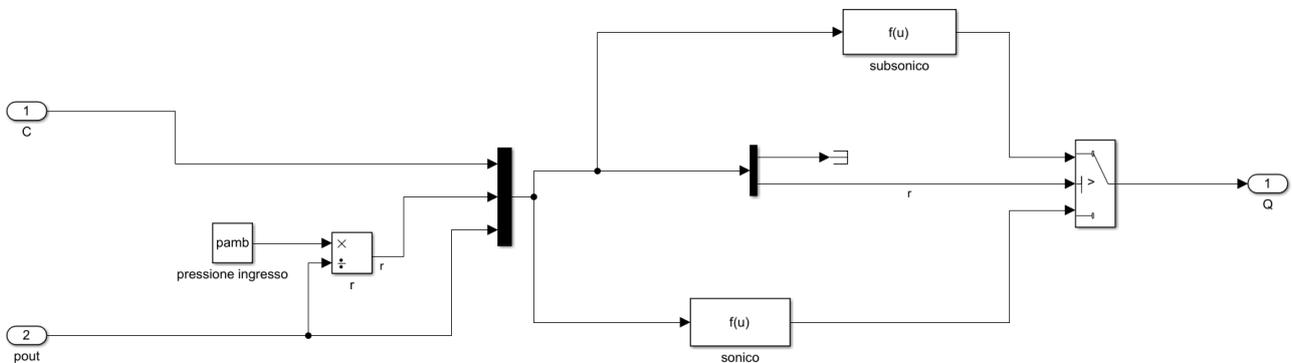


Figura 93: Calcolo portata

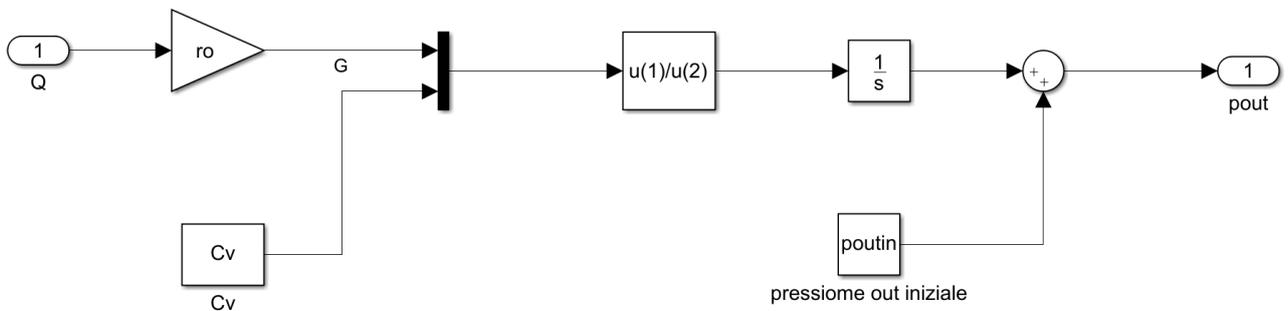


Figura 94: Equazione di continuità

In Figura 95 sono riportati gli andamenti simulati del segnale di comando e del segnale di uscita ottenuti dal modello teorico implementato, dai quali è possibile valutare il tempo di risposta di disattivazione, come tempo che intercorre dall'istante di tempo in cui il segnale di comando raggiunge il 10% del suo valore di regime e l'istante di tempo in cui il segnale di uscita raggiunge il 90% del suo segnale di regime, in questo caso il tempo di risposta calcolato dai segnali teorici è pari a 2.3 ms. In Figura 96 sono rappresentati i segnali di comando di disattivazione e i relativi segnali di pressione in uscita simulati e sperimentali. Dagli andamenti si nota la differenza nel transitorio tra andamenti teorici e sperimentali, il segnale della pressione di comando misurato sperimentalmente

presenta un overshoot nell'istante di commutazione del cassetto e successivamente tende al valore di regime dopo alcune oscillazioni.

