



Politecnico di Torino

Corso di Laurea
A.a. 2025/2026
Sessione di Laurea Luglio 2026

**Sistema integrato per la misura della
portata d'aria secondo ISO 5167:
dimensionamento del banco prova e
sviluppo del sistema di acquisizione in
MATLAB**

Relatori:

Andrea Trivella
Luigi Mazza
Terenziano Raparelli

Candidato:

Luigi Sansò

Sommario

Indice dei listati.....	4
Indice dei codici.....	5
Indice delle figure.....	6
Introduzione.....	9
Stato dell'arte.....	11
Metodi di misura di portata	11
Misura della portata tramite differenza di pressione	13
Dispositivi a strozzamento	15
Normativa ISO 5167.....	19
Catena di misura e acquisizione dei dati	22
Banco prova automatizzato sviluppato secondo la normativa ISO: il caso del Politecnico di Torino	25
Dimensionamento	29
Obiettivo del dimensionamento.....	29
Configurazione generale del banco	29
Definizione del campo operativo e scelta della valvola in prova	32
Differenza di pressione ai capi del dispositivo primario	38
Scelta della geometria del diaframma	41
Prese di pressione e gruppo flange - diaframma.....	44
Lunghezze rettilinee e condizionatore di flusso	45
Tratti rettilinei a monte ed a valle della valvola in prova	48
Verifica della lunghezza complessiva del banco	48
Conclusione del dimensionamento.....	54
Sviluppo dello script MATLAB.....	56
Obiettivo dello script	56
Architettura generale del programma	57
Interfacciamento MATLAB–scheda National Instruments.....	61
Acquisizione e conversione dei segnali.....	63
Implementazione del calcolo della portata	66
Visualizzazione e salvataggio dati.....	71
Validazione e controlli	72
Prove sperimentali	74
Obiettivo delle prove sperimentali	74
Organizzazione delle prove preliminari	74

Trasduttori di pressione utilizzati	75
Verifica preliminare dei trasduttori	76
Prima prova preliminare	77
Verifica del trasduttore differenziale	80
Verifica del trasduttore a monte del diaframma	83
Seconda prova preliminare	84
Collegamento tra il trasduttore di pressione a monte della valvola in prova e la scheda di acquisizione	85
Collegamento tra il trasduttore a valle della valvola in prova e la scheda di acquisizione	88
Collegamento tra trasduttore differenziale e la scheda di acquisizione	89
Collegamento tra trasduttore di monte del diaframma e la scheda di acquisizione.....	91
Banco prova utilizzato	94
Nuova configurazione del banco prova	95
Esecuzione della prova finale	96
Analisi sperimentali	99
Organizzazione delle prove sperimentali	99
Verifica preliminare dei dati acquisiti	99
Analisi della ripetibilità e confronto tra andata e ritorno.....	100
Analisi dei coefficienti caratteristici della valvola	103
Curva caratteristica normalizzata	106
Limiti dell'analisi sperimentale	107
Valutazione complessiva dei risultati	107
Conclusioni e sviluppi futuri.....	109
Conclusioni.....	109
Limiti del lavoro	109
Sviluppi futuri.....	110
Appendice A: Codice sorgente MATLAB	111
Bibliografia	176

Indice dei listati

Listato 1 - Main prova portata	111
Listato 2 - Portata orifizio.....	122
Listato 3 - Main sizing beta	125
Listato 4 - Sizing beta orifizio	127
Listato 5 - Main sizing dp.....	131
Listato 6 - Sizing dp orifizio.....	133
Listato 7 - Check limiti orifizio	136
Listato 8 - Test collegamenti NI	138
Listato 9 - Acquisisci punto equilibrio	140
Listato 10 - Volt to pressure.....	143
Listato 11 - Verifica punto di stabilità.....	145
Listato 12 - Regola pressione di monte	147
Listato 13 - Pressure to voltage MPPE.....	148
Listato 14 - Re pipe.....	149
Listato 15 - Epsilon orifizio	150
Listato 16 - C orifizio	151
Listato 17 - C orifizio flange	152
Listato 18 - C orifizio corner	153
Listato 19 - C orifizio D-D/2	154
Listato 20 – Post - Processing.....	155

Indice dei codici

Codice 1 - Inizializzazione della scheda NI USB-6002.....	62
Codice 2 - Mappa dei canali	63
Codice 3 - Acquisizione della finestra temporale e conversione dei segnali	64
Codice 4 - Criterio di stabilità del punto.....	65
Codice 5 - Calcolo del coefficiente di espansione	67
Codice 6 - Schema di iniziazione del calcolo iterativo del numero di Reynolds.....	69
Codice 7 - Schema iterativo per il calcolo del numero di Reynolds.....	70
Codice 8 - Calcolo finale di portata massica e volumetrica.....	71
Codice 9 - Limiti previsti dalla portata	71
Codice 10 - Aggiornamento delle grandezze visualizzate	72

Indice delle figure

Figura 1 - Statistiche relative all'impiego degli strumenti di misurazione della portata. [4]	11
Figura 2 - Schema principio fisico e posizione orifizio [6]	13
Figura 3 - Andamento della pressione in presenza di un orifizio [8]	15
Figura 4 - Dispositivi a strozzamento [3]	15
Figura 5 - Andamento del flusso attraverso la piastra con orifizio [10]	16
Figura 6 - Andamento delle perdite di carico permanente in funzione del diametro di ostruzione per diversi tipi di strozzamento [3]	18
Figura 7 - Campo vettoriale delle velocità che attraversa un orifizio [11]	18
Figura 8 - Andamento del coefficiente di efflusso [3]	21
Figura 9 - Schema della catena di misura	23
Figura 10 – Confronto tra campionamento insufficiente ed adeguato	24
Figura 11 – Conversione analogico-digitale grossolana	25
Figura 12 - Schema funzionale del banco prova automatizzato sviluppato presso il Politecnico di Torino [14]	26
Figura 13 – Banco prova: sezione di monte [14]	27
Figura 14 - Banco prova: sezione di valle [14]	27
Figura 15 – Schema pneumatico generale del banco prova	30
Figura 16 - Schema funzionale semplificato del banco	31
Figura 17 - Lista dei componenti del banco prova	32
Figura 18 - Propagazione del Turndown	36
Figura 19 - Caratteristiche della valvola 1/4"	38
Figura 20 - Sistema in analisi	39
Figura 21 - Riepilogo caratteristiche valvola 1/4"	41
Figura 22 - Confronto tra valvola da 1/4" e 1/8"	41
Figura 23 - Geometria della piastra con orifizio secondo ISO 5167-2 [8]	42
Figura 24 - Effetto del parametro β sulla pressione differenziale	43
Figura 25 – Schema prese di pressione ricavate sulla flangia	44
Figura 26 - Geometria del condizionatore di flusso Zanker [8]	46
Figura 27 - Configurazione della sezione ISO	47
Figura 28 - Scelte progettuali monte e valle della valvola in prova	48
Figura 29 - Schema costruttivo semplificato di un raccordo rapido CAMLOCK [20]	50
Figura 30 – Confronto tra i raccordi di monte del tratto ISO	51

Figura 31 - Schema preliminare a blocchi del banco	52
Figura 32 - Insieme dei singoli componenti e relative lunghezze	53
Figura 33 - Sintesi principali scelte progettuali	54
Figura 34 -File MATLAB relativi allo script principale e alle funzioni di dimensionamento	58
Figura 35 – Flow chart generale della procedura di prova (1)	60
Figura 36 - Flow chart generale della procedura di prova (2)	61
Figura 37 - Grandezze utilizzate nella procedura iterativa di calcolo della portata [8]	67
Figura 38 - Diagramma di flusso del calcolo iterativo	68
Figura 39 - Controlli automatici implementati nello script MATLAB	73
Figura 40 - Proprietà dei trasduttori	75
Figura 41 - Trasduttori	76
Figura 42 – Circuito pneumatico prima prova del trasduttore di monte della valvola	78
Figura 43 - Valori di pressione e tensione acquisiti durante la caratterizzazione del trasduttore.	79
Figura 44 - Andamento della tensione in uscita in funzione della pressione di riferimento e relativa regressione lineare.	79
Figura 45 – Schema circuito pneumatico per trasduttore differenziale	80
Figura 46 – Circuito prova trasduttore differenziale	81
Figura 47 – Valori di pressione e tensione acquisiti durante la caratterizzazione del trasduttore.	82
Figura 48 - Andamento della tensione in uscita in funzione della pressione di riferimento e relativa regressione lineare.	82
Figura 49 - Circuito pneumatico prova sul trasduttore di monte del disp. primario	83
Figura 50 – Valori di pressione e tensioni raccolti per il trasduttore di monte del primario	84
Figura 51 – Andamento delle tensioni e dell'errore percentuale per il trasduttore di monte del primario	84
Figura 52 - Schema di collegamento del trasduttore di pressione alla scheda NI USB-6002 e al sistema di acquisizione MATLAB.	86
Figura 53 – Circuito pneumatico seconda prova per il trasduttore a monte della valvola	86
Figura 54 – Tabella risultati con sistema di acquisizione NI	87
Figura 55 – Andamento dei risultati ottenuti per valvola a monte della valvola	87
Figura 56 – Risultati ottenuti dall'acquisizione mediante scheda NI	88
Figura 57 – Andamento delle tensioni per il trasduttore posto a valle della valvola	88
Figura 58 - Schema elettrico trasduttore differenziale	89
Figura 59 – Circuito pneumatico seconda prova trasduttore differenziale	90
Figura 60 - Tabella dei risultati ottenuti dal trasduttore differenziale e scheda NI	90

Figura 61 – Andamento dei risultati dell'acquisizione del trasduttore differenziale _____	91
Figura 62 – Collegamento elettrico trasduttore di monte del disp. primario _____	92
Figura 63 – Circuito pneumatico trasduttore di monte del primario collegato con scheda NI ____	92
Figura 64 – Tabella dei risultati ottenuti per il trasduttore a monte del disp. primario _____	93
Figura 65 – Andamento dei valori acquisiti di tensione tramite scheda NI per il trasduttore a monte del primario _____	93
Figura 66 – Schema pneumatico banco prova utilizzato _____	94
Figura 67 –Schema finale collegamenti elettrici nel banco _____	95
Figura 68 – Valvola in prova e relativi trasduttori _____	96
Figura 69 – Sezione di misura e relativi trasduttori _____	96
Figura 70 - Regolatore di pressione e strozzatore _____	97
Figura 71 - Caratteristica della portata ricavata in tempo reale _____	98
Figura 72 - Sintesi della campagna sperimentale _____	99
Figura 73 - Confronto diretto delle prove sperimentali _____	100
Figura 74 - Andamento del coefficiente di variazione medio _____	101
Figura 75 - Differenza percentuale tra ramo di andata e di ritorno _____	102
Figura 76 - Sintesi dei risultati di ripetibilità _____	102
Figura 77 - Esempio di post-processing della caratteristica della valvola _____	104
Figura 78 - Sintesi dei risultati del fitting _____	105
Figura 79 - Curva normalizzata _____	106
Figura 80 - Confronto dei dati _____	106
Figura 81 - Sintesi requisiti _____	107

Introduzione

In accordo con la definizione della grandezza in esame, un misuratore di portata permette di valutare la quantità di fluido che attraversa una determinata sezione in una specifica unità di tempo. La conoscenza di tale grandezza assume un ruolo di rilievo sia in ambito industriale sia in ambito accademico, in quanto permette di verificare il corretto funzionamento del sistema e, più in generale, valutarne le prestazioni e l'efficienza [1, 2].

La misurazione della portata può essere realizzata tramite diverse tipologie di misure, classificabili, generalmente, in metodi diretti ed indiretti. La metodologia diretta prevede l'acquisizione diretta della grandezza in esame, quindi della portata massica o volumetrica. D'altro canto, i metodi indiretti misurano una o più grandezze fisicamente correlate alla portata. I misuratori a pressione differenziale rientrano in quest'ultima categoria. Più precisamente, è previsto l'inserimento all'interno di una condotta, un dispositivo primario che genera una variazione di pressione misurabile tra due sezioni dell'elemento. Tale grandezza viene successivamente elaborata e restituirà la portata del fluido [3].

Affinché una misurazione sia confrontabile e ripetibile, le modalità di esecuzione devono essere realizzate secondo criteri condivisi. Per tale motivo, si fa riferimento a procedure standardizzate. È proprio in questo contesto che si inserisce la normativa ISO 5167, la quale definisce i principi generali da applicare per rendere “universale” una prova di misura di portata tramite dispositivi a pressione differenziale. Tale normativa consente l'impiego di diversi dispositivi primari, tra cui la piastra ad orifizio oppure il tubo di Venturi. Nella presente trattazione, è stata scelta la piastra con orifizio come elemento primario del banco prova.

La tesi presentata si inserisce in questo ambito e si pone l'obiettivo di progettare un banco prova per la misura della portata d'aria attraverso componenti pneumatici di piccola taglia. Parallelamente alla progettazione del banco di misura, è stato sviluppato un sistema di acquisizione che possa utilizzare le grandezze misurate dai trasduttori installati sul banco ed elaborarle in ambiente MATLAB, al fine di restituire i valori di portata e renderli disponibili per analisi e confronti successivi.

Più precisamente, il banco non consta esclusivamente dei componenti meccanici e pneumatici, ma sono presenti anche gli elementi necessari all'acquisizione delle grandezze fisiche di interesse. Le pressioni localizzate nei punti significativi vengono misurate tramite dei trasduttori, i quali trasferiscono il segnale ad una scheda di acquisizione collegata all'elaboratore su cui opera

l'ambiente MATLAB. Tale configurazione rende il banco prova un sistema integrato, le cui funzioni si estendono dalla misura sperimentale al calcolo automatico dei risultati.

Una parte fondamentale del presente lavoro di tesi è rappresentata dallo sviluppo dello script MATLAB, finalizzato ad automatizzare l'elaborazione dei dati acquisiti durante la prova. Lo script è stato sviluppato con l'obiettivo di renderlo chiaro e modulare, così da semplificarne la modifica e l'adattamento anche a banchi prova differenti da quello originale.

Dopo aver definito il sistema di acquisizione, si è proceduto alla validazione del funzionamento su un banco prova già esistente. Le prove realizzate hanno avuto lo scopo di verificarne il funzionamento, più precisamente la qualità dell'acquisizione e la capacità di restituire i valori accettabili di portata a partire dai dati in ingresso. Questa fase rappresenta una prima validazione del sistema, in attesa della successiva applicazione sul banco prova dimensionato.

La tesi è articolata in otto capitoli. Dopo l'introduzione, il secondo capitolo presenta lo stato dell'arte relativo alla misura della portata, con particolare attenzione ai metodi basati sulla misura di pressione differenziale. Il terzo capitolo è dedicato al dimensionamento del banco prova, con riferimento alla scelta dei principali componenti pneumatici e geometrici. Nel quarto capitolo viene descritta la strumentazione adottata per l'acquisizione e il controllo del sistema, mentre il quinto capitolo approfondisce lo sviluppo dello script MATLAB impiegato per l'elaborazione dei dati. Il sesto capitolo riguarda le prove sperimentali condotte, i cui risultati vengono analizzati nel settimo capitolo. Infine, l'ottavo capitolo riporta le conclusioni del lavoro e i possibili sviluppi futuri.

Stato dell'arte

Metodi di misura di portata

Le misure di portata rivestono un ruolo fondamentale nei sistemi industriali: il controllo della quantità di fluido ha un peso nelle prestazioni, nelle strategie di controllo e nella sicurezza operativa. Inoltre, nello scenario attuale, in cui l'obiettivo è l'efficientamento energetico e l'ottimizzazione dell'uso delle risorse, misurare la portata è un passaggio chiave, sia in ambito industriale sia nella ricerca. L'elaborazione di dati affidabili permette di monitorare i consumi, ridurre gli sprechi e migliorare le prestazioni. [1, 2]

Di seguito, in Figura 1 [4], è riportata la vasta gamma di ambiti in cui vengono utilizzati tali sistemi:

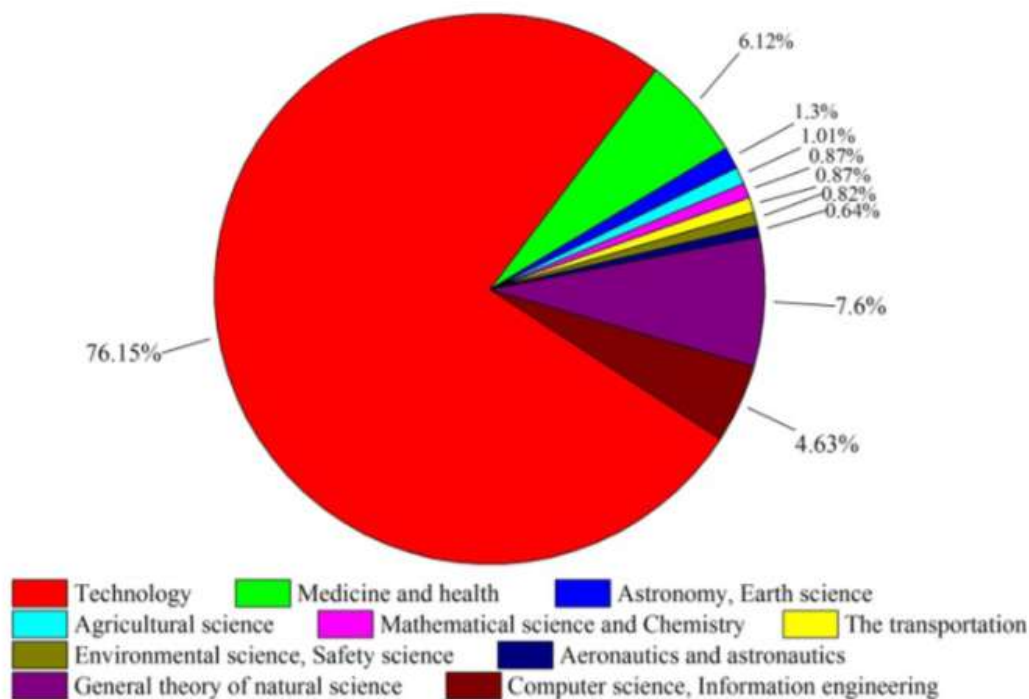


Figura 1 - Statistiche relative all'impiego degli strumenti di misurazione della portata. [4]

L'evidente ampia diffusione delle tecniche di misura di portata rende necessario creare degli standard che possano garantire qualità nelle misurazioni. Una delle caratteristiche principali di un sistema di misura è la ripetibilità, attendibilità e l'accuratezza. Al fine di realizzarle è imprescindibile l'impiego di metodologie standardizzate. [3]

In letteratura, tra le numerose possibili categorie di sistemi di misura di portata vi è la divisione tra metodi diretti ed indiretti. Una metodologia si definisce diretta quando si misura direttamente

la grandezza obiettivo; in caso contrario, una misura è indiretta quando l'obiettivo è ricavato attraverso la misurazione diretta di altre grandezze, legate secondo una certa logica. [3] Tale distinzione, è applicabile anche alle misure di portata. Le misure dirette consistono nella determinazione della quantità di fluido che attraversa, in un certo intervallo di tempo, un sistema. Tra i metodi diretti è presente quello basato sull'effetto di Coriolis, che permette di calcolare la portata massica sfruttando la deformazione di un condotto attraversato da un fluido in movimento. Il vantaggio principale dei metodi diretti è il divincolarsi dalla catena di misura, dalle relative incertezze ed inoltre dalle proprietà del fluido. Il compromesso, invece, è rappresentato dal costo elevato degli strumenti che ne limita la diffusione. [5]

Al contrario, i metodi indiretti rivestono il ruolo di approccio più diffuso in ambito industriale e sperimentale. Essi si basano su misure di grandezze fisicamente correlate alla portata, tra cui la differenza di pressione, velocità del fluido od altre grandezze termodinamiche che permettono di risalire alla portata, mediante formulazioni teoriche o empiriche. [3]

Tuttavia, come precedentemente accennato, la misura indiretta è legata ad un'elevata sensibilità alle fonti di errori. In particolare, errori nella misura delle proprietà del fluido (viscosità, densità e temperatura), dell'orientamento del misuratore, del livello di pressione o disturbi di carattere strutturale come discontinuità strutturali (raccordi, gomiti, valvole ecc.). Tali imprecisioni sono una realtà imprescindibile in questo tipo di misuratori; [6] conseguentemente, è reso indispensabile l'utilizzo di modelli di misura e di calcolo validati sperimentalmente. A tale scopo la normativa ISO 5167 per la misura della portata dei fluidi definisce criteri univoci al fine di garantire risultati affidabili e ripetibili.

Un'ulteriore distinzione dei sistemi di misura della portata è fatta in funzione della grandezza misurata: portata volumetrica o portata massica. I primi misurano il volume [m^3] di fluido che fluisce attraverso una generica sezione nell'unità di tempo; invece, i secondi misurano, direttamente, la massa [kg] del fluido nello stesso intervallo temporale.

I misuratori massici trovano largo impiego in ambienti in cui la misura della massa risulta più significativa rispetto a quella di volume. Ad esempio, nel settore aerospaziale, un razzo o un aeroplano determinano la propria autonomia, quindi la distanza percorribile, in funzione della massa di carburante disponibile e non dal volume da esso occupato.

I metodi che misurano direttamente la portata massica possono garantire prestazioni migliori in termini di accuratezza, semplicità del sistema, ai costi, al peso, ingombro ecc. [6]

Misura della portata tramite differenza di pressione

Tra le diverse metodologie indirette, la misura di portata volumetrica attraverso una differenza di pressione è la soluzione più utilizzata e consolidata in ambito industriale. [7]

La misura di portata tramite differenza di pressione si basa sull'applicazione della teoria di Bernoulli in fluidodinamica, insieme al principio di conservazione della massa. Si consideri un fluido incompressibile in moto stazionario attraverso una condotta, l'equazione di Bernoulli tra una sezione di monte e una di valle sarà:

$$\frac{p_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2}$$

In cui p è la pressione statica, ρ è la densità del fluido e v è la sua velocità.

La differenza di pressione e quindi di velocità è realizzata tramite l'inserimento di un disturbo, nel caso più semplice, una piastra con orifizio di forma circolare. In Figura 2 [6] è riportato lo schema del principio fisico che regola il fenomeno.

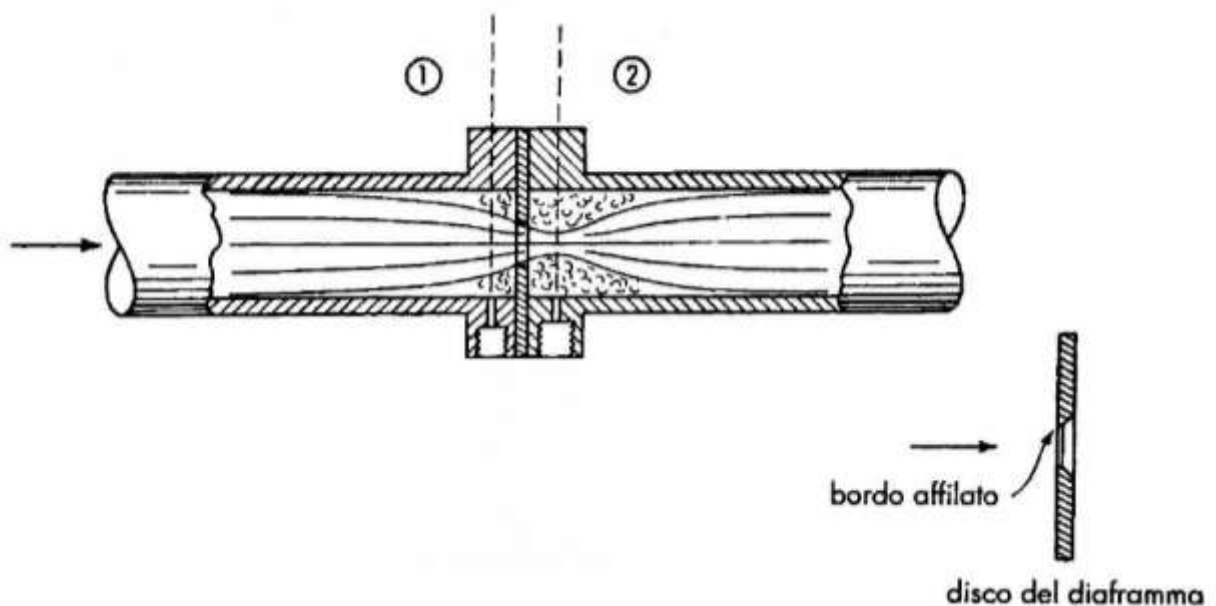


Figura 2 - Schema principio fisico e posizione orifizio [6]

La presenza dell'orifizio comporta una riduzione della sezione di passaggio, perciò, per il principio di continuità:

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2$$

sarà presente un incremento della velocità nella sezione ristretta, accompagnato da una diminuzione della pressione. In Figura 3 [8], si osserva come vari la pressione, durante l'evoluzione del fluido evolvente, all'interno della tubatura.

Combinando le precedenti relazioni, è possibile ottenere la dipendenza, di grado $\frac{1}{2}$, tra la portata e la differenza di pressione:

$$Q \propto \sqrt{\Delta p}$$

Tuttavia, l'attuale descrizione risulta parzialmente veritiera, in quanto non si sono considerati tutti gli effetti che contraddistinguono la realtà del processo: gli effetti viscosi, le perdite di carico e la geometria del sistema. Pertanto, la relazione che si ottiene è:

$$Q = CA \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$\rho = \frac{P_1}{RT_1}$$

dove C rappresenta il coefficiente di efflusso, sperimentale e funzione del numero di Reynolds (Re) e delle caratteristiche geometriche del sistema. [8]

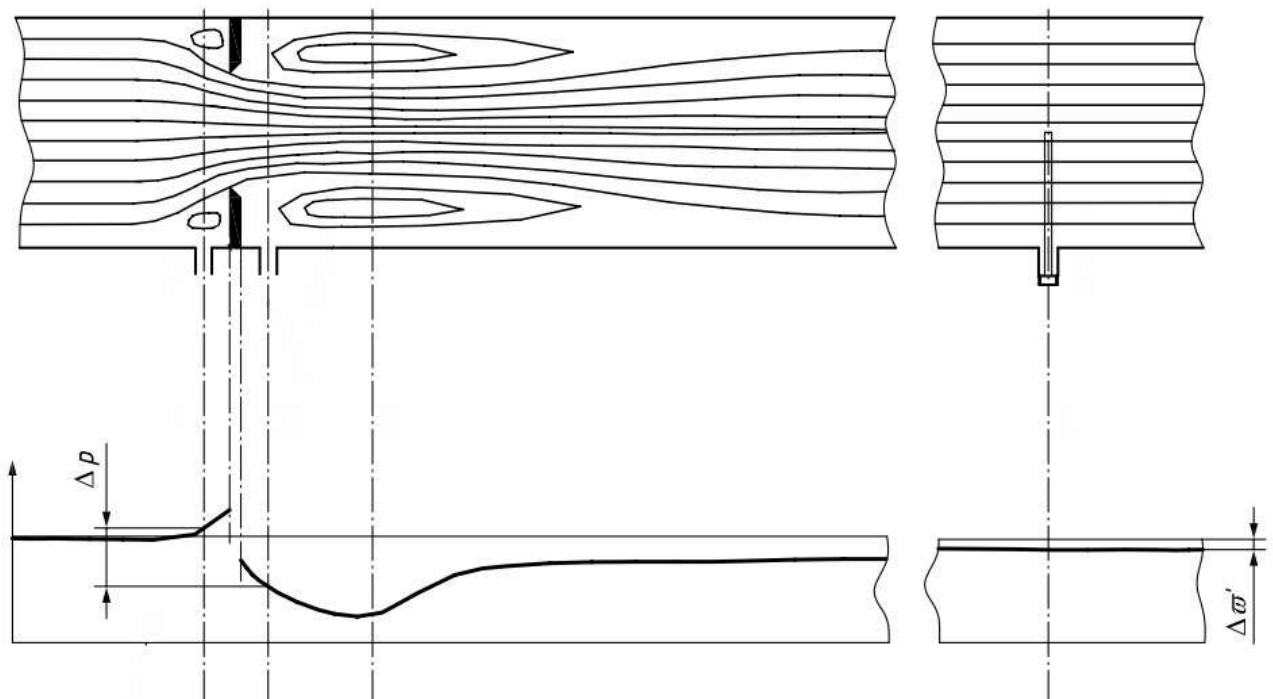


Figura 3 - Andamento della pressione in presenza di un orifizio [8]

In conclusione, questa tipologia di sistemi di misura è la più diffusa in ambito industriale grazie alla sua semplicità, al basso costo, all'assenza di parti mobili e all'ampia letteratura scientifica sviluppata nel tempo. Di contro, è presente un'elevata perdita di carico, forte dipendenza dalle condizioni del flusso e la necessità di coefficienti correttivi. [9, 6]

Dispositivi a strozzamento

Tra i diversi metodi di misura di portata, la valutazione mediante la differenza di pressione è realizzata, nella maggior parte dei casi, attraverso l'uso dei dispositivi a strozzamento. Il principio di funzionamento consiste nell'inserimento di un elemento che riduce la sezione di passaggio del fluido e, quindi, la creazione di una variazione delle proprietà del flusso, misurate da trasduttori, a monte ed a valle del dispositivo.

I dispositivi maggiormente utilizzati sono tre: il diaframma (orifice plate), il tubo di Venturi e il boccaglio. Nonostante il principio di funzionamento sia analogo, la differenza di geometria definisce diverse variazioni di velocità e, quindi, di pressione; in dettaglio, tali variazioni risultano meno repentine nel caso del boccaglio e del tubo di Venturi. [6] In Figura 4 [3] è presente uno schema generale di tali elementi.

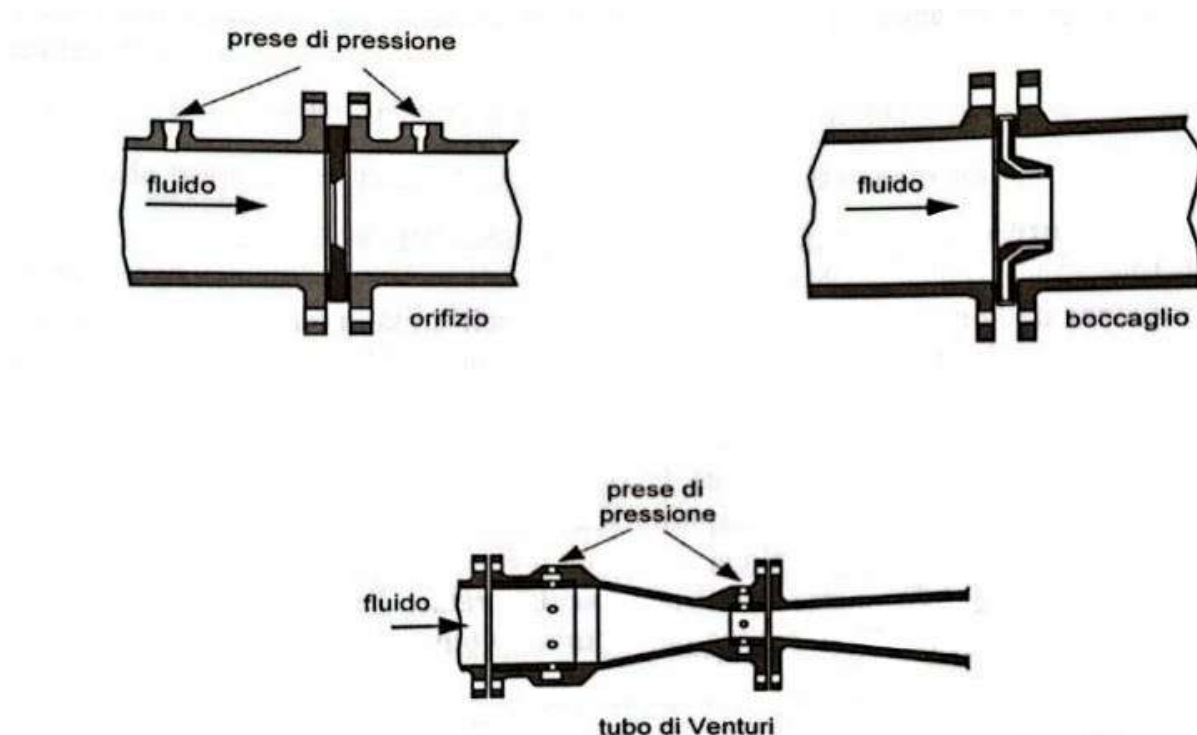


Figura 4 - Dispositivi a strozzamento [3]

Nel caso del diaframma, la riduzione della sezione è significativa e repentina, la più marcata tra i dispositivi elencati. Ciò, come anticipato, si ripercuote in una modifica del campo delle velocità e, conseguentemente, delle pressioni. A discapito di ciò che si potrebbe pensare, la semplicità realizzativa non si riflette nella fisica del processo, infatti risulta particolarmente complessa. Quando il flusso arriva in prossimità della piastra, converge cambiando bruscamente direzione. I filetti di flusso, a causa degli effetti viscosi e la presenza dello strato limite, sono soggetti ad un cambio di direzione e ciò determina la formazione di vortici, allocati nella regione tra l'orifizio e il bordo della tubazione. Questa sezione viene definita zona di ristagno e, come si può vedere dalla Figura 3, in tale regione vi è un lieve aumento di pressione, causato dalla collisione del fluido con le pareti, che converte energia cinetica in pressione [3]. In Figura 5 [10] è riportato lo schema del fenomeno. Superato l'orifizio, i filetti di flusso non occupano una sezione pari a quella dello stesso, bensì una sezione minore. In queste condizioni, è definita vena contracta il fluido nella sua sezione minima, caratterizzato dal massimo valore di velocità e minore valore di pressione. Sempre in Figura 5 è presente la rappresentazione del fenomeno della vena contracta.

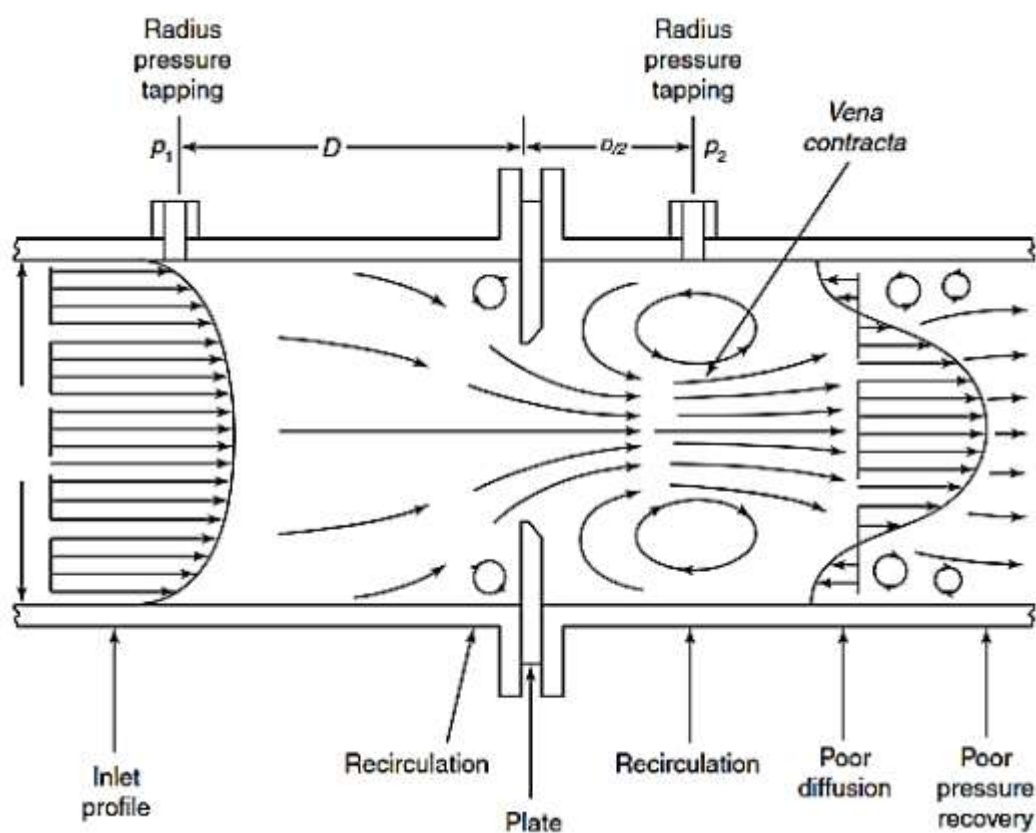


Figura 5 - Andamento del flusso attraverso la piastra con orifizio [10]

Dopo aver superato l'orifizio, il fluido si espande improvvisamente, ciò crea le condizioni affinché la turbolenza del flusso si traduca in forti vortici. La presenza dell'orifizio, quindi di un brusco cambio di sezione, rende il diaframma la soluzione con il maggior livello di turbolenza, quindi quella affetta dalla più elevata incertezza di misura, rispetto alle altre soluzioni che presentano un cambio di sezione più graduale.

In generale, la presenza di tali effetti rende necessaria l'adozione di coefficienti correttivi, ad esempio il coefficiente di efflusso, per migliorare la descrizione del fenomeno e ottenere risultati attendibili.

Un'ulteriore aspetto particolarmente importante è la perdita di carico permanente. In tutti i dispositivi a strozzamento vi è una perdita energetica permanente. Si definisce perdita di carico permanente $\Delta\bar{w}$ la differenza di pressione presente nel fluido tra monte e valle dell'orifizio. [8] La normativa ISO 5167, con specifico riferimento al diaframma, fornisce una relazione atta al calcolo della perdita di pressione Δp :

$$\Delta\bar{w} = \frac{\sqrt{1 - \beta^4(1 - C^2)} - C\beta^2}{\sqrt{1 - \beta^4(1 - C^2)} + C\beta^2} \Delta p$$

È importante definire la differenza tra la differenza di pressione ai capi del dispositivo primario, Δp , e la perdita di carico permanente, $\Delta\bar{w}$. La differenza di pressione Δp è misurata dai trasduttori di pressione e rappresenta l'effetto della presenza del diaframma. Tuttavia, non tutta viene dissipata dal disturbo irreversibilmente: una parte viene recuperata. La quota energetica che viene dissipata in modo irreversibile è la perdita di carico permanente $\Delta\bar{w}$. Più in generale, il concetto di perdita di carico permanente può essere esteso a tutta la linea di misura e non solo al diaframma, evidenziando che tutti gli elementi che costituiscono il banco contribuiscono alla dissipazione energetica del flusso.

Anche in questo caso è possibile differenziare il comportamento dei dispositivi a strozzamento, sempre a causa delle differenze geometriche; al variare della dimensione dell'apertura del dispositivo si ha una perdita di pressione diversa. Nel grafico si utilizza in ascissa la grandezza m o β , adimensionali, al fine di rendere indipendenti le dimensioni dell'orifizio dalla scala del sistema. Le loro espressioni sono le seguenti:

$$\beta = \frac{d}{D}$$

$$m = \frac{d^2}{D^2}$$

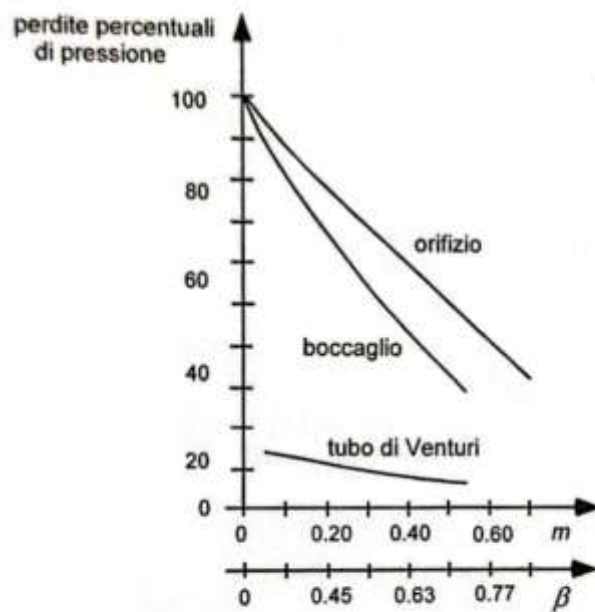


Figura 6 - Andamento delle perdite di carico permanente in funzione del diametro di ostruzione per diversi tipi di strozzamento [3]

In generale, si può affermare che, per piccole perdite di carico si opta per il diaframma, mentre per perdite elevate si ricorre al tubo di Venturi; per condizioni intermedie, infine, si adotta il boccaglio. [3]

Lo sviluppo delle analisi CFD ((Computational Fluid Dynamics) ha permesso di simulare il comportamento di fluidi che attraversano un orifizio. In Figura 7 è riportata una simulazione realizzata considerando come fluido aria. [11]

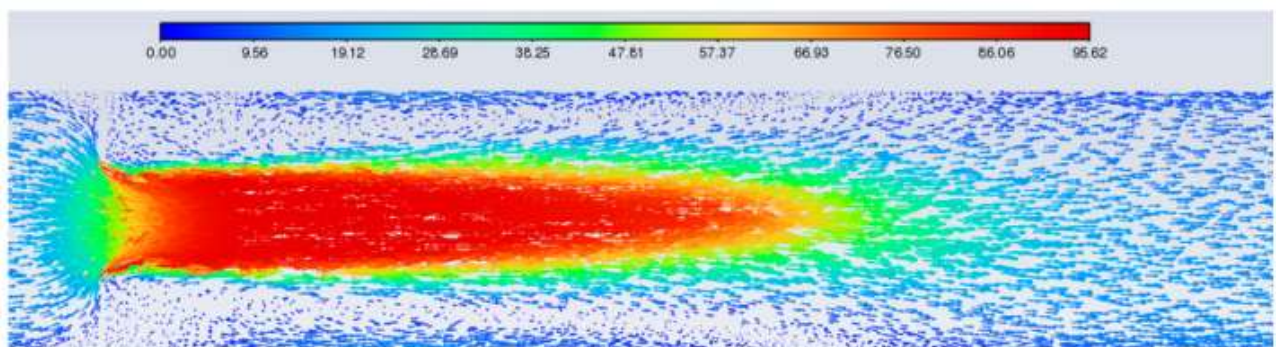


Figura 7 - Campo vettoriale delle velocità che attraversa un orifizio [11]

Normativa ISO 5167

L'utilizzo dei dispositivi a strozzamento è talmente diffuso da risultare imprescindibile la creazione di uno standard di riferimento che garantisca uniformità dei risultati. Al fine di adempire a tale scopo, la normativa ISO 5167 rappresenta il riferimento internazionale per la misurazione di portata mediante la misura della differenza di pressione in un condotto a sezione circolare.

Tale normativa è il frutto di un lungo processo di revisione e miglioramento, le cui origini risalgono alla prima metà del XX secolo, in Europa.