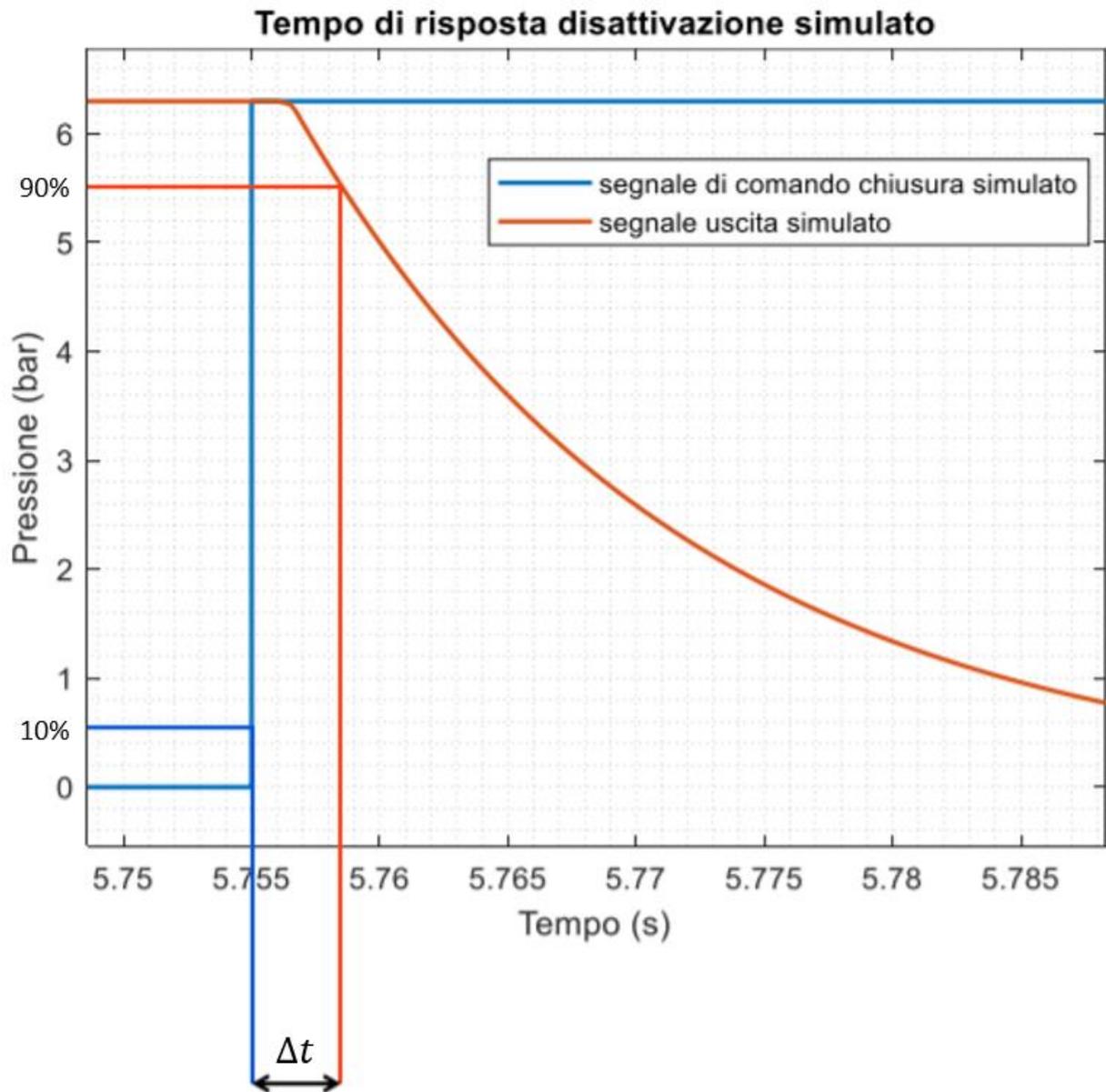
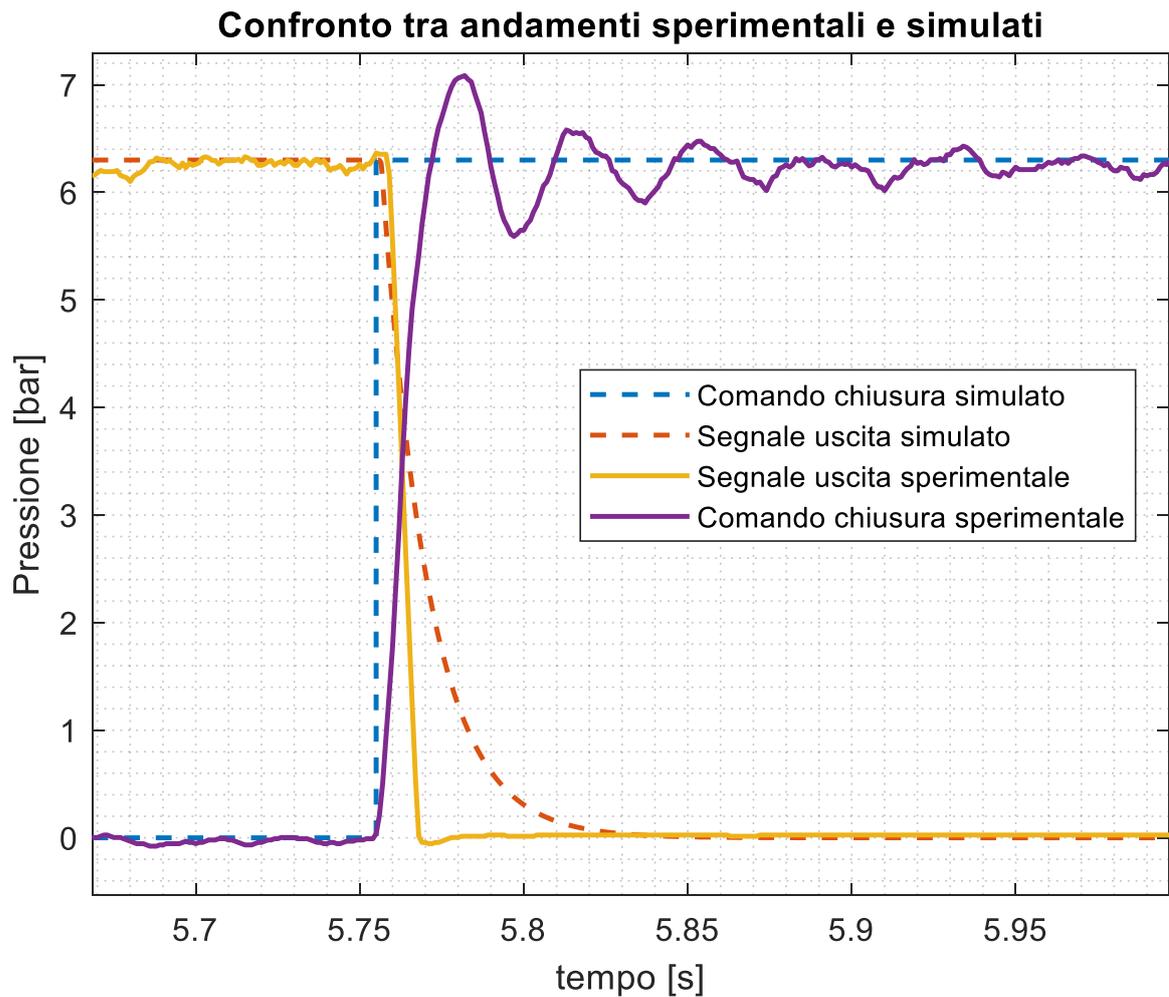