La prima versione della norma è stata pubblicata nel 1980 ed includeva esclusivamente diaframmi, ugelli e tubo di Venturi. Successivamente, si sono susseguite diverse revisioni. Particolarmente rilevante è la modifica del 1998, consistita nell'aggiornamento dell'equazione del coefficiente di efflusso, ed anche la revisione del 2003, che ha reso la normativa più strutturata, dividendola in parti, ciascuna caratterizzata da uno specifico dispositivo a strozzamento.

L'ultimo aggiornamento è datato al 2022 ed ha introdotto nuovi dispositivi normati e ha migliorato le formulazioni relative all'incertezza di misura ed alle condizioni di installazione; ad esempio, è stata prevista un'estensione delle lunghezze minime.

Ciò è particolarmente significativo, in quanto dimostra l'elevata importanza della norma ed il suo carattere evolutivo, corroborato anche dalla vasta attività di ricerca sperimentale a suo supporto.

[12]

Alla luce di tale evoluzione, la normativa ISO 5167 – 2022 definisce i criteri per la valutazione della portata mediante dispositivi a differenza di pressione.

Tale norma presenta un testo particolarmente esteso, in quanto affronta molteplici aspetti della misurazione, a partire dal principio di funzionamento fino alle condizioni di installazione e le formulazioni specifiche per i vari dispositivi.

Come tutti i processi scientifici, la normativa si basa su alcune ipotesi di lavoro; in particolare, prevede l'impiego di un condotto a sezione circolare attraversata da un flusso monofase pienamente sviluppato e non pulsante.

La portata viene determinata attraverso una formulazione standardizzata che tiene conto delle proprietà del fluido e della geometria del sistema. In generale, la portata massica viene espressa nel seguente modo:

$$q_m = \frac{C\varepsilon A \sqrt{2\Delta p \rho_1}}{\sqrt{1 - \beta^4}}$$

Dove ε rappresenta il coefficiente di espansione del fluido.

Di conseguenza la portata volumetrica sarà:

$$q_v = \frac{q_m}{\rho}$$

Il coefficiente di efflusso C tiene conto delle differenze tra il comportamento ideale e quello reale del flusso. Le cause di tali differenze sono imputabili agli effetti della viscosità, della turbolenza e della geometria del sistema. I parametri rappresentativi sono il numero di Reynolds (Re) ed il rapporto geometrico tra i diametri, $\beta = d/D$.

Oltre a fornire le formule del coefficiente di efflusso, declinate per i vari casi di studio, la normativa riporta anche tabelle che indicano il valore di tale coefficiente in funzione di β e Re , in casi che sono opportunamente validati sperimentalmente.

Di seguito in Figura 8 [3], è mostrato l'andamento del coefficiente di efflusso, chiamato C_d , in funzione del numero di Reynolds per due differenti diaframmi.

Più precisamente, il numero di Reynolds Re rappresenta una delle più importanti grandezze adimensionali nello studio del comportamento dei flussi, in quanto esprime il rapporto tra le forze di inerzia e le forze viscosi che caratterizzano il fluido:

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

Dal punto di vista fisico, il moto di un fluido può essere classificato come laminare o turbolento. Quando sono preponderanti le forze d'inerzia, il flusso tende ad essere turbolento ed il numero di Reynolds assumerà valori elevati. In caso contrario, per bassi valori di Reynolds, le forze viscosi prevarranno ed il flusso tende a mantenere una struttura ordinata: i filetti tenderanno a scorrere pressoché parallelamente tra loro; in tali condizioni il moto è definito laminare.

Il coefficiente di espansione ε permette di tener conto della comprimibilità del fluido, come nel caso dell'aria; perciò, permette di considerare la variazione della densità attraverso il sistema. Nel caso in cui il fluido sia incompressibile, il suo valore è pari ad 1.

L'importanza del coefficiente è legata alle condizioni termodinamiche del flusso, dato che sono proprio quest'ultime a determinare il valore puntuale della densità.

La letteratura scientifica dimostra che per un dato diaframma il valore del coefficiente di espandibilità è indipendente dal numero di Reynolds ma dipende solo da coefficiente di espansione isentropica e dalla pressione differenziale.

Più precisamente, il coefficiente di espansione isentropica k è una proprietà termodinamica del fluido:

$$k = \frac{c_p}{c_v}$$

In cui, c_v è il calore specifico a volume costante, mentre c_p è il calore specifico a pressione costante.

La differenza fondamentale tra il coefficiente di espandibilità ε e il coefficiente di espansione isentropica k , sta nella loro natura: il coefficiente ε è un termine correttivo usato dalla ISO 5167 per descrivere il comportamento del fluido durante la misura di portata, mentre il coefficiente di espansione è una proprietà fisica del gas.

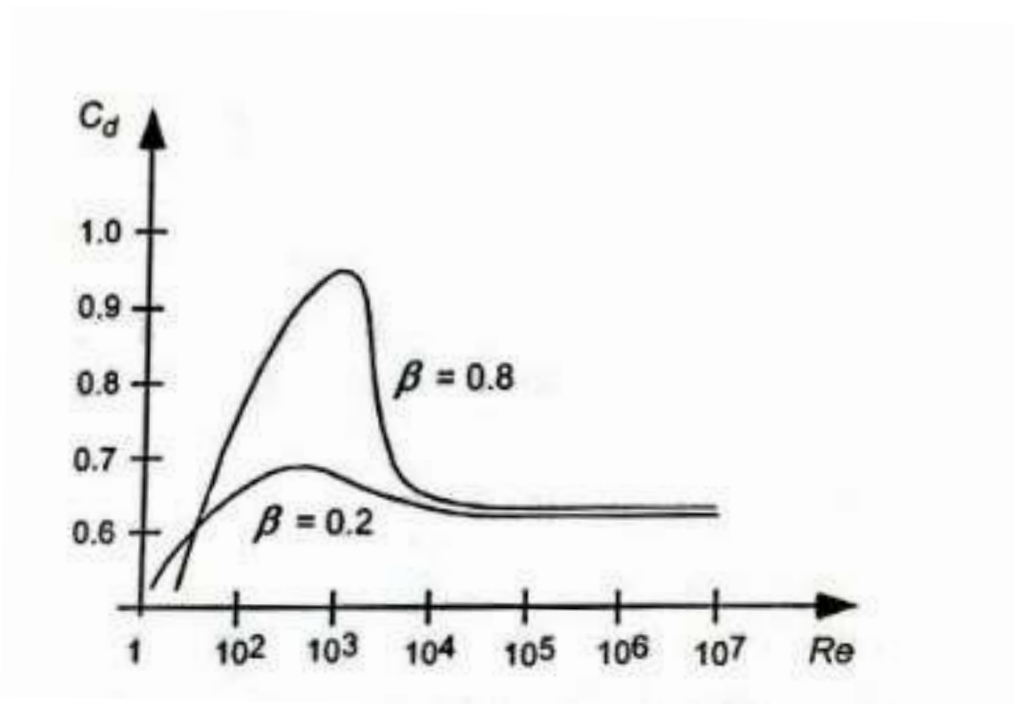


Figura 8 - Andamento del coefficiente di efflusso [3]

Una caratteristica importante della normativa è la possibilità di determinare la portata senza la necessità di calibrazione diretta del dispositivo primario, a condizione che siano rispettati i limiti di applicabilità previsti dalla norma stessa.

In caso contrario, la normativa permette di ottenere un risultato certificato, purché venga realizzata una calibrazione diretta del primario, valutando sperimentalmente il coefficiente di efflusso; le condizioni di lavoro, in questo caso, del sistema non devono subire variazioni.

Di fatto, l'opportunità di realizzare misure senza una calibrazione diretta è resa possibile dall'elevata quantità di dati sperimentali, accumulati nel corso anni.

Affinché le correzioni previste risultino efficaci, e quindi senza necessitare di una calibrazione diretta, è indispensabile che il sistema operi entro vincoli ben precisi.

Suddetti vincoli concernono le condizioni di installazione, quali le lunghezze dei tratti a monte e a valle del dispositivo primario, la posizione e la tipologia delle prese di pressione, nonché la qualità del profilo delle velocità del flusso. In assenza di tali vincoli, il comportamento del fluido non risulta sufficientemente prevedibile e, dunque, descrivibile mediante i coefficienti correttivi.

Infine, la normativa introduce il concetto di catena di misura: la rilevazione della portata non dipende solo dalla differenza di pressione generata ai capi del dispositivo primario, ma è l'insieme di più elementi coerentemente collegati.

Essa distingue tra dispositivo primario, composto dall'elemento restringente e le relative prese di pressione, il dispositivo secondario, comprendente trasduttori di pressione e di temperatura, ed il sistema di elaborazione dei dati. Tutto ciò è importante anche dal punto di vista concettuale, poiché evidenzia come il valore della portata sia il risultato dell'intera catena di misura.

Catena di misura e acquisizione dei dati

La misurazione della portata mediante differenza di pressione tramite un diaframma richiede un insieme di componenti che, insieme, formano la catena di misura. In tale contesto, risulta di fondamentale importanza l'utilizzo dei trasduttori di pressione e temperatura, poiché acquisiscono le grandezze fisiche dal processo e le trasmettono alla scheda di acquisizione e, successivamente, all'elaboratore dei dati.

Il misuratore di pressione differenziale, posto a monte e a valle del diaframma, insieme al diaframma stesso costituisce il cuore del sistema di misurazione. All'interno dell'impianto sono inoltre presenti ulteriori trasduttori di pressione statica e di temperatura, indispensabili per determinare le proprietà fluidodinamiche del fluido e, contestualmente, ricavare con accuratezza il valore dei coefficienti correttivi.

I trasduttori svolgono il compito di convertire la grandezza fisica in un segnale elettrico analogico che verrà, successivamente, acquisito dal sistema DAQ (Data Acquisition). L'unione di queste due categorie di elementi rappresenta l'interfaccia tra il sistema fisico e l'elaboratore, che in questo caso è un computer sul quale sarà installato il software Matlab, che permetterà di manipolare e visualizzare i dati. In Figura 9 è riportato lo schema della catena di misura del sistema.

Al termine della catena di misura è presente un elaboratore in grado di leggere e modellare i dati mediante l'ausilio di un software; tra gli ambienti maggiormente utilizzati vi è sicuramente Matlab.

Lo scopo dell'utilizzo di Matlab è la realizzazione di un sistema che permetta di calcolare in tempo reale la portata, raccogliere i risultati ed avere una descrizione completa del comportamento del sistema. Un'altra caratteristica fondamentale del programma è rappresentata dall'estrema flessibilità e modularità che esso fornisce, mantenendo chiaro e organizzato l'ambiente di lavoro.

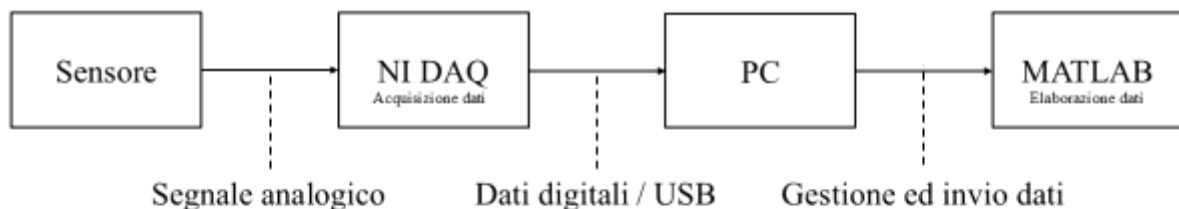


Figura 9 - Schema della catena di misura

Le prestazioni complessive della catena di acquisizione dipendono principalmente da due macrocategorie di fattori: la corretta applicazione delle regole prescritte dalla normativa, nel rispetto dei vincoli progettuali, e le caratteristiche del sistema di acquisizione. Si consideri la seconda categoria, i parametri che la compongono sono l'accuratezza dei sensori, la risoluzione della conversione analogico-digitale, la frequenza di campionamento; tali parametri incidono direttamente sull'incertezza finale associata alla misura di portata.

L'accuratezza di un sensore rappresenta la capacità di fornire un valore misurato quanto più vicino possibile a quello reale. Tale caratteristica si ripercuote direttamente nell'errore complessivo della misura. Equivalentemente, la risoluzione della conversione rappresenta la minima variazione del segnale che il sistema è in grado di distinguere. Qualora questo valore risulti incompatibile con le caratteristiche del sistema, si manifesta un errore di quantizzazione, che limita la capacità descrittiva del fenomeno fisico. Invece, la frequenza di campionamento è legata alla dimensione temporale; essa scandisce il numero di acquisizioni effettuate in un'unità di tempo. Tale proprietà deve essere scelta in funzione della dinamica del fenomeno fisico in esame. Quando la frequenza di campionamento risulta insufficiente, si incorre nella perdita di informazioni o nella comparsa di fenomeni di aliasing. In Figura 10 e Figura 11 sono riportati alcuni esempi esplicativi dei possibili errori definiti in precedenza. [13]

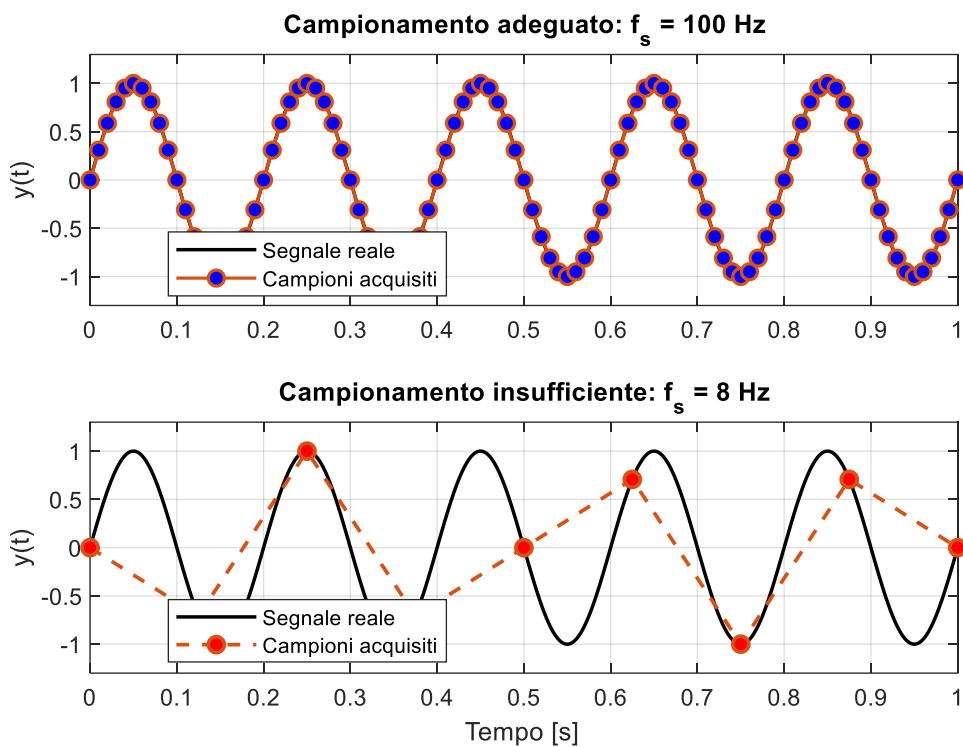


Figura 10 – Confronto tra campionamento insufficiente ed adeguato

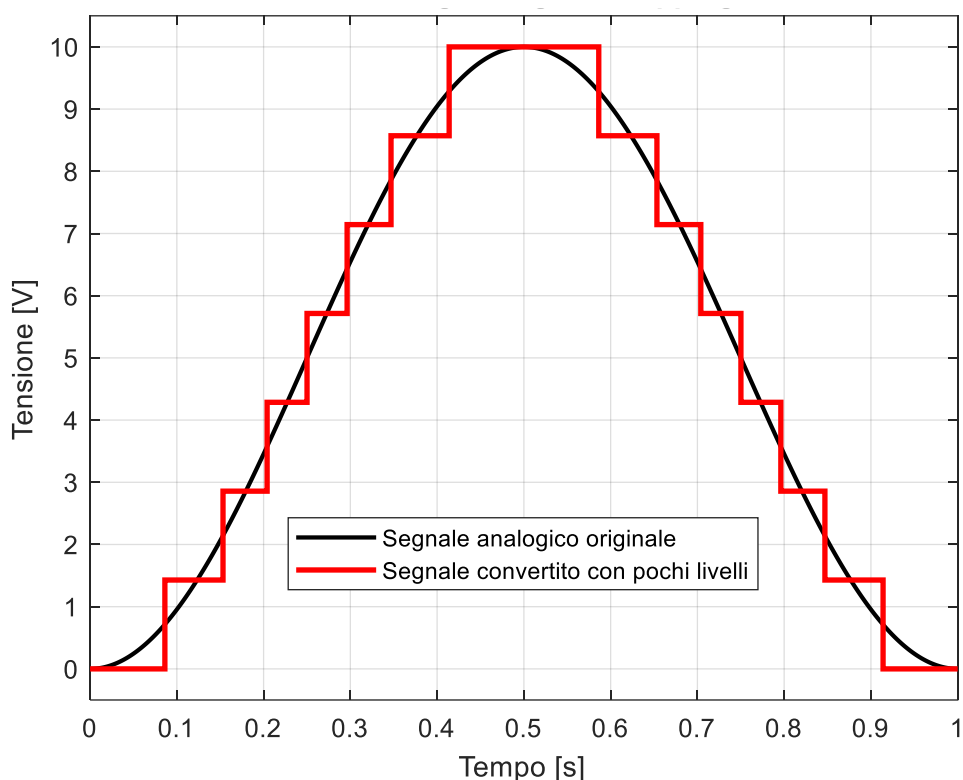


Figura 11 – Conversione analogico-digitale grossolana

Banco prova automatizzato sviluppato secondo la normativa ISO: il caso del Politecnico di Torino

Un esempio significativo è rappresentato dal banco di misura di portata automatizzato, conforme alla normativa ISO 5167, sviluppato presso il Politecnico di Torino. Il banco è stato progettato per caratterizzare componenti pneumatici mediante misure di portata effettuate con dispositivi a differenza di pressione; contestualmente, sono state perseguite e raggiunte le seguenti caratteristiche: elevata versatilità, automatizzazione del processo di prova, accuratezza delle misure ed ergonomia del sistema. In Figura 12 è rappresentata lo schema funzionale del banco prova.

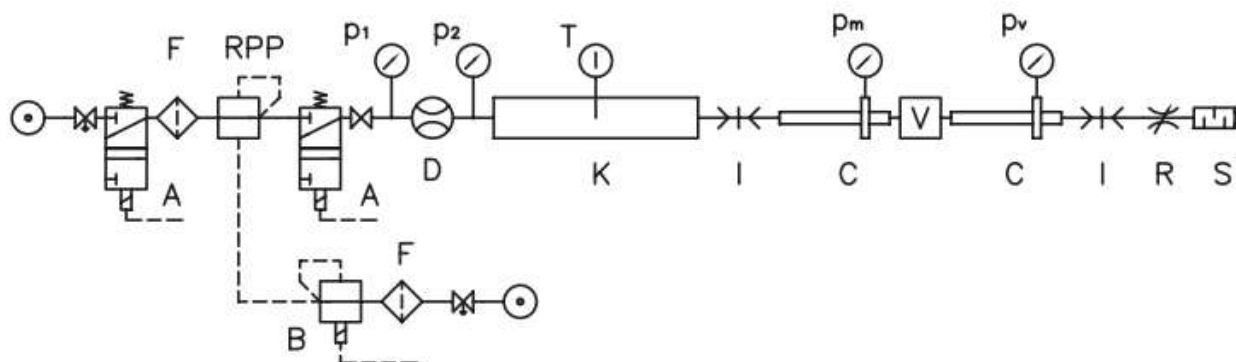


Figura 12 - Schema funzionale del banco prova automatizzato sviluppato presso il Politecnico di Torino [14]

Il sistema utilizza come dispositivo primario un diaframma e prese di pressione posizionate sul collegamento flangiato che racchiude il diaframma stesso. Le proprietà del fluido vengono misurate mediante trasduttori di pressione e temperatura collegati a una scheda di acquisizione National Instruments PCI-6035E, avente il compito di mettere in comunicazione il banco prova con l'elaboratore. Grazie alla configurazione del sistema di acquisizione e dell'elaboratore, risulta possibile calcolare e visualizzare la portata in tempo reale mediante le formulazioni previste dalla normativa ISO 5167.

Una caratteristica di particolare importanza del banco prova è rappresentata dalla sua elevata modularità, sia dal punto di vista fisico sia per quanto riguarda il sistema di acquisizione. In primo luogo, il componente in prova viene inserito all'interno del banco mediante un sistema CAM LOCK, che permette operazioni di montaggio e smontaggio rapido. Inoltre, è presente un sistema di sostituzione automatica del dispositivo primario, che consente un'ampia scelta tra numerosi diaframmi. Tutte queste informazioni sono implementate nel sistema di controllo del banco; perciò, sarà il programma stesso a segnalare la necessità di effettuare la sostituzione del dispositivo.

Il banco prova presenta un elevato livello di automazione. Il sistema permette di regolare automaticamente la pressione di monte, monitorare le condizioni operative e verificare che i dati rilevati ed elaborati rientrino nei limiti previsti dalle prescrizioni normative. Un esempio è rappresentato dal software di controllo, che impedisce di considerare un dato qualora non vengano rispettati i requisiti sulla stabilità del flusso o sul rapporto tra le pressioni. [14]

In Figura 13 ed in Figura 14 sono riportate due foto che illustrano il banco prova nella sua interezza.



Figura 13 – Banco prova: sezione di monte [14]



Figura 14 - Banco prova: sezione di valle [14]

In conclusione, la lunga trattazione riguardo i sistemi di misura della portata ha permesso di definire uno standard consolidato, che riesca ad affrontare la complessità fisica delle misure di portata indirette. L'evoluzione dello stato dell'arte, che ha prodotto un'ampia disponibilità di dati

sperimentali, ha reso sempre più fine l'utilizzo dei modelli a supporto del problema. Parallelamente, la ricerca tende verso l'ottimizzazione dei sistemi esistenti e verso la crescente integrazione di tecnologie che permettano di automatizzare, di monitorare in tempo reale le prove sperimentali, di simulare, tramite l'analisi CFD, il comportamento del fluido in condizioni non ideali ed impiegare fluidi non convenzionali, quali idrogeno e anidride carbonica (CO_2). [15, 16]

Dimensionamento

Obiettivo del dimensionamento

Il presente capitolo descrive il dimensionamento preliminare di un sistema pneumatico finalizzato alla misura della quantità di aria, quindi della portata, che attraversa una valvola di piccola taglia. Al fine di rendere la misurazione accurata e ripetibile, si è scelto di seguire le indicazioni fornite dalla normativa ISO 5167, che definisce le regole per effettuare una misura della portata utilizzando dispositivi a pressione differenziale. Nel caso in esame, il dispositivo utilizzato sarà una piastra forata, indicata, in accordo con la normativa, come dispositivo primario.

Complessivamente, la soluzione impiegata prevede l'inserimento del dispositivo primario in un condotto circolare completamente attraversato dal fluido. Il principio di funzionamento si basa sulla generazione di una differenza di pressione statica ai capi del misuratore. Tale differenza di pressione viene misurata e successivamente elaborata, al fine di determinare il valore corretto della portata che attraversa il dispositivo in prova. In merito a ciò, la ISO 5167 fornisce le condizioni operative con cui deve essere svolta la prova e le relazioni da implementare nella fase di elaborazione dei dati.

Al fine di interfacciare il banco prova sperimentale con il software di elaborazione dati, è stata scelta una scheda di acquisizione NI USB-6002, prodotta da National Instruments. Tale scheda è dotata di una serie di ingressi analogici che permettono di acquisire i segnali elettrici provenienti dai trasduttori di pressione installati sul banco prova. In questo modo, la scheda di acquisizione rappresenta il ponte tra il banco prova fisico e l'ambiente di elaborazione numerica.

Il dimensionamento è stato effettuato considerando due esigenze principali: il rispetto delle norme previste dalla normativa ISO 5167 e la necessità di realizzare un banco prova particolarmente compatto, la cui lunghezza complessiva si attesti intorno ai due metri.

$$L_{tot} \cong 2 \text{ m}$$

Configurazione generale del banco

Come detto precedentemente, il dimensionamento del banco prova punta a conciliare le prescrizioni previste dalla normativa ISO 5167 e la necessità di avere un'architettura compatta e riconfigurabile. Al fine di mantenere la realizzazione semplice, è stata scelta una disposizione di tipo assiale: i componenti sono montati in serie, lungo la direzione del flusso, allo scopo di rendere più facili le operazioni di sostituzione e limitare gli ingombri lungo una sola direzione. La

disposizione assiale, inoltre, è ottimizzata in vista della realizzazione del supporto del banco. Tale supporto è costituito da una struttura profilata in metallo, sulla quale vengono posizionate delle piastre forate che, insieme ad altri elementi di bloccaggio, permettono vincolare e configurare il banco prova. In particolare, la geometria del profilato permette lo scorrimento delle viti all'interno delle apposite sedi, rendendo il banco adatto a eventuali modifiche future.

In Figura 15 è riportato lo schema pneumatico complessivo del banco prova.

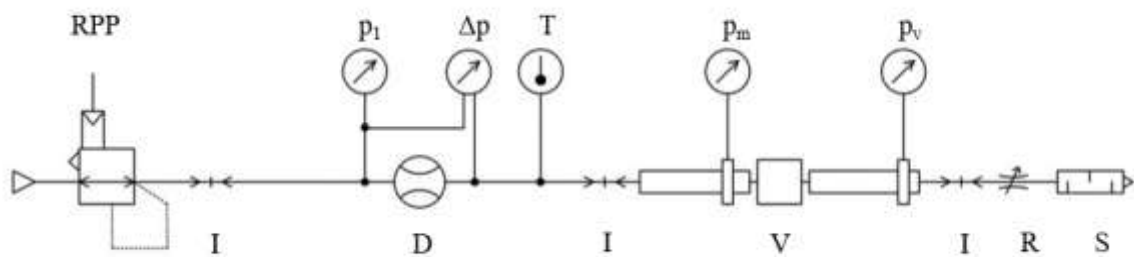


Figura 15 – Schema pneumatico generale del banco prova

Di cui:

- RPP: regolatore proporzionale di pressione;
- I: Innesti meccanici per permettono di scollegare rapidamente il diaframma o la valvola in prova;
- D: misuratore di portata a diaframma;
- V: valvola pneumatica in prova;
- R: valvola regolatrice del flusso;
- S: silenziatore;
- p_1 : trasduttore di pressione assoluta a monte del diaframma;
- Δp : trasduttore differenziale tra monte e valle del diaframma;
- T : sensore di temperatura;
- p_m : trasduttore di pressione a monte della valvola in prova;
- p_v : trasduttore di pressione a valle della valvola in prova.

A monte del banco è presente un regolatore di pressione MPPE che permette di mantenere costante la pressione di monte della valvola in prova. A valle del regolatore è collocato un adattatore che consente di collegare l'uscita di quest'ultimo al tubo rettilineo ISO, all'interno del quale sarà presente il dispositivo primario.

Il tubo rispetterà le caratteristiche prescritte dalla normativa e, inoltre, avrà al suo interno un condizionatore di flusso Zanker, oltre al gruppo flangia-diaframma, con le relative prese di pressione.

A valle del tratto ISO è presente una riduzione, che consente il collegamento con il tratto rettilineo contenente la valvola in prova. Successivamente sono installati il regolatore di portata ed il sistema di scarico in ambiente, dotato di relativo silenziatore. La logica funzionale del banco è esplicitata in Figura 16.

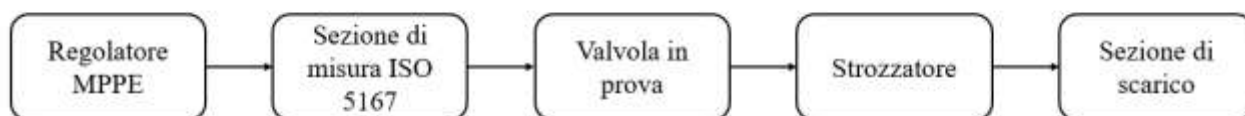


Figura 16 - Schema funzionale semplificato del banco

Un aspetto fondamentale, esaminato prima dell'inizio del dimensionamento, riguarda l'allocazione della valvola in prova, rispetto al diaframma: essa poteva essere posizionata a monte o a valle del diaframma. La scelta finale è stata quella di posizionare la valvola in prova a valle del diaframma, affinché gli effetti fluidodinamici causati dalla presenza della valvola non influenzassero direttamente la sezione di misura ISO.

Invero, la normativa non vieta alcuna configurazione a monte della sezione di misura, ma prescrive l'adozione di lunghezze minime che permettano al flusso di rispettare le caratteristiche richieste: esso deve risultare turbolento e pienamente sviluppato all'interno della tubazione. Pertanto, in assenza del vincolo sulla compattezza del banco prova, il problema non sarebbe sorto, in quanto sarebbe stato sufficiente realizzare un tratto rettilineo più lungo, che permettesse di rispettare le distanze minime prescritte.

Più precisamente la configurazione finale scelta è rappresentata dalla seguente sequenza di componenti:

N°	Zona	Componente
1	Inizio	MPPE
2	Monte ISO	Adattatore 1/2" → 2"
3	Monte ISO	Camlock 2" monte (A-B)
4	ISO	Tubo DN50 pre-Zanker
5	ISO	Zanker flangiato
6	ISO	Tubo Zanker-diaframma
7	ISO	Diaframma DN50
8	Valle ISO	Tubo DN50 valle
9	Valle ISO	Camlock 2" valle (A-B)
10	Valle ISO	Riduttore 2" → 1/2"
11	Valle ISO	Camlock 1/2" valle
12	Valle ISO	Riduttore 1/2" → 1/4"
12	Valvola	Tubo monte valvola
13	Valvola	Valvola 1/4"
14	Valvola	Tubo valle valvola
15	Valle Valvola	Raccordo 1/4" → 1/2"
16	Valle Valvola	Camlock 1/2"
17	Regolazione	Strozzatore DN15
18	Scarico	Silenziatore 1/2"

Figura 17 - Lista dei componenti del banco prova

La scelta di adoperare questo layout è il risultato di un processo progettuale evoluto combinando l'analisi delle prescrizioni della normativa con lo studio delle proprietà fluidodinamiche del flusso che attraversa il banco prova. Inoltre, la presente configurazione è realizzata dividendo la zona di misura dalla zona destinata all'alloggiamento della valvola in prova. Tale scelta permette di semplificare le operazioni montaggio e sostituzione dei diversi componenti del banco.

Definizione del campo operativo e scelta della valvola in prova

Il primo passo del processo di dimensionamento è consistito nell'individuazione del componente che determina la portata smaltita dal banco. Nel caso in esame, tale componente è rappresentato dalla valvola in prova, a causa delle sue dimensioni ridotte. Le sue caratteristiche sono state definite a partire dalle caratteristiche pneumatiche e, successivamente, si è verificato che le condizioni operative siano confacenti con i limiti di applicabilità previsti dalla ISO 5167.

Di seguito è presente una breve digressione che espliciti il procedimento adoperato per il calcolo della portata massima.

La portata viene fornita in normal-litri al minuto [Nl/min], cioè riferita a condizioni normali di pressione e temperatura. Il catalogo, della valvola scelta, esplicita le condizioni normali considerate:

$$\begin{cases} P_N = 1 \text{ bar} \\ T_N = 293,15 \text{ K} \end{cases}$$

Tali condizioni coincidono con quelle che definiscono le condizioni ANR (Atmosfera Normale di Riferimento) secondo la normativa ISO 8778 [17].

Si procede, quindi, alla conversione della portata dalla condizione normale a quella reale, corrispondente a quella operativa sul banco prova. La relazione utilizzata a tale scopo è la seguente:

$$Q_{V, reale} = Q_N \frac{P_N}{P_{reale}} \frac{T_{reale}}{T_N}$$

Di cui:

- $Q_{V, reale}$: portata volumetrica in condizioni reali;
- Q_N : portata volumetrica in condizioni normali;
- P_N, T_N : pressione e temperatura normali;
- P_{reale}, T_{reale} : pressione e temperatura nelle condizioni operative del banco.

Tale formulazione deriva dall'uguaglianza della portata massica nelle due condizioni di riferimento, ipotizzando che non siano presenti dissipazioni massiche nel passaggio tra la condizione normalizzata a quella reale.

Come indicato anche nella normativa ISO 5167, risulta indispensabile esplicitare le condizioni di lavoro, poiché il fluido evolvente è aria e le suddette considerazioni ne modificano la densità e, quindi, il volume occupato.

Non conoscendo a priori la portata che attraverserà l'impianto e dovendo dimensionare un banco adatto alla valutazione della portata di valvole di piccola taglia, si è scelto di considerare il modello più piccolo disponibile a catalogo: una valvola Metal Work serie 70 con attacco da 1/8", avente i seguenti dati:

$$\begin{cases} C = 121.43 \frac{Nl}{min \text{ bar}} \\ b = 0.32 \\ D_N = 5 \text{ mm} \end{cases}$$

Il parametro D_N rappresenta il diametro nominale di ingresso della valvola, mentre C e b sono i coefficienti pneumatici che ne descrivono il comportamento fluidodinamico. In particolare, il coefficiente C rappresenta la conduttanza di una valvola, ossia la capacità di lasciarsi attraversare dal fluido; il coefficiente b è definito rapporto critico e rappresenta il rapporto tra le pressioni di monte e di valle, al di sotto del quale il componente opera in regime sonico, condizione per cui la portata rimane costante.

Si assuma la pressione assoluta a monte della valvola pari a:

$$p_1 = 7 \text{ bar (a)}$$

Al fine di calcolare la portata massima, si utilizzi la seguente formula, secondo la normativa ISO 6358 [18]:¹

$$Q_{N,max} = Cp_1 \sqrt{\frac{T_N}{T}}$$

$$Q_{N,max} = 121.43 * 7 \cong 850 \text{ Nl/min}$$

Dopo aver definito la portata massima, si stabilisce la portata minima di progetto. A tale scopo, si introduce il parametro definito “turndown di portata”, che rappresenta il rapporto tra il valore massimo ed il valore minimo della portata:

$$TD_Q = \frac{Q_{max}}{Q_{min}}$$

Il valore assunto è il seguente:

$$TD_Q = 5 : 1$$

Da cui:

$$Q_{N,min} = \frac{850}{5} = 170 \text{ Nl/min}$$

¹ La normativa ISO 6358 esplicita le relazioni da utilizzare al fine di calcolare la portata normale in funzione del rapporto tra le pressioni agenti sul dispositivo in esame:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_N = Cp_1 \sqrt{1 - \left(\frac{r-b}{1-b}\right)^2} \sqrt{\frac{T_N}{T_1}} \rightarrow b \leq x \leq 1 \\ Q_N = Cp_1 \sqrt{\frac{T_N}{T_1}} \rightarrow x \leq b \end{array} \right.$$

Quindi il range di portata atteso è il seguente:

$$170 \div 850 \text{ Nl/min}$$

La portata volumetrica reale quindi risulta pari a:

$$Q_{reale} = Q_N * \frac{p_N}{p_{reale}} * \frac{T_{reale}}{T_N}$$

$$\begin{cases} Q_{reale,max} = 2.02 * 10^{-3} \frac{m^3}{s} \\ Q_{reale,min} = 4.05 * 10^{-4} \frac{m^3}{s} \end{cases}$$

Convertendo i valori di portata volumetrica in portata massica, si ottiene:

$$\dot{m} = \rho Q_V$$

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

$$\begin{cases} \dot{m}_{reale,max} = 0.017 \frac{kg}{s} \\ \dot{m}_{reale,min} = 0.003 \frac{kg}{s} \end{cases}$$

La scelta del turndown di portata è particolarmente importante nello studio del sistema, in quanto la portata risulta proporzionale alla radice quadrata della differenza di pressione:

$$Q \propto \sqrt{\Delta p}$$

Di conseguenza:

$$\frac{\Delta p_{max}}{\Delta p_{min}} = \left(\frac{Q_{max}}{Q_{min}} \right)^2$$

Pertanto, un turndown di portata pari a 5:1 corrisponde ad un rapporto di pressione pari a 25:1. Un aumento eccessivo di tale parametro renderebbe critica la misura della pressione, in corrispondenza dei valori minimi di portata. La normativa dedica un'appendice all'approfondimento di questo argomento, evidenziando come con lo sviluppo tecnologico abbia permesso di raggiungere turndown più elevati.

Turndown Portata	Turndown Differenza di pressione
3:1	9:1
5:1	25:1
10:1	100:1

Figura 18 - Propagazione del Turndown

Dopo aver ricavato i valori di portata, si procede a definire i restanti parametri che verifichino i limiti imposti dalla ISO 5167. Il rispetto di tali vincoli è particolarmente importante, poiché, qualora il sistema operi all'interno di tali campi di applicabilità, gli orifizi standard possono essere utilizzati senza che sia necessaria una calibrazione specifica.

Nel caso di orifizio con prese di pressione flangiate, i limiti imposti sono:

- $d \geq 12,5 \text{ mm}$;
- $50 \leq D \leq 1000 \text{ mm}$;
- $0,1 \leq \beta \leq 0,75$
- $Re_D \geq 5000$.

dove d è il diametro dell'orifizio nella piastra, D è il diametro interno della tubazione, β il rapporto tra d e D , ed infine Re_D indica il numero di Reynolds del fluido all'interno del condotto al cui interno è installato il diaframma.

Dato che le condizioni relative ai diametri non dipendono dalla valvola in prova, la condizione critica è rappresentata dal valore minimo del numero di Reynolds.

$$Re_{D,min} = \frac{\rho v_{min} D}{\mu}$$

Di cui:

$$v_{min} = \frac{Q_{v,min}}{A_D}$$

$$A_D = \frac{\pi D^2}{4}$$

Note le portate volumetriche nelle condizioni di massimo e minimo, il valore di D viene assunto pari al minimo consentito dalla normativa. Tale scelta è motivata dal fatto che la lunghezza

complessiva dell'impianto risulta direttamente proporzionale al diametro della sezione di misura; pertanto, al fine di contenere l'ingombro del banco prova, si adotta il valore minimo ammissibile.

$$D = 50 \text{ mm}$$

Di conseguenza, le velocità sono pari a:

$$\begin{cases} v_{max} = 1.03 \frac{m}{s} \\ v_{min} = 0.206 \frac{m}{s} \end{cases}$$

Il numero di Reynolds risulta pari a:

$$\begin{cases} Re_{D,min} = 4765 \\ Re_{D,max} = 23821 \end{cases}$$

Tale valore del numero di Reynolds rappresenta una violazione dei limiti di applicabilità previsti dalla normativa; pertanto, la valvola di taglia 1/8" è stata scartata.

A seguito della criticità riscontrata nella prima configurazione, la procedura è stata ripetuta considerando una valvola con attacco 1/4". Le sue proprietà sono:

$$\begin{cases} C = 264.26 \frac{Nl}{min \text{ bar}} \\ b = 0.27 \\ D_N = 7.5 \text{ mm} \end{cases}$$

Di seguito sono raggruppati i risultati ottenuti per tale valvola.

Riepilogo delle caratteristiche per la valvola 1/4"			
Grandezza	Simbolo	Valore	Unità
Diametro nominale	D	0,05	m
Conduttanza	C	264,26	Nl/min · bar
Rapporto critico	β	0,25	-
Pressione di lavoro	P_{reale}	7	bar (a)
Temperatura di lavoro	T_{reale}	293,15	K
Portata normale massima	$Q_{N,max}$	1850	Nl/min
Turndown di progetto	TD_Q	5	-
Portata normale minima	$Q_{N,min}$	369,96	Nl/min
Portata reale massima	$Q_{max,reale}$	264,3	l/min
Portata reale minima	$Q_{min,reale}$	52,9	l/min
Portata massica massima	m_{max}	0,0366	kg/s
Portata massica minima	m_{min}	0,0073	kg/s
Pressione differenziale max	Δp_{max}	14401	Pa
Pressione differenziale min	Δp_{min}	576,04	Pa
Reynolds massimo	$Re_{D,max}$	51842	-
Reynolds minimo	$Re_{D,min}$	10368	-

Figura 19 - Caratteristiche della valvola 1/4"

L'analisi della valvola da 1/4" ha evidenziato che, in questo caso, il limite viene ampiamente rispettato. Pertanto, l'analisi del comportamento del flusso all'interno del banco prova può continuare con l'analisi della variazione di pressione tra monte e valle del dispositivo primario.

Differenza di pressione ai capi del dispositivo primario

La normativa ISO 5167 fornisce le indicazioni per realizzare un calcolo iterativo per la determinazione della differenza di pressione, a partire dai valori di portata e dei parametri geometrici della sezione di misura. Tale calcolo è stato implementato all'intero del software MATLAB. L'implementazione della procedura è esplicitata nel capitolo dedicato allo sviluppo dei codici.

Al fine di verificare la correttezza di tale codice e, quindi, del calcolo automatico, si è deciso di realizzare un modello teorico semplificato. Tale modello permette di valutare la coerenza fisica dei risultati ottenuti e di stimare gli ordini di grandezza delle grandezze coinvolte.

Si consideri un tratto di tubazione orizzontale, a sezione circolare e perfettamente liscia, nel quale è inserito una piastra a orifizio.

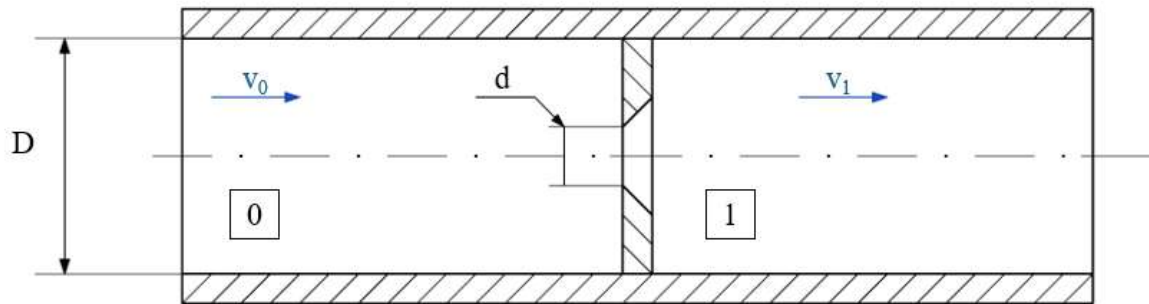


Figura 20 - Sistema in analisi

Si considerino le seguenti ipotesi:

- Moto stazionario;
- Fluido incomprimibile;
- Portata massica costante lungo la sezione di misura;
- $z_0 = z_1$;
- $v_0 \approx 0$.²

Si applichi l'equazione di Bernoulli tra la sezione 0 e la sezione 1, che rappresenta la sezione contratta.

$$p_0 = p_1 + \frac{1}{2} \rho_1 v_1^2$$

$$\Delta p = p_0 - p_1 = \frac{1}{2} \rho_1 v_1^2$$

La velocità ha, quindi, la seguente espressione:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

² L'ipotesi di velocità nulla è credibile in quanto la sezione di monte del diaframma è molto maggiore del diametro dell'orifizio, quindi, la velocità di monte sarà trascurabile rispetto a quella nella sezione contratta.