Figura 95: Tempo di risposta di disattivazione con segnali simulati



*Figura 96: Confronto tra andamenti teorici e sperimentali*

In Figura 97 è possibile osservare il comportamento del segnale di comando di chiusura durante il transitorio. Il segnale prima di arrivare a regime oscilla con una frequenza pari a circa 26.32 Hz essendo il periodo dell'oscillazione  $T$  pari a circa 38 ms. Inoltre, è possibile stimare il valore della sovralongazione massima indicata in figura con  $s$  che è pari a 0.84 bar.

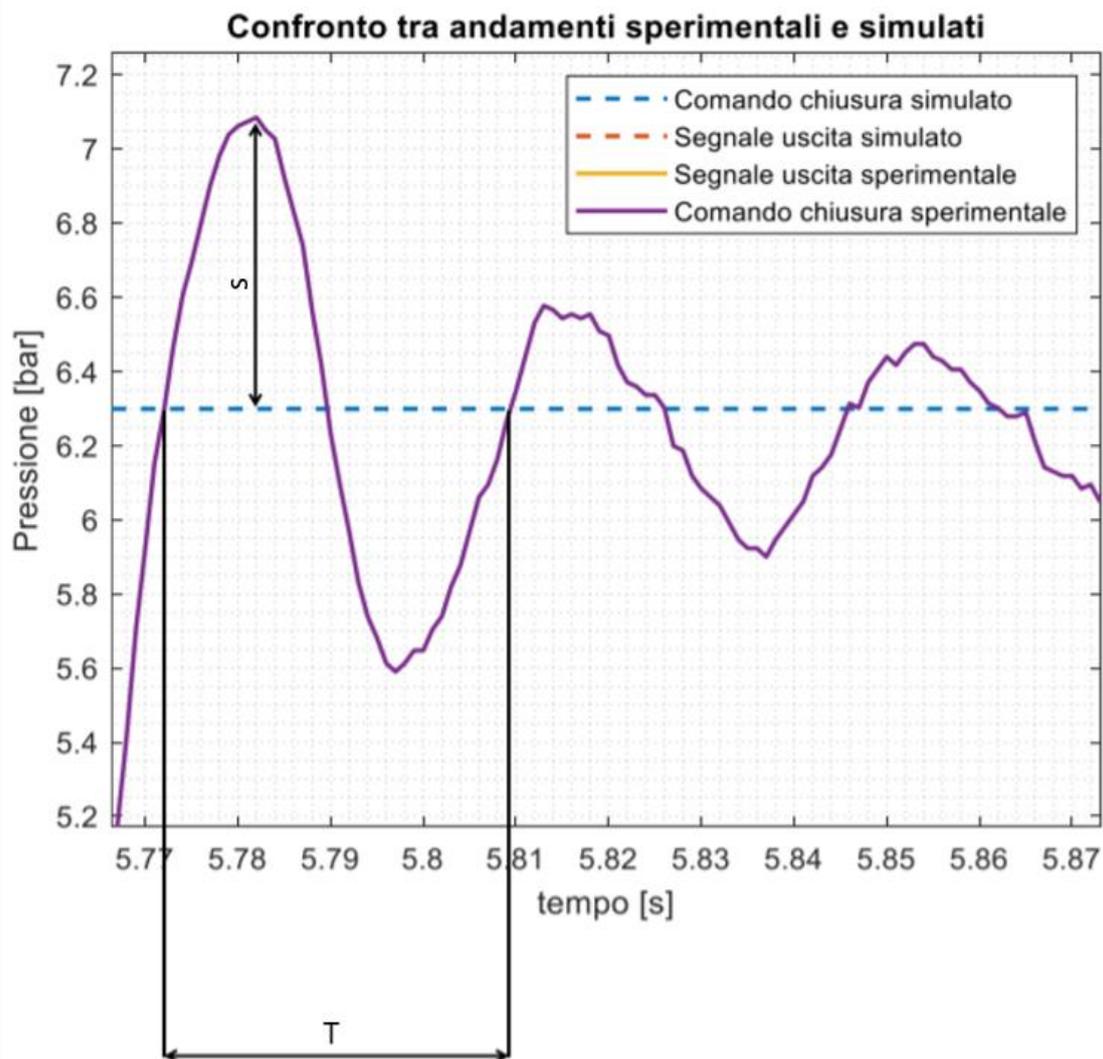


Figura 97: Valutazione del periodo delle oscillazioni e della sovra elongazione massima del segnale di comando di disattivazione sperimentale durante il transitorio

## 6.6 Modello matematico con non linearità

Nel seguente paragrafo è stata valutata come varia l'apertura della luce di passaggio dell'aria compressa in funzione dello spostamento del cassetto, si vanno quindi ad inserire aspetti non lineari nel modello. In particolare, a differenza del precedente modello non viene più considerata la conduttanza come funzione lineare dello spostamento del cassetto.