Inoltre, la portata volumetrica è espressa come il prodotto tra la velocità media del flusso e l'area di passaggio. Tuttavia, il getto reale non riesce ad occupare tutta l'area dell'orifizio; quindi, si aggiunge un coefficiente correttivo C , che tiene conto della contrazione della vena fluida.

$$Q = CA_1 v_1$$

Dove:

$$A_1 = \frac{\pi d^2}{4}$$

Sostituendo l'espressione della velocità, si ricava:

$$Q = CA_1 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

Da cui si troverà l'espressione della differenza di pressione:

$$\Delta p = \left(\frac{Q}{CA_1} \right)^2 \frac{\rho}{2}$$

Questa espressione, oltre a permetterci di calcolare la differenza di pressione in funzione della portata che attraversa il dispositivo primario, permette di evidenziare la forte dipendenza tra le due grandezze. Infatti, come accennato precedentemente, la relazione di proporzionalità è di tipo quadratico: una riduzione della portata determina una diminuzione molto marcata della differenza di pressione.

Applicando tale modello i valori di pressione ricavati sono i seguenti:

$$\begin{cases} \Delta p_{max} = 14401 \text{ Pa} \\ \Delta p_{min} = 576 \text{ Pa} \end{cases}$$

I risultati ottenuti dallo script MATLAB presentano una buona coerenza con il calcolo analitico. Il modello, quindi, conferma la correttezza del codice e dimostra che le relazioni tra i fenomeni fisici, seppur semplificate, sono state considerate correttamente.

La valvola da 1/4" viene quindi scelta come riferimento per il dimensionamento del banco prova. Tale scelta consente di avere un campo di portata più ampio e, contestualmente, di aumentare il valore della differenza di pressione minima misurabile. Ciò rende la misurazione più agevole e semplifica la scelta dei trasduttori di pressione

Di seguito sono riportate una tabella di riepilogo delle caratteristiche della valvola da 1/4" ed una tabella adibita al confronto tra le due configurazioni analizzate.

Riepilogo delle caratteristiche per la valvola 1/4"			
Grandezza	Simbolo	Valore	Unità
Diametro nominale	D	0,05	m
Conduttanza	C	264,26	Nl/min · bar
Rapporto critico	β	0,25	-
Pressione di lavoro	P_{reale}	7	bar (a)
Temperatura di lavoro	T_{reale}	293,15	K
Portata normale massima	$Q_{N,max}$	1850	Nl/min
Turndown di progetto	TD_Q	5	-
Portata normale minima	$Q_{N,min}$	369,96	Nl/min
Portata reale massima	$Q_{max,reale}$	264,3	l/min
Portata reale minima	$Q_{min,reale}$	52,9	l/min
Portata massica massima	m_{max}	0,0366	kg/s
Portata massica minima	m_{min}	0,0073	kg/s
Pressione differenziale max	Δp_{max}	14401	Pa
Pressione differenziale min	Δp_{min}	576,04	Pa
Reynolds massimo	$Re_{D,max}$	51842	-
Reynolds minimo	$Re_{D,min}$	10368	-

Figura 21 - Riepilogo caratteristiche valvola 1/4"

Confronto tra le valvole					
<i>Valvola</i>	$Q_{N,max}$ [Nl/min]	$Q_{N,min}$ [Nl/min]	Δp_{max} [Pa]	Δp_{min} [Pa]	$Re_{D,min}$ [-]
1/8"	850	170	3041	121,6	4764
1/4"	1850	370	14401	576	10368

Figura 22 - Confronto tra valvola da 1/4" e 1/8"

Scelta della geometria del diaframma

Dopo aver definito il campo operativo, si definisce la geometria del dispositivo primario, ossia della piastra con orifizio. In questa fase, le esigenze da coniugare sono la compattezza del banco e

la necessità di realizzare una variazione di pressione sufficientemente elevata anche nelle condizioni peggiori, corrispondenti alla portata minima.

La geometria del diaframma è rappresentata in Figura 23. La freccia 1 indica la faccia che deve essere rivolta verso monte, mentre la faccia 2 è orientata a valle. La lettera E indica lo spessore della piastra mentre e indica lo spessore della parte interna dell'orifizio. L'angolo α rappresenta l'inclinazione dello smusso sul lato di valle.

Dal punto di vista geometrico, la piastra deve essere circolare e concentrica rispetto all'asse della tubazione. Le due facce devono risultare piane e parallele. In particolare, la faccia di monte deve presentare una finitura superficiale contenuta. Inoltre, il bordo G deve essere privo di bave, affilato e perfettamente perpendicolare alla faccia di monte. Invece, gli spigoli H e I presentano prescrizioni meno restrittive, in quanto il flusso a valle è ormai già separato.

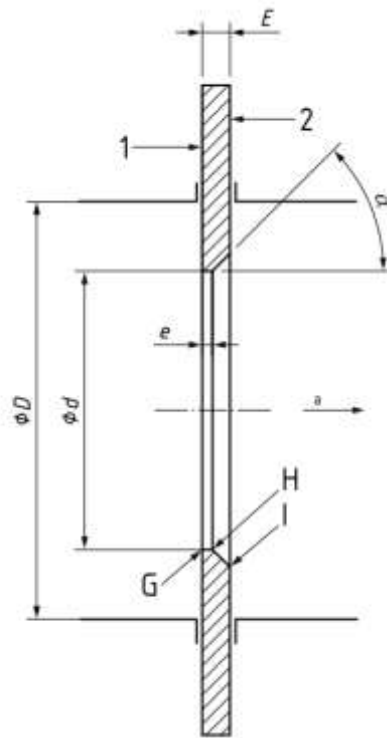


Figura 23 - Geometria della piastra con orifizio secondo ISO 5167-2 [8]

I limiti geometrici stabiliti dalla ISO 5167 sono i seguenti:

$$\begin{cases} d \geq 12.5 \text{ mm} \\ 50 \text{ mm} \leq D \leq 1000 \text{ mm} \\ 0.1 \leq \beta \leq 0.75 \end{cases}$$

In cui D è il diametro interno della tubazione, d è il diametro dell'orifizio e β è il rapporto diametrico definito come:

$$\beta = \frac{d}{D}$$

Il diametro D scelto è il valore minimo permesso dalla normativa:

$$D = 50 \text{ mm}$$

Nonostante rappresenti il valore minimo, la tubazione risulta comunque sovradimensionata rispetto alle portate in esame. Dal punto di vista della misura della differenza di pressione, avere un tubo così grande non rappresenta un vantaggio, poiché risulta necessario avere un diaframma con un orifizio molto piccolo per realizzare il massimo salto di pressione possibile.

Pertanto, il valore del parametro d viene assunto pari a:

$$d = 12.5 \text{ mm} \rightarrow \beta = \frac{12.5}{50} = 0.25$$

Mediante il calcolo automatico delle pressioni è possibile ricavare i valori delle pressioni nei diversi scenari considerati:

Tabella dei risultati						
D	[m]	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
β	[-]	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45
d	[m]	0,0125	0,015	0,0175	0,02	0,0225
A_1	[m ²]	0,0001	0,00018	0,0002	0,0003	0,0004
$\Delta p_{\max}$	[Pa]	14401	6945	3749	2197	1372
$\Delta p_{\min}$	[Pa]	576,04	277,80	149,95	87,90	54,87

Figura 24 - Effetto del parametro β sulla pressione differenziale

Dalla tabella risulta evidente come l'aumento del parametro β si traduca in una riduzione della differenza di pressione generata.

In conclusione, la geometria finale adottata sarà la seguente:

$$\begin{cases} D = 50 \text{ mm} \\ d = 12.5 \text{ mm} \\ \beta = 0.25 \end{cases}$$

La differenza di pressione, invece, varrà:

$$\begin{cases} \Delta p_{min} = 576 \text{ Pa} \\ \Delta p_{max} = 14401 \text{ Pa} \end{cases}$$

Prese di pressione e gruppo flange - diaframma

Per le piastre con orifizio, la ISO 5167-2 individua tre configurazioni standard: le corner taps, con le aperture poste a filo delle due facce della piastra; le prese D e D/2, collocate rispettivamente a D e $0,5D$ dalla faccia di monte; e le flange taps, poste a 25,4 mm dalle rispettive facce della piastra. Nel presente banco sono state adottate le flange taps, poiché consentono di integrare le prese nel gruppo flange-diaframma, semplificando la lavorazione e limitando gli ingombri complessivi.

Le prese sono ricavate all'interno delle flange che alloggianno la piastra. Tale soluzione permette di semplificare la lavorazione e, allo stesso tempo, minimizzare gli ingombri complessivi.

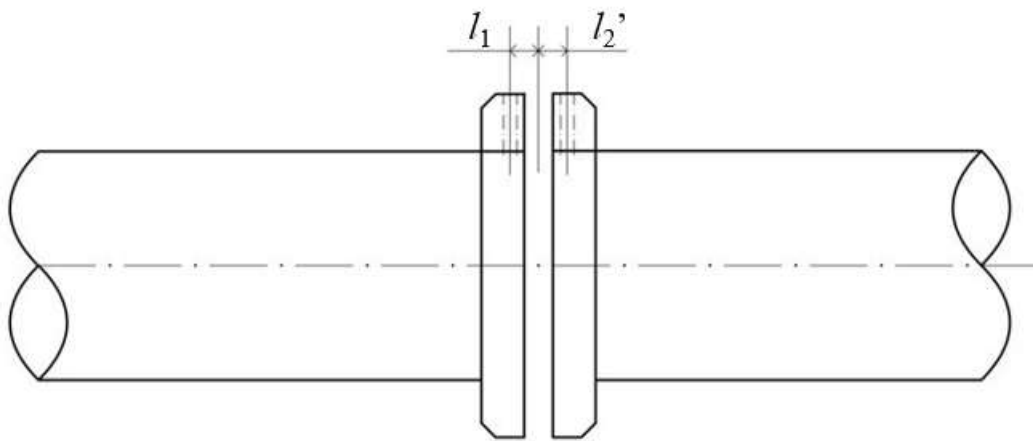


Figura 25 – Schema prese di pressione ricavate sulla flangia

La distanza prevista da questa configurazione è la seguente:

$$l_1 = l_2' = 25.4 \text{ mm}$$

Tali lunghezze vengono misurate rispettivamente a partire dalla faccia di monte e di valle della piastra.

Al fine di dimensionare il banco è stata assunta una lunghezza assiale complessivi del gruppo pari a:

$$L_{flange/orifizio} = 180 \text{ mm}$$

Tale valore sarà usato successivamente per la verifica degli ingombri complessivi del banco.

Poiché tali componenti sono ampiamente utilizzati in ambito industriale, è possibile ricorrere a gruppi commerciali preassemblati, costituiti da diaframma, flange e prese di pressione, dichiarati dal costruttore conformi alla ISO 5167. Il gruppo può quindi essere collegato direttamente al tratto di tubazione dedicato alla misura, riducendo le lavorazioni necessarie e semplificando il montaggio.

Lunghezze rettilinee e condizionatore di flusso

L'aspetto più significativo e maggiormente trattato all'interno della normativa ISO 5167 è rappresentato dalla prescrizione delle lunghezze rettilinee minime da garantire a monte della sezione di misura. Tali lunghezze sono necessarie affinché il flusso risulti il più possibile regolare e privo di componenti rotatorie significative.

Il vincolo alla base della tesi, costituito dal rispetto di una lunghezza assiale complessiva pari a due metri, rende questa fase cruciale. Dopo aver esaminato diverse configurazioni, si è concluso che il banco non può essere realizzato senza l'inserimento di un condizionatore di flusso.

Un'ulteriore aspetto da considerare è la validità del condizionatore adottato. Infatti, la normativa definisce specifici modelli ritenuti idonei. Tra quelli proposti, è stato scelto il condizionatore di flusso Zanker. Il suo impiego permette di ridurre le lunghezze rettilinee minime necessarie, correggendo il profilo delle velocità del flusso.

Affinché tale dispositivo sia applicato, la ISO 5167 – 2 prescrive:

$$L_f \geq 17 D$$

Dove L_f è la distanza tra il diaframma ed il disturbo di monte più vicino. Invece, la distanza tra la faccia di valle del condizionatore ed il diaframma deve essere compresa nel seguente range:

$$7.5D \leq L_s \leq L_f - 8.5D$$

La configurazione è valida finché è rispettata la seguente condizione:

$$\beta \leq 0.67$$

Sostituendo con il valore scelto per il diametro nominale del tubo D :

$$\begin{cases} L_f = 850 \text{ mm} \\ L_s = 375 \text{ mm} \\ L_f - L_s = 475 \text{ mm} \end{cases}$$

Il condizionatore Zanker verrà inserito all'interno del tubo DN50 mediante un collegamento flangiato. La normativa descrive la geometria dell'elemento: una piastra caratterizzata da 32 fori, aventi 5 misure differenti dei diametri, proporzionali al diametro interno della tubazione.

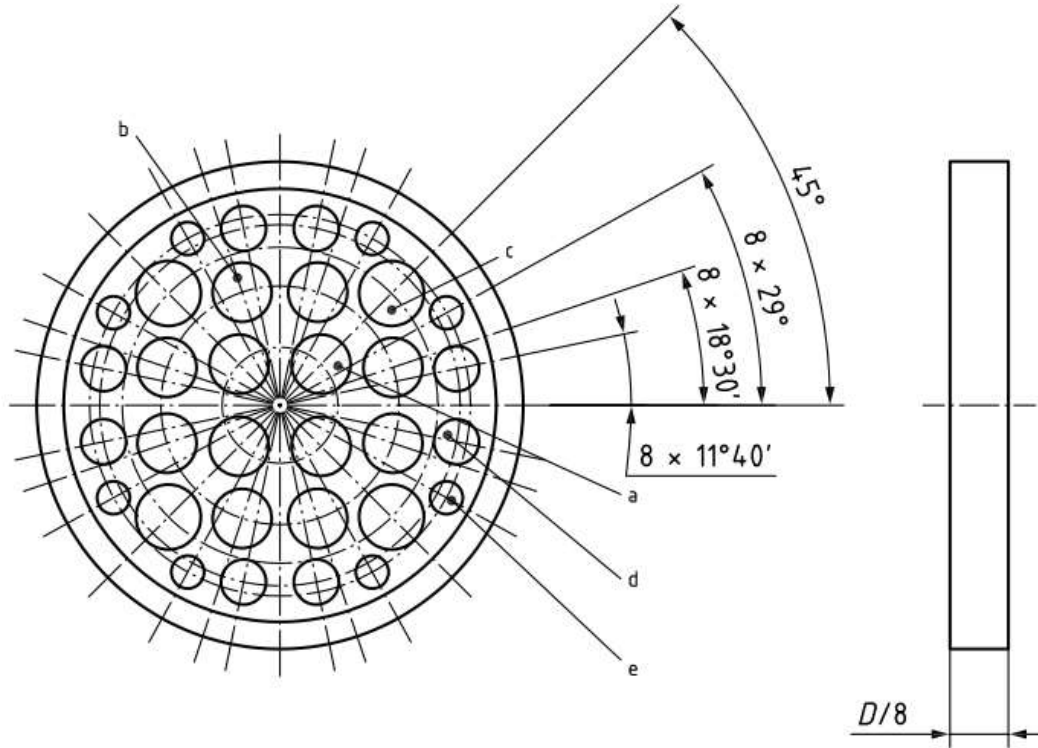


Figura 26 - Geometria del condizionatore di flusso Zanker [8]

- a. Corona circolare interna con fori di diametro: $D = 0,141D \pm 0,001D$, disposti su una circonferenza primitiva $0,25D \pm 0,0025D$;
- b. Corona circolare interna con fori di diametro: $D = 0,139D \pm 0,001D$, disposti su una circonferenza primitiva $0,56D \pm 0,0056D$;
- c. Corona circolare interna con fori di diametro: $D = 0,1365D \pm 0,001D$, disposti su una circonferenza primitiva $0,75D \pm 0,0075D$;
- d. Corona circolare interna con fori di diametro: $D = 0,110D \pm 0,001D$, disposti su una circonferenza primitiva $0,85D \pm 0,0085D$;
- e. Corona circolare interna con fori di diametro: $D = 0,077D \pm 0,001D$, disposti su una circonferenza primitiva $0,90D \pm 0,009D$;

Mentre, lo spessore della piastra dovrà essere:

$$0,12D \leq t_c \leq 0,15D$$

Di seguito è presentata la configurazione attuale del banco prova con le rispettive quote.

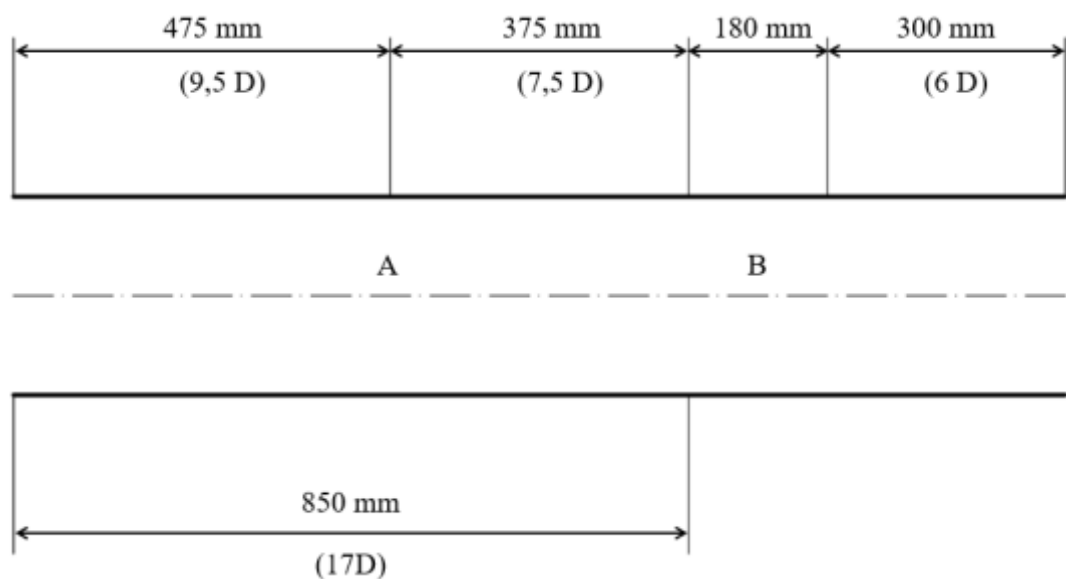


Figura 27 - Configurazione della sezione ISO

Le lettere A e B indicano rispettivamente le posizioni occupate dal condizionatore di flusso e dal dispositivo primario.

Si consideri il montaggio della piastra nel condotto di misura ISO. La normativa ISO 5167 specifica solo la geometria della piastra Zanker ma lascia alla discrezione dell'operatore come configurarlo all'interno della tubazione.

Nel caso in esame il bloccaggio viene realizzato mediante due flange derivate dalla geometria EN 1092-1 tipo 11, DN 50 PN16 [19].

Le flange hanno la forma "Weld neck" e sono collegate alla tubatura mediante saldatura testa a testa. Questa configurazione permette di evitare grandi discontinuità, causate da diversi tipi di saldatura, all'interno del tubo ISO che lo renderebbero inadatto alla misurazione rispettando la normativa. Effettuata la saldatura però sarà necessario un processo di finitura interno, al fine di compensare le discontinuità introdotte dal processo di unione.

Al fine di rendere possibile l'alloggiamento della piastra, su entrambe le facce della flangia vengono ricavate due sedi di forma cilindrica di profondità 3 mm. Tale sistema ha lo scopo di bloccare la piastra e contemporaneamente centrarla rispetto all'asse della tubazione. Inoltre, è prevista anche la presenza di due O-ring, alloggiati nelle rispettive cave, in modo da favorire la tenuta pneumatica delle due interfacce.

Il serraggio del gruppo è realizzato mediante l'utilizzo di quattro bulloni M16, disposti sulla circonferenza di foratura della flangia.

La distanza L_s deve essere misurata dalla faccia di valle effettiva della piastra Zanker fino al piano del dispositivo primario.

Tratti rettilinei a monte ed a valle della valvola in prova

Al fine di dimensionare i tratti rettilinei a monte e a valle della valvola in prova, con le relative prese di pressione, si è preso come modello la normativa ISO 6358. Le principali indicazioni sono le seguenti:

Aspetto	Indicazione ISO 6358	Scelta progettuale
Geometria dei tubi	Tratti rettilinei, circolari e a diametro costante	Tratti rettilinei, circolari e a diametro costante
Superficie interna	Regolare e priva di discontinuità	Raccordi esclusi dalla zona di misura
Prese di pressione	Perpendicolari all'asse e prive di bave	Prese ricavate sui due tratti rettilinei
Diametro per attacco G1/4	Diametro interno indicato dalla norma pari ad almeno 9 mm	$D_{\text{interno}} = 7,5 \text{ mm}$
Lunghezza del tubo di misura	Configurazione normalizzata pari a $13d_1$	$L = 10 D_{\text{interno}}$ per ciascun lato
Posizione dei disturbi	Esterni alla zona di misura	Riduzioni e strozzatore posti oltre i tratti rettilinei

Figura 28 - Scelte progettuali monte e valle della valvola in prova

Quindi a monte ed a valle della valvola in prova vengono adottati due tratti rettilinei della medesima sezione:

$$L_m = L_v = 10 \cdot D_v = 75 \text{ mm}$$

Tale valore rappresenta un compromesso tra il contenimento dell'ingombro del tratto in esame, la regolarizzazione del flusso e l'attendibilità delle pressioni rilevate.