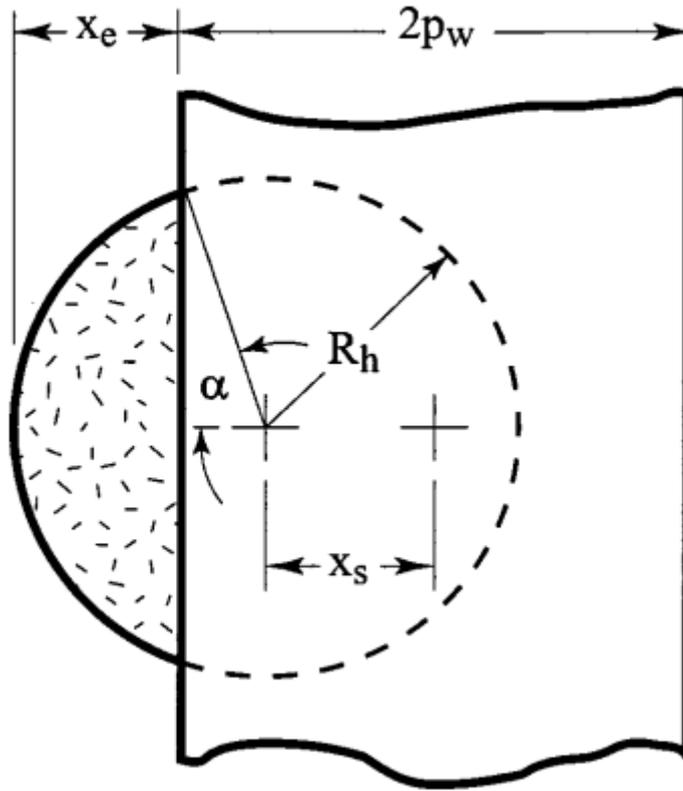


Figura 98: Area di passaggio in funzione della posizione del cassetto. [7]

L'area effettiva scoperta con lo spostamento del cassetto può essere valutata con la seguente espressione:

$$A_v = 2 \int_0^{x_e} \sqrt{R_h^2 - (\xi - R_h)^2} d\xi = 2 \int_0^{x_e} \sqrt{\xi(2R_h - \xi)} d\xi$$

Dove  $A_v$  è l'effettiva area di passaggio,  $x_e$  rappresenta lo spostamento del cassetto e  $R_h$  è il raggio della luce di passaggio.

$$A_v = 2R_h^2 \arctan\left(\frac{x_e}{\sqrt{2R_h - x_e}}\right) - (R_h - x_e)\sqrt{x_e(2R_h - x_e)}$$

Le equazioni per il calcolo del flusso in massa attraverso la luce di passaggio  $A_v$  sono le seguenti [6]:

$$\dot{m} = \frac{C_f A_v C_1 P_{in}}{\sqrt{T}} \quad \text{se } r \leq b$$

$$\dot{m} = \frac{C_f A_v C_2 P_{in}}{\sqrt{T}} r^{1/k} \sqrt{1 - r^{(k-1)/k}} \quad \text{se } r > b$$

Dove  $\dot{m}$  è la portata massica attraverso la luce della valvola,  $C_f$  è un coefficiente di scarico non dimensionale,  $P_{in}$  è la pressione di monte, mentre  $C_1$  e  $C_2$  sono state stimate secondo le seguenti

relazioni e sono costanti per un dato fluido, in particolare per l'aria in prima approssimazione  $C_1 = 0.040418$  mentre  $C_2 = 0.156174$  con  $k = 1.4$  [8].

$$C_1 = \sqrt{\frac{k}{R} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{k+1/k-1}}$$

$$C_2 = \sqrt{\frac{2k}{R(k-1)}}$$

Le precedenti equazioni sono state implementate nel modello precedentemente realizzato.

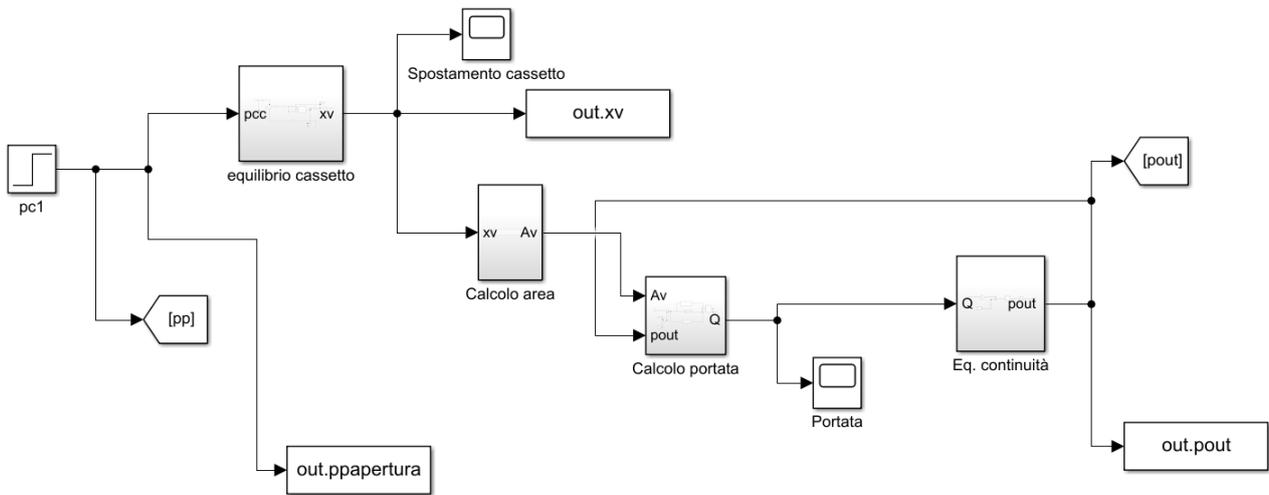


Figura 99: Modello matematico con non linearità

Nel nuovo modello in particolare cambia il calcolo dell'area di passaggio dell'aria compressa e il calcolo della portata.