Verifica della lunghezza complessiva del banco

Dopo aver definito la lunghezza della sezione di misura, è necessario verificare tale lunghezza rispetto agli ingombri definiti in fase progettuale:

$$L_{\text{tot}} \approx 2 \text{ m}$$

La lunghezza complessiva della sezione di misura risulta pari a:

$$L_{\text{ISO}} = 850 + 180 + 300 = 1330 \text{ mm}$$

Ragion per cui, rimangono disponibili:

$$L_{disp} = 670 \text{ mm}$$

Tale lunghezza rappresenta la disponibilità rimanente per allocare i restanti componenti del banco, più precisamente costituiti dal il regolatore di pressione, dalla valvola in prova, dagli adattatori, dallo strozzatore e dal silenziatore.

Prima di definire l'ingombro complessivo del banco, è stato necessario analizzare i collegamenti delle sue diverse sezioni. Il problema di questo aspetto è rappresentato dalla necessità di coniugare le portate che attraversano la valvola di piccola taglia ed i vincoli geometrici minimi imposti dalla normativa. Più precisamente, la sezione di misura deve avere un diametro minimo di 50 millimetri, mentre il regolatore di pressione e la linea dedicata alla valvola in prova presentano attacchi sensibilmente più piccoli, rispettivamente G1/2" e G1/4". Il collegamento di tali componenti così diversi rende necessario l'utilizzo di raccordi e riduzioni, che presentano un determinato ingombro longitudinale che non può essere trascurato.

Oltre a ciò, vi è esigenza di poter separare alcune parti del banco. Più precisamente, vi è la necessità di rimuovere la sezione della valvola in prova per permettere di sostituire il componente in prova ed inserire eventuali adattatori per valvole con attacchi differenti da quello assunto in fase di dimensionamento: 1/4". Anche la sezione di misura ISO deve avere la stessa caratteristica, al fine di cambiare il diaframma, qualora sia necessario modificare il campo di pressione differenziale generato ai capi del dispositivo primario.

Per soddisfare entrambe le esigenze, la soluzione è rappresentata dall'utilizzo dei raccordi commerciali di tipo CAMLOCK. Tali raccordi consentono di separare e ricomporre le diverse sezioni del banco, senza avere la necessità di intervenire sui collegamenti permanenti. La loro posizione è scelta in modo che non compromettano l'integrità della sezione di misura.

La tecnologia CAMLOCK nasce in ambito militare statunitense, è composto da due elementi complementari: un raccordo maschio e uno femmina. Il collegamento viene realizzato mediante due leve con un profilo a camma che, durante la chiusura, forzano il raccordo maschio all'interno di quello femmina, assicurandone il bloccaggio e la tenuta.

L'apertura avviene agendo sulle stesse leve: il loro sollevamento elimina la forza di serraggio e permette lo smontaggio rapido del raccordo. [20]

Il principio costruttivo del raccordo CAMLOCK è illustrato in Figura 29. Le lettere M e F identificano la tipologia di raccordo, rispettivamente maschio e femmina. In rosso, invece, è evidenziato il profilo a camma impiegato per il serraggio.

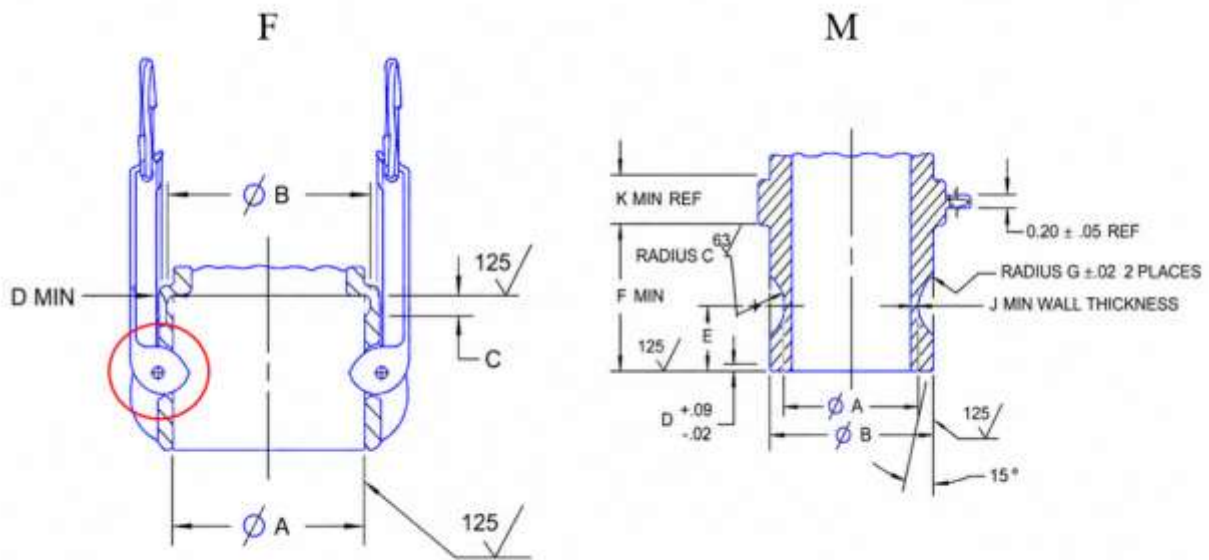


Figura 29 - Schema costruttivo semplificato di un raccordo rapido CAMLOCK [20]

Come già affermato, le diverse sezioni del banco hanno diametri molto diversi tra loro; si rende necessario l'utilizzo di raccordi, ad esempio per il collegamento del tratto di misura ISO con il resto del banco.

Considerando il verso del flusso, a monte è presente un raccordo che collega il regolatore di pressione al tratto di misura, realizzando un'espansione dalla sezione G1/2" alla sezione G2". Invece, a valle vi è una riduzione ancora più brusca; tuttavia, essa è collocata al di fuori dal tratto ISO, quindi, non influenza la qualità del flusso nella valutazione della differenza di pressione ai capi del primario.

Gli effetti di tale riduzione sono mitigati dall'adozione di lunghezze rettilinee minime a monte e valle della valvola in prova. In generale, però, tali elementi sono fonte di grandi disturbi all'interno del flusso, realizzando una distorsione nel profilo delle velocità.

Per ridurre l'effetto della ripida espansione, è stato deciso di realizzare un collegamento conico tra il regolatore ed il raccordo rapido CAMLOCK. In primo luogo, si è previsto un semi-angolo pari a:

$$\phi = 6^\circ$$

Considerando i diametri d'ingresso e d'uscita, si ha un tratto conico lungo:

$$L_{conico} = 181.25 \text{ mm}$$

Il banco registra un aumento dell'ingombro complessivo circa pari a 150 mm.

Al fine di ridurre lo sviluppo assiale, è stato preso in considerazione un secondo raccordo, caratterizzato da un tratto conico più inclinato. In Figura 30 è presente un confronto tra le due soluzioni.

Grandezze		
L_{tot} [mm]	233,25	123
L_{conico} [mm]	181,25	71
ϕ [°]	6	15
2ϕ [°]	12	30

Figura 30 – Confronto tra i raccordi di monte del tratto ISO

La scelta tra i due diffusori richiede un compromesso tra qualità del flusso e ingombro totale. Un tratto più lungo migliora le caratteristiche del flusso, rendendo la transizione più graduale, ma aumenta l'ingombro e le perdite distribuite. Al contrario, un diffusore più corto incrementa il gradiente di pressione avverso, aumentando il rischio di distacco della vena fluida dalla parete.

Dato che il componente è collocato a monte del condizionatore di flusso Zanker, si è scelto di seguire le indicazioni della normativa e trattare il diffusore come l'ultimo disturbo di monte, adoperando il diffusore più corto. Sebbene tale scelta peggiori le condizioni del flusso, la configurazione resta valida, purché siano preservate le lunghezze minime previste.

A valle del tratto ISO sarà presente un secondo raccordo conico, nel verso del flusso svolgerà la funzione di riduttore. Ragion per cui, si genera un gradiente di pressione favorevole, rendendo il componente meno critico.

Al fine di ridurre l'ingombro complessivo del banco si è scelto un riduttore con inclinazione del tratto conico maggiore.

Nella seguente figura è rappresentata la logica a blocchi del banco prova.

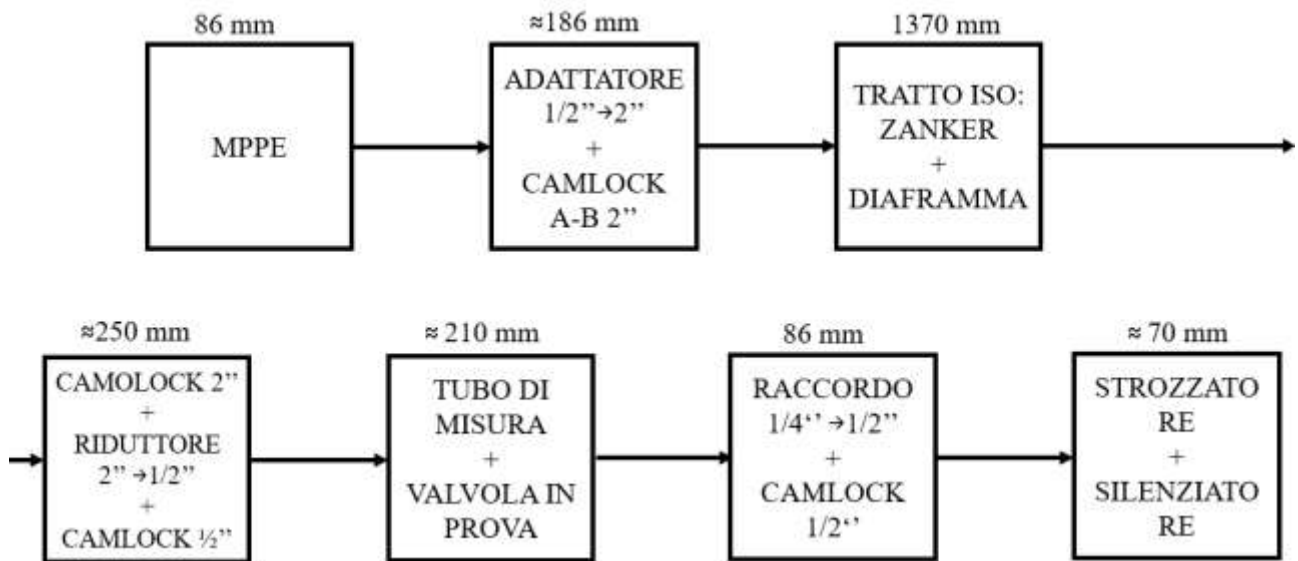


Figura 31 - Schema preliminare a blocchi del banco

La lunghezza complessiva stimata del banco risulta:

$$L_{tot} = 2255 \text{ mm}$$

Rispetto ai 2000 millimetri quantificati in fase di dimensionamento, con uno scostamento pari a:

$$\Delta L = 255 \text{ mm}$$

Tale differenza sia attestata intorno al 12% della lunghezza complessiva del banco.

In Figura 32 è riportato l'insieme degli elementi che compongono il banco e le rispettive lunghezze stimate. Tali lunghezze si basano su vincoli presenti nella normativa, consultazione di cataloghi commerciali e rilevazioni su pezzi già presenti in laboratorio.

N°	Zona	Componente	L scelta [mm]
1	Inizio	MPPE	86
2	Monte ISO	Adattatore 1/2" → 2"	123
3	Monte ISO	Camlock 2" monte (A-B)	63
4	ISO	Tubo DN50 pre-Zanker	425
5	ISO	Zanker flangiato	90
6	ISO	Tubo Zanker-diaframma	375
7	ISO	Diaframma DN50	180
8	Valle ISO	Tubo DN50 valle	300
9	Valle ISO	Camlock 2" valle (A-B)	63
10	Valle ISO	Riduttore 2" → 1/2"	100
11	Valle ISO	Camlock 1/2" valle	50
12	Valle ISO	Riduttore 1/2" → 1/4"	35
12	Valvola	Tubo monte valvola	75
13	Valvola	Valvola 1/4"	60
14	Valvola	Tubo valle valvola	75
15	Valle Valvola	Raccordo 1/4" → 1/2"	35
16	Valle Valvola	Camlock 1/2"	50
17	Regolazione	Strozzatore DN15	50
18	Scarico	Silenziatore 1/2"	20

Figura 32 - Insieme dei singoli componenti e relative lunghezze

Mentre di seguito è riportata una sintesi delle principali scelte progettuali.

Grandezza o componente	Scelta progettuale
Fluido di prova	Aria compressa
Pressione operativa di riferimento	7 bar assoluti
Valvola in prova	Valvola pneumatica G1/4
Conduttanza della valvola	$C=264,26 \text{ NI/min bar}$
Rapporto critico della valvola	$b = 0,27$
Portata normale massima stimata	Circa 1850 NI/min
Turndown adottato	(5:1)
Portata normale minima	Circa 370 NI/min
Diametro interno del tubo ISO	50 mm
Diametro del diaframma	$d = 12,5 \text{ mm}$
Rapporto dei diametri	0,25
Prese di pressione	Flange taps
Distanza nominale delle prese	25,4 mm dalle rispettive facce
Condizionatore di flusso	Piastra Zanker
Distanza Zanker-diaframma	$7,5D = 375 \text{ mm}$
Tratto rettilineo a valle del diaframma	$6D = 300 \text{ mm}$
Adattatore a monte	Diffusore conico compatto
Semiangolo dell'adattatore a monte	Circa 12°
Riduttore a valle	Contrazione conica compatta
Lunghezza complessiva stimata	2205 mm
Scostamento dal valore obiettivo	205 mm

Figura 33 - Sintesi principali scelte progettuali

Conclusione del dimensionamento

Il dimensionamento effettuato ha evidenziato che, mantenendo le prescrizioni previste dalla ISO 5167 ed introducendo gli elementi necessari a renderlo riconfigurabile, non è possibile contenere la lunghezza complessiva entro i due metri. Difatti, la configurazione finale raggiunge una lunghezza totale di 2255 mm, eccedendo del 12%.

Il contenimento dell'ingombro ha richiesto alcuni compromessi progettuali, tra cui l'impiego di raccordi conici più compatti o riduzioni concentrate. Tali elementi non modificano le distanze minime previste per la sezione di misura e non determinano, di per sé, una violazione della ISO 5167; introducono tuttavia distorsioni locali del profilo di velocità e maggiori perdite di pressione. La regolarizzazione del flusso prima del diaframma viene pertanto affidata al tratto rettilineo e al condizionatore Zanker.

Anche i tratti posti a monte e a valle della valvola rappresentano una soluzione di compromesso rispetto alla configurazione indicata dalla ISO 6358. La scelta di lunghezze pari a $10D_v$ consente

di limitare l'ingombro, ma aumenta l'influenza delle perturbazioni locali sulle pressioni misurate in prossimità della valvola.

Il risultato ottenuto deve quindi essere considerato un dimensionamento preliminare: la configurazione individuata rispetta i criteri geometrici adottati per la sezione ISO, ma richiede particolare attenzione nella successiva fase esecutiva e di verifica.

Sviluppo dello script MATLAB

Obiettivo dello script

Il presente lavoro di sviluppo dello script MATLAB rappresenta uno degli elementi cardine del lavoro di tesi, in quanto permette di integrare i dati provenienti dal banco di misura ed elaborarli in conformità alle prescrizioni previste dalla normativa ISO 5167.

I presupposti alla base dello sviluppo dello script sono stati la modularità e la massima leggibilità ottenibile del codice. Di conseguenza, il programma è stato progettato su un unico script principale, predisposto alla logica evolutiva della prova, ed una serie di funzioni ausiliarie, adibite a svolgere un compito specifico.

La scelta di realizzare un sistema modulare è dettata dalla necessità di rendere il programma facilmente fruibile e utilizzabile, anche in futuro, da utenti diversi dallo sviluppatore originario. In generale, all'interno di un banco di prova sperimentale, possono verificarsi modifiche dei componenti o, in generale, delle condizioni di prova. L'adozione di una struttura modulare consente di aggiungere nuove funzioni o modificare quelle esistenti in funzione delle esigenze specifiche, senza dover intervenire massivamente all'interno del codice principale.

Tale approccio può comportare l'insorgere di aspetti critici. Qualora il rapporto tra le funzioni risulti intricato, il sistema potrebbe risultare più fragile, dettando la necessità di lunghi aggiustamenti a cascata. Inoltre, la modularità potrebbe portare all'aumento dell'onere computazionale. Tuttavia, nel caso in esame, il codice presenta dimensioni moderate e, di conseguenza, i tempi di calcolo sono compatibili con le esigenze applicative. [21]

Oltre al calcolo della portata, lo script permette il salvataggio automatico dei dati acquisiti ed elaborati in un file. Tale file può essere utilizzato per elaborare ulteriormente i risultati ottenuti e confrontarli con prove effettuate in condizioni differenti. Quindi, vengono coniugate esigenze di salvataggio, tracciabilità, e confronto delle misurazioni effettuate.

Inoltre, all'interno dello script sono stati implementati i limiti di prova previsti dalla normativa ISO 5167, al fine di evitare che misurazione sia effettuata in condizioni di non conformità. Prima dell'inizio della prova, vengono eseguiti alcuni calcoli preliminari che permettono di stimare il comportamento del fluido e, quindi, valutare se la configurazione del banco rispetti il campo di validità della norma. Tali controlli permettono, se necessario, di intervenire sulla configurazione del banco, ad esempio cambiando il diaframma o modificare le condizioni operative della linea.

In conclusione, lo script rappresenta l'elemento che permette di acquisire, visualizzare ed elaborare i dati prodotti dal dialogo tra il banco di misura di portata, in particolare i trasduttori, e la scheda di acquisizione. La sua funzione è quella di elaborare e salvare in modo organico le informazioni raccolte, coerentemente con le condizioni operative del sistema ed i requisiti previsti dalla normativa.

L'implementazione completa dell'algoritmo di controllo è riportata in Appendice A: Codice sorgente MATLAB.

Architettura generale del programma

Il programma è stato sviluppato seguendo un principio di modularità: è presente lo script principale ed un insieme di funzioni satellite ausiliarie. Lo script principale, così come l'intera struttura del codice, riproduce l'esecuzione della prova sperimentale: esso definisce i parametri iniziali e coordina la sequenza operativa, a partire dai calcoli preliminari fino alla generazione del file di output, che contiene i risultati ottenuti.

La scelta di implementare un codice modulare è stata adottata al fine di favorire la leggibilità e la semplicità del codice, nell'eventualità di modifiche o aggiornamenti futuri. Difatti, ciascuna funzione ha un compito specifico, al fine di identificare efficacemente la porzione di codice interessata ad eventuali modifiche. Nel caso in esame, tale esigenza risulta rilevante, dato che è plausibile che sia richiesto un aggiornamento del codice a causa della sostituzione di un diaframma o una modifica nel setup dei sensori.

In Figura 34 è riportato l'elenco dei file principali file MATLAB. La catalogazione è stata effettuata raggruppando i file in base al rispetto macro-argomento, distinguendo il titolo e le relative funzioni. Tale organizzazione è stata realizzata al fine di creare un collegamento immediato tra la struttura del codice e l'effettiva funzione svolta.

	File MATLAB	Funzione svolta
Script principale	main_prova_portata.m	Coordina la procedura sperimentale, richiama le funzioni principali, gestisce l'acquisizione, il calcolo della portata, la visualizzazione e il salvataggio dei dati.
Funzioni di dimensionamento e controlli preliminari	main_sizing_beta.m	Esegue la procedura di dimensionamento basata sul rapporto diametrale β .
	sizing_beta_orifizio.m	Calcola il diametro dell'orifizio o il rapporto β in funzione delle condizioni operative previste.
	main_sizing_dp.m	Esegue la procedura di dimensionamento basata sulla pressione differenziale attesa.
	sizing_dp_orifizio.m	Stima la pressione differenziale generata dal diaframma per una data configurazione.
	check_limiti_orifizio.m	Verifica il rispetto dei limiti di applicabilità previsti dalla ISO 5167 per l'impiego del diaframma.
Funzioni di acquisizione e conversione dei segnali	test_collegamenti_NI.m	Verifica il corretto collegamento della scheda NI USB-6002 e dei canali utilizzati.
	acquisisci_punto_equilibrio.m	Acquisisce i segnali durante la prova e restituisce i valori associati al punto di equilibrio.
	volt_to_pressure.m	Converte il segnale in tensione nella corrispondente grandezza di pressione.
Funzioni di gestione del punto di prova	verifica_stabilita_punto.m	Controlla se le grandezze acquisite hanno raggiunto una condizione sufficientemente stabile.
	acquisisci_punto_equilibrio.m	Gestisce l'acquisizione dei dati relativi al singolo step, fino al raggiungimento della condizione di equilibrio.
Funzioni di regolazione della pressione a monte	regola_pressione_monte.m	Gestisce la regolazione della pressione a monte del diaframma.
	pressure_to_voltage_MPE.m	Converte il valore di pressione richiesto nel corrispondente segnale di comando per il regolatore proporzionale.
Funzioni di calcolo della portata secondo ISO 5167	portata_orifizio.m	Calcola la portata attraverso il diaframma secondo le relazioni della ISO 5167.
	Re_pipe.m	Calcola il numero di Reynolds riferito alla tubazione.
	epsilon_orifizio.m	Calcola il coefficiente di espansione per fluido comprimibile.
	C_orifizio.m	Richiama la formulazione del coefficiente di efflusso in funzione del tipo di prese di pressione adottate.
	C_orifizio_flange.m	Calcola il coefficiente di efflusso nel caso di prese di pressione di tipo flange taps.
	C_orifizio_corner.m	Calcola il coefficiente di efflusso nel caso di prese di pressione di tipo corner taps.
	C_orifizio_D_D2.m	Calcola il coefficiente di efflusso nel caso di prese di pressione di tipo D e D/2.

Figura 34 -File MATLAB relativi allo script principale e alle funzioni di dimensionamento

Come accennato in precedenza, la logica di sviluppo del codice ricalca la procedura operativa della prova di misura della portata.

La prova sperimentale, dal punto di vista operativo, inizia con l'impostazione della pressione di monte al valore desiderato e con lo strozzatore completamente chiuso. Dopo aver configurato il banco, l'operatore avvierà lo script MATLAB. In tal modo, quando sarà raggiunto l'equilibrio, il sistema acquisirà i dati provenienti dai trasduttori e li elaborerà nello spazio di lavoro sul computer. In queste condizioni, la differenza di pressione ai capi del diaframma sarà praticamente nulla e lo sarà anche la portata, ciò rappresenta il punto d'inizio della prova.

Successivamente, la prova continuerà per il numero di punti scelti. In funzione del numero di tali punti, lo strozzatore verrà aperto di un passo tale da far scendere la pressione di valle, della valvola, fino ad un valore obiettivo preventivato. Per ogni nuova posizione dello strozzatore, l'apertura non produce immediatamente un valore di pressione stazionario: la variazione della sezione di passaggio dello strozzatore genera delle irregolarità nel flusso, un transitorio, che rendono la pressione mutevole fino al raggiungimento del punto di funzionamento. In questa fase interverrà il regolatore di pressione, che compenserà le variazioni e riporterà la pressione al livello preimpostato.

All'esaurimento di tale transitorio, il flusso raggiungerà le condizioni che rappresentano il punto di funzionamento del banco e si potrà acquisire il punto. La medesima procedura verrà seguita per le successive aperture dello strozzatore, fino alla conclusione della prova.

In sintesi, la prova sperimentale si articola in una sequenza, di lunghezza variabile, di stati di equilibrio mediante l'apertura o la chiusura di uno strozzatore. Per ciascuna delle configurazioni ottenute, i risultati vengono salvati esclusivamente qualora superino i test di conformità; in caso contrario, il programma ritorna alla fase di acquisizione e proseguirà finché non si raggiunge la stabilità. In tal modo, ogni punto acquisito rappresenta una configurazione confacente alle specifiche imposte dalla normativa.

Per questo motivo, all'interno dello script, la verifica della stabilità del punto riveste un ruolo di fondamentale importanza nella struttura complessiva. Successivamente, nella sezione dedicata alla descrizione del codice, verranno definite le grandezze necessarie per valutare la stabilità del punto di misura.

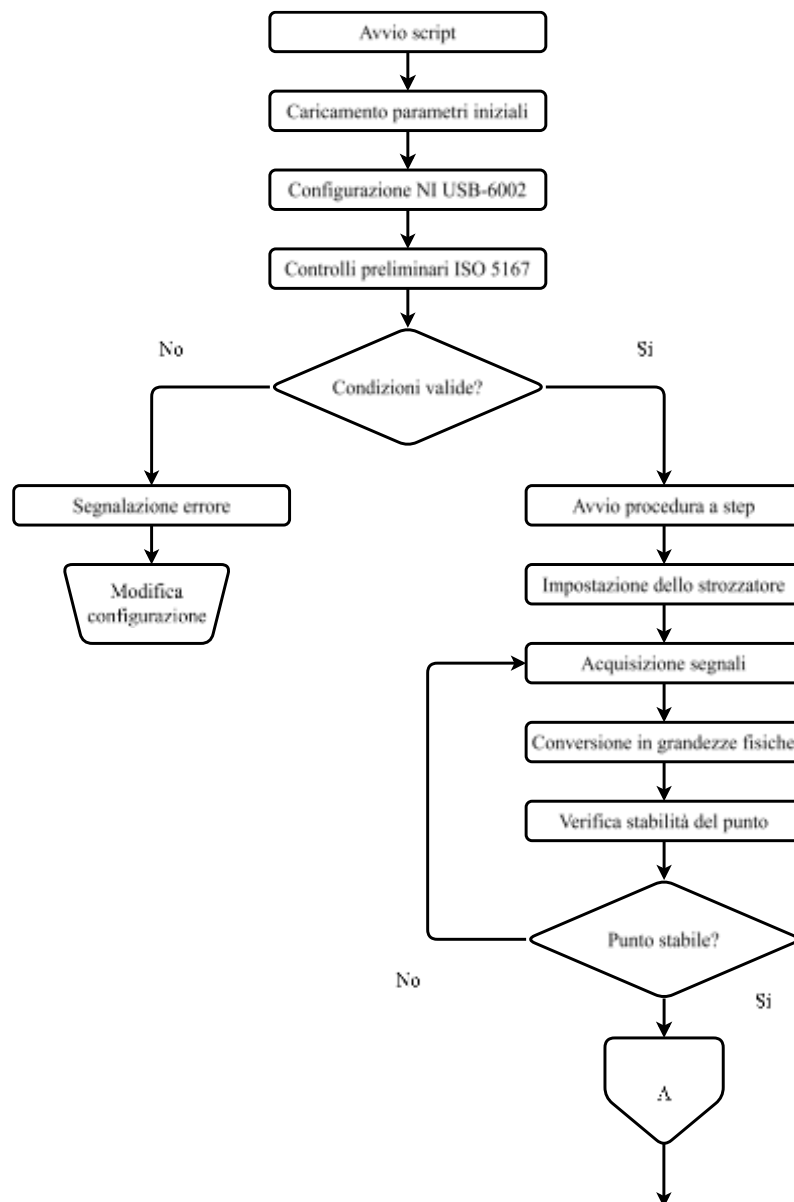


Figura 35 – Flow chart generale della procedura di prova (1)

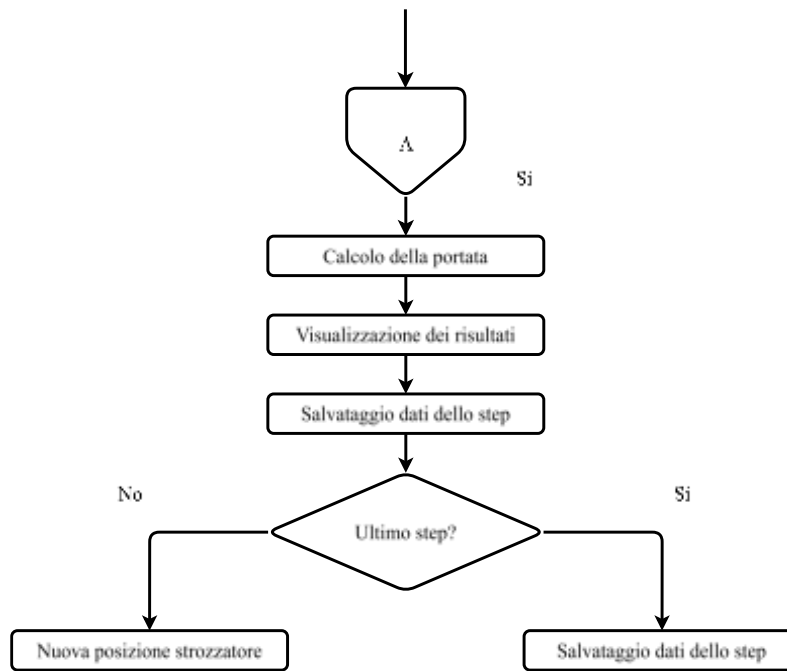


Figura 36 - Flow chart generale della procedura di prova (2)

Come mostrato in Figura 35 ed in Figura 36, il programma si apre con la fase di inizializzazione dei parametri, di configurazione della scheda di acquisizione e di esecuzione dei controlli preliminari confacenti alla normativa ISO 5167. Successivamente, si accede al blocco principale del programma, costituito dal ciclo di misura a step. Nello specifico, si regola la posizione dello strozzatore e si acquisiscono i dati. Qualora sia verificata la stabilità del punto di lavoro, i dati vengono elaborati e salvati; in caso contrario, il programma ritorna alla fase di acquisizione e continua fino a raggiungimento dell'equilibrio.

Come evidenziato in Figura 36, tale sequenza viene reiterata fino al raggiungimento dell'ultimo step della prova. Il numero degli step viene scelto preliminarmente dall'operatore, in funzione delle sue esigenze.

Interfacciamento MATLAB–scheda National Instruments

Al fine di collegare MATLAB ed il banco prova, è necessario utilizzare una scheda di acquisizione dati; è stato scelto di impiegare il modello NI USB-6002 di National Instruments. Questo elemento consente di acquisire i dati provenienti dai sensori e comandare il regolatore di pressione proporzionale.

Tale collegamento non è possibile se non siano installati il Data Acquisition Toolbox di MATLAB ed i driver NI-DAQmx forniti da National Instruments, sul computer di bordo.

Il Data Acquisition permette di configurare l'hardware, acquisire i dati direttamente in MATLAB o Simulink e scrivere segnali sui canali di uscita del sistema DAQ. L'utilizzo di tale strumento risulta indispensabile qualora si intenda automatizzare in MATLAB l'acquisizione dei dati. Inoltre, esso permette di salvare i dati, predisponendo le successive attività di post-elaborazione [22]. Invece, i driver consentono al sistema operativo di individuare la scheda e di configurarla affinché possa essere utilizzata dal software [23]. Nel caso in esame, tale strumento è stato utilizzato per verificare il corretto riconoscimento della scheda e per gestirne la configurazione operativa.

All'interno del pacchetto Data Acquisition il dialogo con la scheda viene comandato con `daq("ni")`.

```
daq = daq("ni");

addinput(dq, "Dev1", "ai0", "Voltage");
addinput(dq, "Dev1", "ai1", "Voltage");
addinput(dq, "Dev1", "ai2", "Voltage");
addinput(dq, "Dev1", "ai3", "Voltage");

addoutput(dq, "Dev1", "ao0", "Voltage");

daq.Rate = 100;
```

Codice 1 - Inizializzazione della scheda NI USB-6002

Nel codice riportato, “Dev1” rappresenta come il sistema operativo identifica il dispositivo. Il nome può variare in funzione della macchina utilizzata o della configurazione della scheda in questione. Difatti, nel codice è presente un commento che indica il parametro come modificabile. Inoltre, sono presenti le caratteristiche dei canali. In particolare, i canali `ai0-ai3` sono gli ingressi analogici in tensione (“Voltage”), ciascuno dei quali rappresenta uno specifico trasduttore del banco prova. Il canale `ao0`, invece, è configurato come un'uscita analogica in tensione, adibita al comando del regolatore di pressione proporzionale.

Qualora si intenda esplicitare le proprietà dei canali, è sufficiente utilizzare il nome dell'oggetto di acquisizione (`dq`) e usarlo come argomento della funzione `get(dq)`.

La frequenza di acquisizione è impostata a 100 Hz. Il presente valore risulta opportuno per la natura quasi statica della prova, nella quale non si è interessati agli aspetti dinamici del comportamento del fluido ma alle sue proprietà in condizioni stazionarie.

La gestione dei canali è stata implementata mediante l'utilizzo di una struttura di dati (`struct`). La struttura consente di contenere le informazioni, catalogandole in contenitori denominati campi (`fields`) [24]. In questo caso, i contenitori sono identificati mediante la sintassi “`channels.<nome`

campo>”. Tale organizzazione permette di associare a ciascun gruppo di dati un nome efficace ed esplicativo, limitando il rischio di errori causati dallo scambio accidentale di dati. Dal punto di vista funzionale, la struttura `channels` definisce una corrispondenza univoca tra le colonne della funzione di acquisizione e le rispettive grandezze misurate.

```
%% 7. MAPPA CANALI

channels.valve_up    = 1;
channels.valve_down = 2;
channels.p1          = 3;
channels.dp          = 4;
```

Codice 2 - Mappa dei canali

In conclusione, tale configurazione del sistema mira alla gestione automatizzata della prova e cerca di stabilire una corrispondenza chiara tra i sensori installati, i canali acquisiti e le grandezze impiegate nel calcolo della portata.

Acquisizione e conversione dei segnali

Il compito di gestire l’acquisizione dei segnali è affidato alla funzione `acquisisci_punto_equilibrio.m`. Tale funzione riceve in ingresso l’oggetto di acquisizione (`dq`), la struttura `channels` e la struttura `params`, nella quale sono definiti i parametri temporali dell’acquisizione.

Il primo blocco della funzione è adibito al controllo degli input. I due cicli `for` permettono di verificare che entrambe le strutture siano state compilate correttamente. Tale controllo è eseguito al fine di evitare l’avvio dell’acquisizione in presenza di parametri mancanti, permettendo di intervenire prima dell’inizio della prova sperimentale.

Il processo di acquisizione vero e proprio dei punti è stato implementato servendosi di un ciclo iterativo `for`. Ad ogni iterazione vengono estratti i segnali in tensione e convertiti nelle rispettive grandezze fisiche. La durata complessiva dell’acquisizione è definita attraverso il parametro `params.window_s`.

```
% Loop acquisizione

for k = 1:params.max_attempts

    % Acquisizione finestra
    TT = read(dq, seconds(params.window_s));

    % Estrazione segnali in Volt
    V_valve_up    = TT(:, channels.valve_up);
    V_valve_down  = TT(:, channels.valve_down);
```

```

V_p1      = TT{:, channels.p1};
V_dp      = TT{:, channels.dp};

% Conversione Volt -> Pressione [Pa]
p_valve_up = volt_to_pressure(V_valve_up, 'TJE');
p_valve_down = volt_to_pressure(V_valve_down, 'TJE');
p1          = volt_to_pressure(V_p1, 'P30');
dp          = volt_to_pressure(V_dp, 'FP2000');

```

Codice 3 - Acquisizione della finestra temporale e conversione dei segnali

Il comando che permette di restituire i dati presenti in un qualsiasi raccoglitore di dati è `read(arg)`. [25]. Nel caso in esame, i dati vengono estratti in diversi vettori colonna, tracciati in base alla posizione in cui la grandezza viene misurata nel banco. Successivamente, i segnali in tensione vengono convertiti nelle corrispondenti pressioni mediante la funzione `volt_to_pressure.m`.

La suddetta funzione implementa la relazione di conversione dei trasduttori di pressione, utilizzati nel banco. Il risultato finale è espresso in Pascal, al fine di poterli usare direttamente nelle successive elaborazioni. Inoltre, al suo interno è presente un controllo sul valore nominale del segnale in ingresso. Tale verifica non interrompe l'esecuzione del programma ma restituisce un'avvertenza di possibili anomalie.

La conversione dei segnali non comporta il salvataggio, infatti è presente una fase intermedia, cioè la verifica di stabilità, implementata con lo script: `verifica_stabilita_punto.m`.

Tale controllo è effettuato sulle due grandezze più importanti: la differenza di pressione Δp e la pressione di monte del diaframma p_1 .

La verifica di stabilità si basa su due parametri statistici adimensionali: il coefficiente di variazione CV , che quantifica la dispersione relativa del segnale, e la deriva relativa D_{rel} , che individua eventuali variazioni sistematiche tra l'inizio e la fine dell'acquisizione. [26] [27]

Per ciascuna grandezza acquisita vengono calcolati il valor medio (`mean`) e la deviazione standard (`std`), da cui:

$$CV = \frac{\sigma}{|\mu| + \varepsilon}$$

Dove σ rappresenta la deviazione standard del segnale, mentre μ ne rappresenta il valore medio.

La deriva relativa, invece, è stata calcolata come la differenza relativa tra la media finale e iniziale dei dati acquisiti:

$$D_{rel} = \frac{|\mu_{end} - \mu_{start}|}{|\mu| + \varepsilon}$$

Il fattore $\varepsilon = 10^{-6}$ è stato aggiunto al fine di evitare possibili divisioni per valori troppo vicini allo zero.

In conclusione, un punto di misura viene considerato stabile se entrambe le grandezze statistiche rispettano le soglie impostate dell'1%. Nel caso in cui il punto non rispetti tale condizione, l'acquisizione viene ripetuta fino al raggiungimento delle condizioni di stabilità richieste.

```
% Deriva (trend)

N = length(dp);
n_win = max(5, round(0.2 * N)); % 20% dei dati

dp_start = mean(dp(1:n_win));
dp_end   = mean(dp(end-n_win+1:end));

p1_start = mean(p1(1:n_win));
p1_end   = mean(p1(end-n_win+1:end));

stats.dp_drift = abs(dp_end - dp_start);
stats.p1_drift = abs(p1_end - p1_start);

% Indicatori relativi

dp_std_rel  = stats.dp_std / max(abs(stats.dp_mean), 1e-6);
p1_std_rel  = stats.p1_std / max(abs(stats.p1_mean), 1e-6);

dp_drift_rel = stats.dp_drift / max(abs(stats.dp_mean), 1e-6);
p1_drift_rel = stats.p1_drift / max(abs(stats.p1_mean), 1e-6);

% Soglie

TH_STD   = 0.01; % 1%
TH_DRIFT = 0.01; % 1%
```

Codice 4 - Criterio di stabilità del punto

Una volta accertata la stabilità del punto di misura, la funzione calcola i valori medi e le deviazioni standard delle grandezze acquisite. Successivamente, i risultati vengono salvati nella struttura `point`, che rappresenta l'insieme delle informazioni associate a un punto acquisito correttamente.

Il principale punto di forza di questo approccio è da identificare nella robustezza dei risultati ottenuti. Ciò trova riscontro nel fatto che invece di scegliere il singolo valore di pressione, il metodo si basa sul suo valore medio. Ciò permette di attenuare l'influenza di elementi di disturbo, ad esempio il rumore elettrico o l'oscillazione intrinseca dei segnali.

Implementazione del calcolo della portata

Il calcolo della portata è stato implementato nella funzione: `portata_orifizio.m`, che costituisce il nucleo numerico dell'intero script. La suddetta funzione riceve in ingresso tutte le informazioni necessarie alla caratterizzazione termodinamica del fluido e alla descrizione geometrica del sistema. In particolare, vengono forniti i parametri:

- D : diametro interno della tubazione;
- d : diametro interno della piastra a orifizio;
- Δp : pressione differenziale ai capi del dispositivo primario;
- p_1 : pressione assoluta a monte del diaframma;
- ρ_1 : densità del fluido a monte del diaframma;
- μ_1 : viscosità dinamica;
- k : esponente isoentropico;

La portata è calcolata mediante la relazione prevista dalla normativa ISO 5167 per i sistemi di misura a pressione differenziale:

$$q_m = \frac{C_\varepsilon}{\sqrt{1 - \beta^4}} \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2 \rho_1 \Delta p}$$

Successivamente, la portata in volume q_V viene calcolata mediante la seguente relazione:

$$q_V = \frac{q_m}{\rho_1}$$

Una delle caratteristiche di maggiore rilevanza nel calcolo della portata è rappresentato dalla natura iterativa del calcolo. Infatti, il coefficiente di efflusso dipende dal numero di Reynolds, il quale, a sua volta, è funzione dalla portata massica. Ragion per cui, è indispensabile realizzare una procedura di calcolo iterativa finalizzata al raggiungimento della soluzione numerica più corretta.

Al fine di rendere il calcolo aderente alla normativa, si è seguita la procedura di calcolo riportata all'interno della normativa ISO 5167. In Figura 37 è presente una versione graficamente rielaborata dello schema di calcolo presente nella normativa.

Fase del calcolo	Relazione utilizzata	Significato
Dati di ingresso	$D, d, \Delta p, \rho_1, \mu_1, k, p_1$	Grandezze geometriche, proprietà del fluido e dati misurati necessari al calcolo.
Rapporto diametrico	$\beta = \frac{d}{D}$	Parametro geometrico del diaframma.
Coefficiente di espansione	$\varepsilon = f(\beta, \Delta p, p_1, k)$	Tiene conto della comprimibilità dell'aria.
Grandezza ausiliaria costante	$A_1 = \frac{\varepsilon(\beta D)^2}{\mu_1 D \sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{2 \Delta p \rho_1}$	Termine costante dell'iterazione, calcolato a partire dai dati noti.
Formula iterativa	$\frac{Re_D}{C} = A_1$	Relazione da soddisfare iterativamente, poiché C dipende da ReD.
Variabile iterativa	$X_1 = Re_D = C A_1$	Valore aggiornato del numero di Reynolds durante l'iterazione.
Criterio di convergenza	$\left \frac{\left(A_1 - \frac{X_n}{C} \right)}{A_1} \right < toll$	Controlla la convergenza del calcolo confrontando l'errore relativo con la tolleranza impostata.
Risultato finale	$q_m = \frac{\pi}{4} \mu_1 D X_1$	Calcolo della portata massica a convergenza raggiunta.
Portata volumetrica	$q_v = \frac{q_m}{\rho_1}$	Conversione della portata massica in portata volumetrica.

Figura 37 - Grandezze utilizzate nella procedura iterativa di calcolo della portata [8]

Il codice si apre con la verifica preliminare della coerenza fisica dei parametri in ingresso. Successivamente, viene calcolato il coefficiente β , una delle grandezze più significative dell'intera procedura, dato che rientra direttamente nella procedura di calcolo ed allo stesso tempo rappresenta uno dei parametri da esaminare al fine di verificare il rispetto del campo di applicabilità della norma.