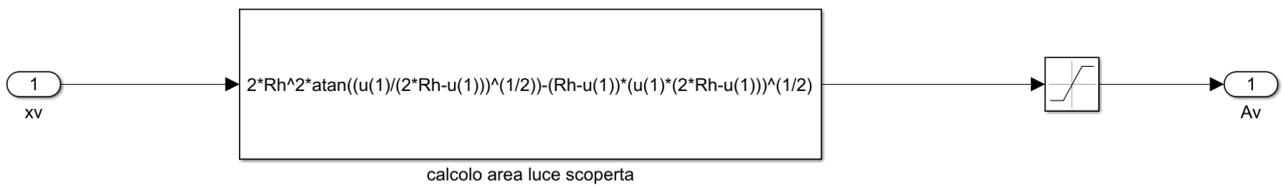
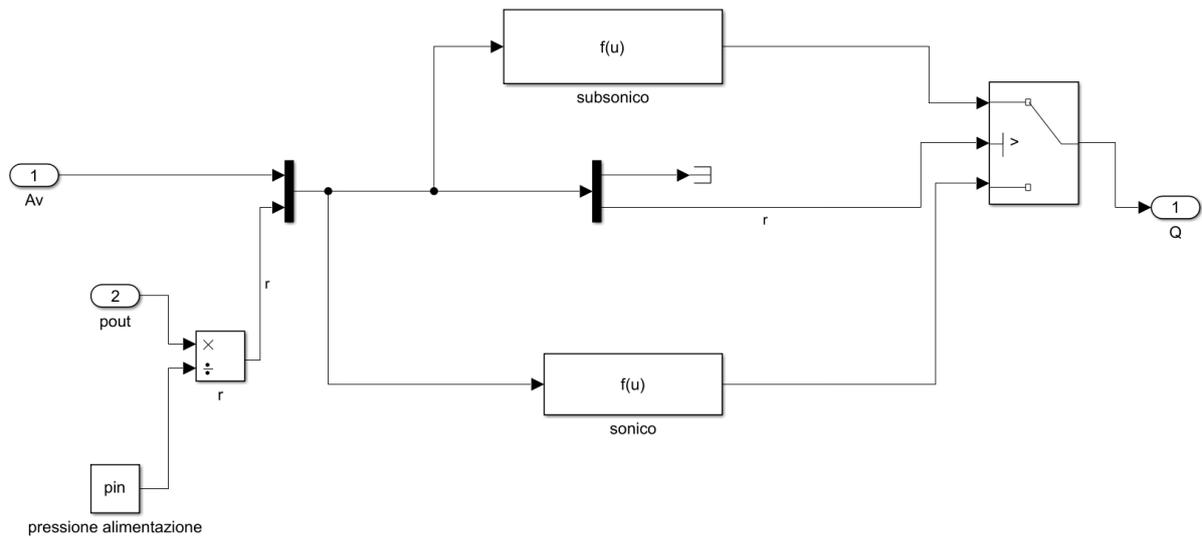


Figura 100: Valutazione area di passaggio



*Figura 101: Valutazione portata*

I parametri utilizzati nel modello sono gli stessi di quelli inseriti nel modello precedente, tranne che per i parametri di attrito. Anche in questo caso tramite una procedura di fitting con i dati sperimentali utilizzando la funzione di matlab `fminsearch` otteniamo una forza di attrito pari  $F_{att} = 8.62 \text{ N}$  e un coefficiente di attrito viscoso  $\gamma = 0.129 \text{ N} \cdot \frac{\text{s}}{\text{m}}$ . In Figura 102 sono rappresentati gli andamenti del segnale di pilotaggio a gradito e della pressione in uscita ottenuta dal modello matematico implementato, con l'ingrandimento di Figura 103 è possibile valutare il tempo di risposta in attivazione che è pari a 1.95 ms.

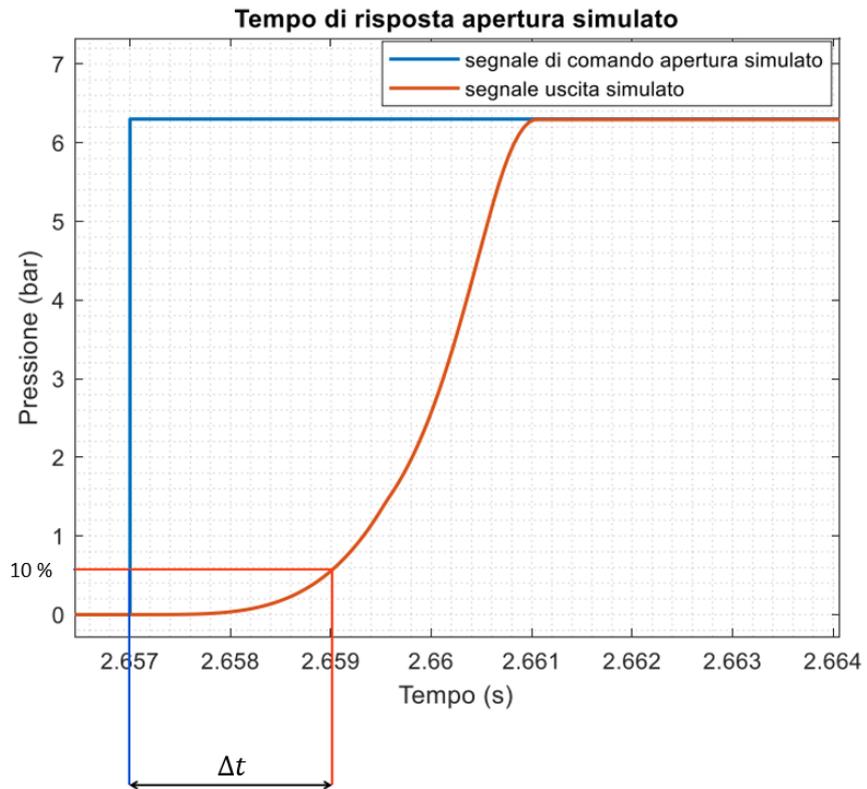


Figura 102: Andamenti segnale di comando attivazione e segnale di uscita con modello con non linearità

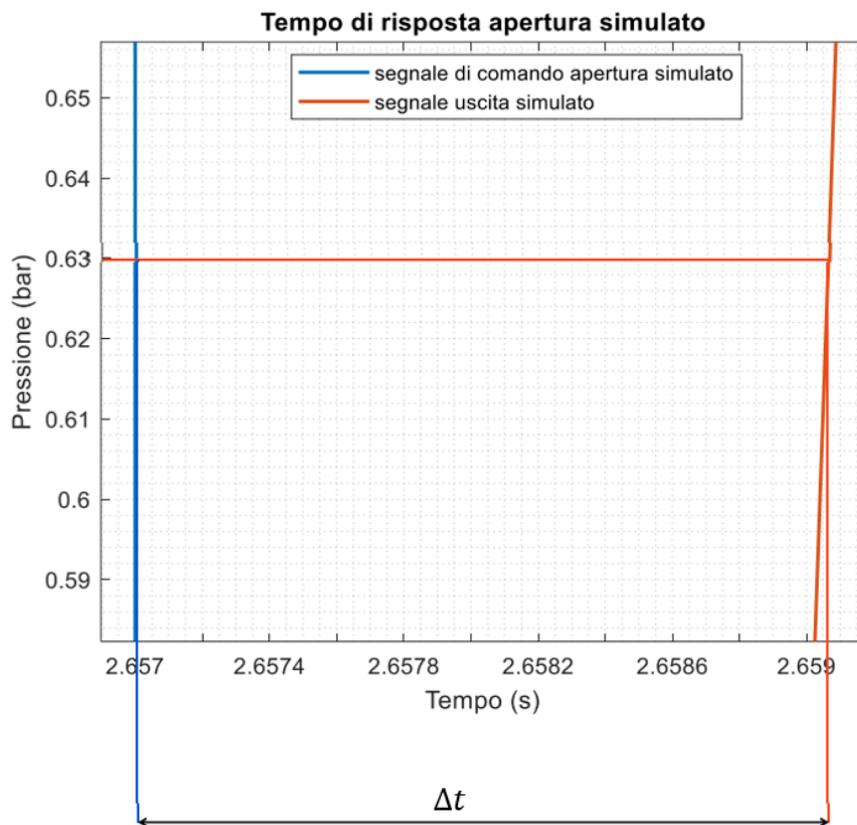


Figura 103: Calcolo tempo di risposta di attivazione

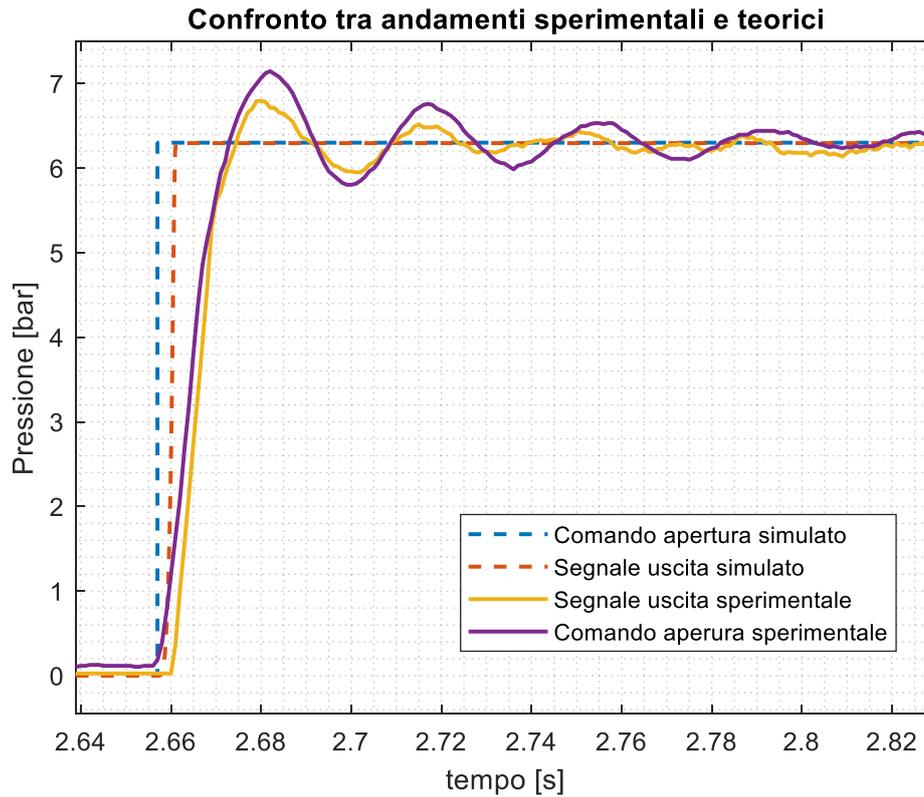


Figura 104: Confronto tra andamenti sperimentali e simulati

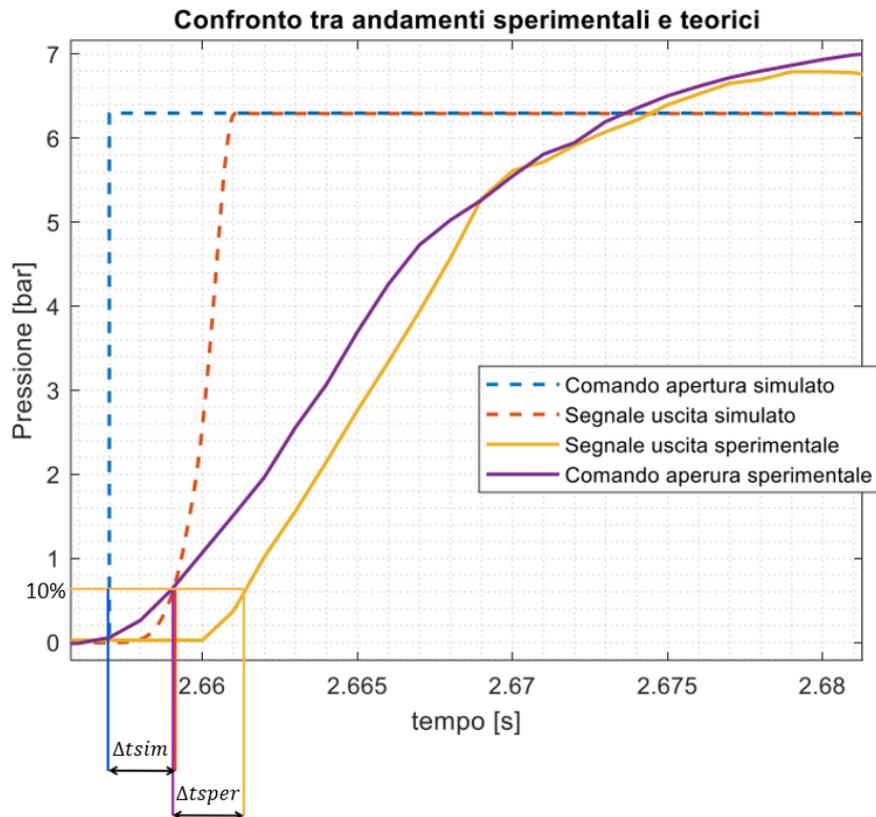


Figura 105: Confronto tra andamenti sperimentali e simulati, valutazione tempi di risposta attivazione

Dal confronto tra gli andamenti simulati e sperimentali è possibile osservare come il tempo di risposta di attivazione è molto simile. La principale differenza è nel fatto che il segnale di comando simulato è rappresentato da un segnale a gradino e non tiene conto dei precedenti fenomeni che inducono il ritardo. Anche in questo caso nei segnali del modello non sono presenti le sovraelongazioni presenti invece nei segnali sperimentali.

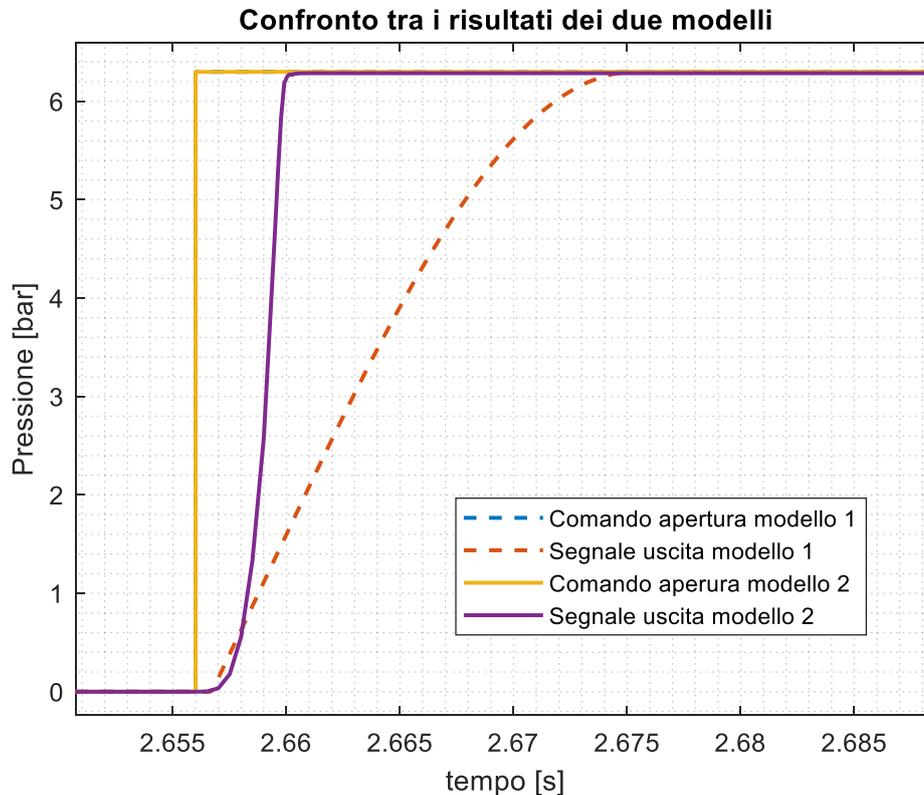


Figura 106: Confronto tra andamenti simulati dei due modelli implementati

Dagli andamenti presenti in Figura 106 è possibile fare un confronto tra i risultati ottenuti dai due modelli implementati. Il segnale di comando per entrambi i modelli è simulato dal medesimo segnale a gradino. Possiamo notare come il segnale di pressione di uscita del primo modello, che non considera aspetti non lineari, raggiunge il regime dopo 20 ms. Mentre il segnale di pressione di uscita del secondo modello raggiunge il regime molto più velocemente, in circa 5 ms. Andando a confrontare i valori dei ritardi temporali del segnale di uscita rispetto al segnale di comando, ai vari livelli di pressione, si può notare come il secondo modello implementato, che considera aspetti non lineari nella valutazione della portata, ha degli andamenti più simili ai risultati sperimentali.

## 7. Conclusioni

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

Dopo la progettazione, la scelta dei componenti e la taratura dei sensori è stato realizzato il banco prova seguendo le normative ISO 12238 e ISO 6358. Successivamente sono state eseguite 20 prove sperimentali con una pressione di alimentazione pari a 6.3 bar e con una frequenza di campionamento pari a 2 KHz per ottenere i segnali di pressione di comando di apertura di chiusura e il segnale di uscita per il calcolo dei tempi di risposta. Nelle 20 prove effettuate si trovano dei tempi

di risposta simili. In particolare, il tempo di attivazione è pari a circa 2 ms mentre il tempo di disattivazione è di circa 1.95 ms. I tempi di attivazione e disattivazione sono simili in accordo con la simmetria della valvola. Poiché i valori di deviazione standard, varianza e COV sono molto bassi si può affermare che i risultati ottenuti sono validi e tutte le prove sono state eseguite correttamente. Particolare attenzione è stata fatta sulla valutazione della pressione misurata a monte della valvola in prova, dagli andamenti misurati si può osservare come, a seguito dell'introduzione del serbatoio nel banco, questa risulti molto più stabile e rimane nel range del 3% della pressione di regime come prescritto da normativa. Successivamente sono state effettuate delle prove con pressione di monte variabile per comprendere il comportamento del banco a diversi livelli di pressione, in particolare dai risultati ottenuti si osserva come i tempi di risposta aumentano al diminuire della pressione di alimentazione. Infine si è cercato di realizzare un modello che, nel modo più accurato possibile, rappresentasse la dinamica delle valvole in prova. Gli andamenti ottenuti dalla simulazione ricalcano con buona approssimazione gli andamenti dalle prove sperimentali e i tempi di risposta sono simili. In particolare il tempo di risposta di attivazione, ottenuto dalla simulazione dell'ultimo modello implementato con i parametri di attrito ottimizzati e che considera non linearità nella valutazione della conduttanza, è pari a 1.95 ms che ha una variazione rispetto al tempo di risposta di attivazione calcolato sperimentalmente di 2 ms, pari a 2.5%. Il tempo di risposta di disattivazione ottenuto sugli andamenti simulati è pari a 2.3 ms e la sua variazione rispetto al tempo misurato sugli andamenti sperimentali di 1.95 ms, è pari a 17.9 %.

Per minimizzare l'errore tra curve teoriche e sperimentali si può intervenire sul modello di attrito. Il modello di attrito, considerato in questo lavoro per descrivere l'equilibrio del cassetto, è stato semplificato.

In uno studio futuro, si possono quindi fare delle considerazioni su un modello di attrito maggiormente esaustivo, come il modello di attrito di Stribeck, in questo modo si può considerare la dipendenza della forza di attrito dalla velocità di strisciamento, andando così ad ottenere un modello sempre più simile al comportamento reale.

Inoltre, lo studio ha evidenziato come ulteriori miglioramenti si possono effettuare sul banco di prova affinché esso possa essere utilizzato per scopi industriali. In particolare, si può aumentare la sezione dei tubi pneumatici per migliorare l'efflusso dell'aria compressa e diminuire le perdite di carico. Cambiando la disposizione del banco è inoltre possibile avvicinare il più possibile il serbatoio al tubo ISO per la misura della pressione posto a monte della valvola in prova, per ottenere una pressione di monte maggiormente stabilizzata. A valle delle prove sperimentali si è notato come sensori del tipo piezoelettrici possano essere più adatti all'applicazione perché con prestazioni dinamiche superiori. L'utilizzo di tali sensori, invece di quelli utilizzati nel presente lavoro di tesi, ovvero sensori di tipo piezoresistivo, può essere studiato in futuri approfondimenti.

Nonostante le migliorie che si possono apportare, i risultati sperimentali sono attendibili, essi corrispondono ai risultati ottenuti dalla simulazione e la sperimentazione è stata effettuata molte volte ottenendo sempre il medesimo risultato.

## Bibliografia

- [1] G. Belforte, Manuale di pneumatica, Tecniche Nuove, 2019.
- [2] G. Belforte, A. Manuello Bertetto, L. Mazza, Pneumatica corso completo, Tecniche Nuove, Milano, 1998.
- [3] ISO, BS ISO 12238 Pneumatic fluid power - Directional control valves - Measurement of shifting time, 2001.
- [4] ISO, BS ISO 6358-1 Pneumatic fluid power - Determination of the flow rate characteristic of components using compressible fluids, 2013.
- [5] E. Filippi, Studio e progettazione di un banco per la misura dei tempi di risposta di valvole pneumatiche.
- [6] Ben-Dov, D., and Salcudean, S. E., 1995, "A Force-Controlled Pneumatic Actuator" IEEE Trans. Rob. Autom., 11, No. 6, pp. 906–911.
- [7] E. Richer, Y. Hurmuzlu, 2000, A High Performance Pneumatic Force Actuator System: Part I— Nonlinear Mathematical Model.