In seguito, il codice effettua il calcolo del coefficiente di espansione ε , mediante una funzione dedicata. Il suddetto coefficiente è imprescindibile nel caso in esame, poiché rappresenta la comprimibilità del flusso, costituito da aria e pertanto caratterizzato da un comportamento assimilabile ad un gas. Al contrario, qualora il fluido evolvente fosse un liquido, gli effetti di comprimibilità sono trascurabili, quindi, il coefficiente assumerebbe il valore unitario. [8]

```
% Fattore di espansibilita'
```

```
eps = epsilon_orifizio(beta, dp, p1, kappa);
```

Codice 5 - Calcolo del coefficiente di espansione

La versione integrale della funzione è riportata all'interno del Listato 15 - Epsilon orifizio.

Il calcolo iterativo è fondato sulla ricerca del corretto numero di Reynolds, coerente con il coefficiente di efflusso. Più avanti saranno spiegati tutti i parametri introdotti, tra cui il numero di Reynolds. Al fine di rendere più chiara la procedura iterativa del calcolo, in Figura 38 è riportato un diagramma di flusso che ne esplicita la logica di funzionamento.

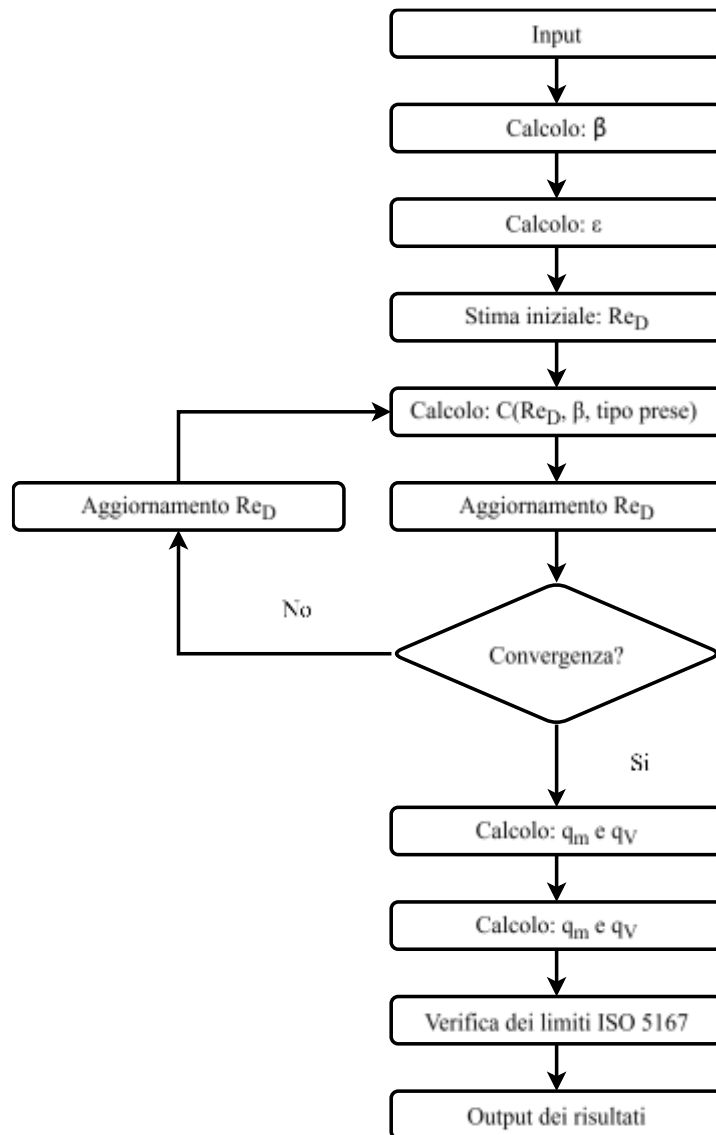


Figura 38 - Diagramma di flusso del calcolo iterativo

Nel codice è introdotta una grandezza ausiliaria, che raggruppi tutti i termini costanti della procedura di calcolo, denominata A_1 . Al suo interno sono presenti sia grandezze geometriche sia le proprietà del fluido.

Al fine della risoluzione del problema, è stato implementato l'algoritmo iterativo, suggerito dalla normativa, di tipo secante. Tramite tale algoritmo, viene aggiornato progressivamente il valore del

numero di Reynolds Re_D fino a quando la differenza tra le due iterazioni raggiunga una certa soglia, definita dal livello di tolleranza impostato dall'operatore.

```
% Invariante A1 (Annex A)

A1 = eps * (D * beta)^2 * sqrt(2 * dp * rho1) / (mu1 * D * sqrt(1 - beta^4));

% First guess 1

C1 = 0.61;           % C_infty
X1_1 = C1 * A1;      % X1 = ReD
ReD1 = X1_1;
C1 = C_orifizio(tap_type, beta, ReD1, D);
delta1 = A1 - X1_1 / C1;

% First guess 2

X1_2 = 1.05 * X1_1;
ReD2 = X1_2;
C2 = C_orifizio(tap_type, beta, ReD2, D);
delta2 = A1 - X1_2 / C2;
```

Codice 6 - Schema di iniziazione del calcolo iterativo del numero di Reynolds

Al fine di preservare la leggibilità del testo, si è optato di dividere la fase di iniziazione dei parametri dall'effettiva procedura di calcolo iterativo.

```
% Iterazione lineare (secante)

for k = 3:Nmax

    if abs(delta2 - delta1) < realmin
        warning('portata_orifizio: denominatore nullo nel linear algorithm.');
```

```
        break;
    end

    X1_3 = X1_2 - delta2 * (X1_2 - X1_1) / (delta2 - delta1);
    ReD3 = X1_3;

    if ReD3 <= 0
        warning('portata_orifizio: ReD non fisico durante l''iterazione.');
```

```
        break;
    end

    C3 = C_orifizio(tap_type, beta, ReD3, D);

    delta3 = A1 - X1_3 / C3;
    resid = abs(delta3) / max(abs(A1), realmin);

    k_final = k;

    if resid < tol
        converged = true;
        break;
    end
end
```

```

end

% Shift iterativo
X1_1 = X1_2;
delta1 = delta2;

X1_2 = X1_3;
delta2 = delta3;
end

```

Codice 7 - Schema iterativo per il calcolo del numero di Reynolds

All'intero del codice, la determinazione del valore del coefficiente di efflusso C è demandata alla funzione $C_orifizio(arg)$. La normativa ISO 5167 prescrive una diversa metodologia di calcolo in funzione della configurazione delle prese di pressione adottata nel sistema di misura. La suddetta funzione, grazie al comando switch, permette di selezionare la tipologia di presa presente nel banco prova e, quindi, adottare la procedura di calcolo corretta. Più precisamente, la scelta è tra tre possibili configurazioni: “flange”, “corner” e “dd2”.

In questo modo si possono identificare le dipendenze del coefficiente di efflusso:

$$C = f(\beta, Re_D, D, \text{tipo di prese})$$

Prescindendo dalla tipologia delle prese di pressione adottata, la formulazione del coefficiente di efflusso C si basa sull'equazione proposta da Reader-Harris e Gallagher (1998) [28]:

$$\begin{aligned}
C = & 0.5961 + 0.0261\beta^2 - 0.216\beta^8 + 0.000521 \left(\frac{10^6\beta}{Re_D} \right)^{0.7} \\
& + (0.0188 + 0.0063A)\beta^{3.5} \left(\frac{10^6}{Re_D} \right)^{0.3} \\
& + (0.043 + 0.080^{-10L_1} - 0.123^{-7L_1})(1 - 0.011A) \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} \\
& - 0.031(M'_2 - 0.08M_2^{1.1})\beta^{1.3}
\end{aligned}$$

Tale formula rappresenta il fondamento comune a tutte le configurazioni, ognuna di loro si differenzia attraverso la modifica di specifici coefficienti correttivi. Le rispettive espressioni sono implementate nei seguenti codici: Listato 17, Listato 18 e Listato 19.

Come indicato all'interno del diagramma in Figura 38, raggiunta la convergenza il numero di Reynolds è utilizzato per calcolare la portata massica, sfruttando la relazione, caratteristica per i tubi:

$$Re_D = \frac{4q_m}{\pi\mu_1 D}$$

Da cui:

$$q_m = \frac{\pi}{4}\mu_1 D Re_D$$

```
% Risultati finali

ReD = X1_3;
C    = C3;

qm = (pi / 4) * mu1 * D * ReD;
qv = qm / rho1;
```

Codice 8 - Calcolo finale di portata massica e volumetrica

Il calcolo della portata può considerarsi terminato; tuttavia, i risultati non sono ancora validati. A tale scopo la funzione “check_limiti_orifizio(-)” effettua un controllo e permette di stabilire se sono stati rispettati i limiti previsti dalla normativa.

```
checks = check_limiti_orifizio(tap_type, D, d, beta, ReD);
```

Codice 9 - Limiti previsti dalla portata

Nell’ultima fase, i risultati ottenuti vengono raccolti in una struttura **results**, che permette di organizzare sia risultati sia le caratteristiche principali, che hanno caratterizzato la prova. Tale struttura rende le informazioni accessibili per le successive fasi di elaborazione e visualizzazione dei dati.

Visualizzazione e salvataggio dati

Dopo aver acquisito il punto di misura, lo script permette di estrarre i valori di pressione e portata al fine di generare un grafico che segua l’evoluzione della prova al variare della posizione dello strozzatore.

```
% Aggiornamento grafico durante la prova
pv_array(i) = point.P_mean.valve_down./point.P_mean.valve_up;
qv_array(i) = results.qv;

figure(1);
plot(pv_array(1:i), qv_array(1:i), 'o-');
xlabel('p_v / p_m [-]');
ylabel('q_v [m^3/s]');
title('Curva portata');
grid on;
drawnow;
```

Oltre alla funzione puramente descrittiva, la visualizzazione in tempo reale permette di supervisionare l'andamento della prova, al fine di verificarne la correttezza. A tale scopo, ciò permette di individuare eventuali punti anomali, instabili, o più in generale, non coerenti con risultati attesi.

Oltre alla visualizzazione, il codice permette di salvare i dati ottenuti all'interno di una struttura e di esportarli in un file in formato `.csv`. Tale formato è stato scelto al fine di garantire compatibilità sia con MATLAB sia con altri ambienti di elaborazione, come Microsoft Excel.

In ogni elemento della struttura sono presenti sia i risultati di portata sia le grandezze misurate e le informazioni utili alle successive elaborazioni. Tale organizzazione ha l'obiettivo di mantenere traccia di ogni prova eseguita, al fine di effettuare rielaborazioni e confronti tra diverse prove sperimentali.

In conclusione, la fase di visualizzazione permette di monitorare in tempo reale l'andamento della prova di misura. Parallelamente, il salvataggio automatico consente di eliminare l'intervento dell'operatore e rende i dati ottenuti facilmente manipolabili per le successive attività di analisi.

Validazione e controlli

Come anticipato in precedenza, all'interno del codice sono stati implementati specifici controlli automatici. Tale scelta è dettata dall'esigenza di evitare l'acquisizione e la validazione di valori non conformi alle prescrizioni previste dalla normativa ISO 5167.

La prima verifica viene effettuata prima dell'esecuzione della prova. Tale controllo verte sulle caratteristiche fluidodinamiche e geometriche del sistema; in particolare, vengono controllati: il numero di Reynolds Re_D , il diametro della tubazione D , il diametro dell'orifizio d e, di conseguenza, il parametro β . In questo modo, si evita di effettuare una campagna di misura fondata su presupposti normativamente errati. Il codice che permette di realizzare tale controllo è `"check_limiti_orifizio"`.

Tutto ciò assume un'importanza ancora maggiore poiché le formulazioni per il calcolo della portata risultano applicabili solo quando il dispositivo opera all'interno dei limiti geometrici e fluidodinamici previsti dalla normativa.

Come già illustrato nel paragrafo relativo all'acquisizione dei segnali, è stato implementato un controllo sulla stabilità del segnale sperimentale, durante il processo di acquisizione. In seguito alla variazione dell'apertura dello strozzatore, il sistema sperimenterà una fase transitoria,

ininfluente al fine dell'acquisizione di dati utili per il calcolo della portata nel punto di misura. Grazie all'utilizzo di grandezze di natura statistica, si verifica che la pressione differenziale e la pressione di monte del diaframma rientrino entro una determinata soglia, definita dall'operatore.

Inoltre, sono stati implementati controlli sui segnali acquisiti. Le tensioni lette dai sensori vengono analizzate al fine di individuare dei valori fuori scala o anomalie di acquisizione. Successivamente alla conversione delle tensioni, anche i valori di pressione ricavati vengono analizzati, al fine di escludere la presenza di valori nulli o negativi.

In conclusione, i controlli automatici svolgono la funzione essenziale di validazione della misura. I vincoli sviluppati all'interno dello script non sostituiscono la presenza dell'operatore, ma risultano necessari per evitare di acquisire valori non rappresentativi e non conformi.

La presenza di tali verifiche è fondamentale al fine di conferire robustezza e affidabilità al sistema di misura sperimentale.

La seguente tabella riassume i controlli implementati all'interno del codice.

Categoria di controllo	Criterio adottato	Funzione di controllo
Controlli preliminari ISO 5167	$d \geq 12,5 \text{ mm}$ $50 \text{ mm} \leq D \leq 1000 \text{ mm}$ $0,10 \leq \beta \leq 0,75$ Per prese <i>corner</i> o $D-D/2$: $Re_D \geq 5000$ per $0,10 \leq \beta \leq 0,56$ $Re_D \geq 16000\beta^2$ per $\beta > 0,56$ Per prese <i>flange</i> : $Re_D \geq 5000$ e $Re_D \geq 170\beta^2 D$ [mm]	Verificano che la configurazione geometrica e fluidodinamica del banco sia compatibile con il campo di applicabilità della ISO 5167.
Controllo di stabilità del punto	$\begin{cases} CV_{\Delta p} < 0,01 \\ CV_{p_1} < 0,01 \end{cases}$ $\begin{cases} D_{rel,\Delta p} < 0,01 \\ D_{rel,p_1} < 0,01 \end{cases}$	Evita il salvataggio di punti acquisiti durante transitori o in presenza di oscillazioni eccessive del segnale.
Controlli di coerenza dei segnali	$0 \leq V \leq 10 \text{ V}$ $\Delta p > 0$ $p_1 > 0$ $\varepsilon > 0$	Individuano valori fuori scala o fisicamente non ammissibili prima del calcolo della portata.

Figura 39 - Controlli automatici implementati nello script MATLAB

Prove sperimentali

Obiettivo delle prove sperimentali

Dopo aver definito il dimensionamento del banco prova e sviluppato lo script MATLAB, in questo capitolo viene effettuata una campagna di prove sperimentali atta alla validazione funzionale del sistema di acquisizione. L'attenzione della campagna non è rivolta alla corretta caratterizzazione della valvola in prova, ma alla verifica del funzionamento della catena di misura e dell'elaborazione dei segnali.

Le prove sono state eseguite su un banco prova disponibile in laboratorio, anch'esso costruito seguendo la metodologia proposta dalla normativa ISO 5167, sebbene non ufficialmente certificato. Prima di lavorare direttamente sul banco, il blocco del sistema di acquisizione, a partire dai trasduttori, è stato testato in maniera indipendente.

La validazione è stata organizzata in modo progressivo: prima sono stati verificati separatamente i principali moduli software, poi è stata eseguita l'acquisizione completa sul banco.

Nel presente capitolo vengono descritte ed analizzate le verifiche preliminari, insieme alla configurazione del sistema usato per le prove. Nel capitolo successivo verranno, invece, analizzati i dati ottenuti dalla campagna sperimentale di misura della portata.

Organizzazione delle prove preliminari

Prima di eseguire la campagna di prove effettiva, sono stati svolti alcuni test preliminari finalizzati a ridurre l'incertezza sulla funzionalità del sistema. Tale verifica è stata condotta per blocchi, testando sia sezioni indipendenti del codice sia componenti fisiche del banco, come i trasduttori. L'analisi non si è limitata alla sola verifica delle funzionalità dei singoli elementi, ma ha considerato come interagissero con il sistema di acquisizione.

Questo approccio consente di individuare più facilmente eventuali errori, distinguendo i problemi legati al software da quelli dovuti ai collegamenti o ai componenti fisici. Tali prove non costituiscono una validazione completa del sistema, poiché l'integrazione dei singoli blocchi può introdurre ulteriori criticità. Tuttavia, permettono di partire da una base verificata prima dell'acquisizione sperimentale completa.

Gli script, considerati nel loro insieme, formano la base del codice, descritto precedentemente. La logica adottata consiste nel dividere i vari compiti in moduli separati, al fine di effettuare test mirati che ne validino il funzionamento.

Gli script utilizzati sono riportati di seguito e sono contenuti all'interno di una cartella denominata "Prove_preliminari":

- 01_test_collegamenti_NI.m;
- 02_test_stabilita_segnali.m;
- 03_test_calcolo_portata.m;
- 04_test_acquisizione_completa.m.
- 05_test_regressione_lineare.m

Per ritenere completo il test del codice, è necessario verificare anche le funzioni che compongono i singoli script. Tali funzioni sono le stesse che vengono utilizzate nello script principale e richiamate aggiungendo al *Current Folder* la cartella "Prove preliminari". In questo modo è possibile eseguire i test senza modificare la struttura originale degli script.

Trasduttori di pressione utilizzati

I trasduttori utilizzati per la validazione non coincidono con i trasduttori definitivi previsti per il banco prova dimensionato. Essi vengono impiegati poiché compatibili con i nostri campi di misura d'interesse e in grado di fornire dei risultati soddisfacenti alla verifica.

I trasduttori sono complessivamente quattro: due adibiti alla caratterizzazione della valvola in prova e due, di cui uno differenziale, associati al dispositivo primario. La seguente tabella ne riporta le principali caratteristiche.

Caratteristiche	Monte valvola in prova	Valle valvola in prova	Monte dispositivo primario	Differenziale primario
Pressione misurata	SEAFrontTioes50yhra-05	SEAFrontTioes50yhra-05	BSAXITHZB	EAFYLYACA-0-10VOUTPUT-0-10KPA
Modello	Walfront	Walfront	BSAXITHZB	Generic
Costruttore	0 - 150 PSI	0 - 150 PSI	0-10 kPa	0-10 kPa
Campo di misura	5 V	5 V	12 - 36 V	24 V
Alimentazione	0,5 - 4,5 V	0,5 - 4,5 V	0 - 10 V	0 - 10 V
Uscita elettrica	3	3	3	3
Numero di fili				

Figura 40 - Proprietà dei trasduttori

In Figura 41, invece, sono riportate le foto dei trasduttori di pressione utilizzati.

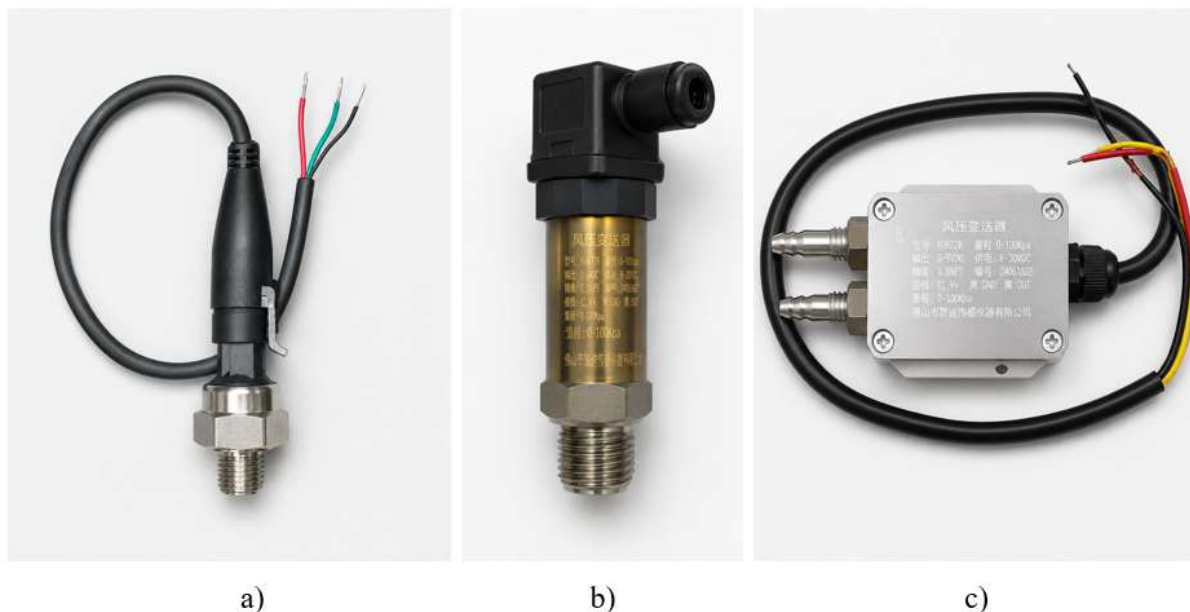


Figura 41 - Trasduttori

Dove:

- a) Trasduttori di pressione assoluta relativi alla pressione di monte e valle della valvola;
- b) Trasduttore di pressione assoluta relativo alla pressione di monte del diaframma;
- c) Trasduttore di pressione differenziale posizionato tra monte e valle del dispositivo primario.

Come accennato precedentemente, prima dell'installazione sul banco prova, i trasduttori sono stati sottoposti a verifiche preliminari. Tali prove sono descritte nel seguente paragrafo.

Verifica preliminare dei trasduttori

Le prove sui trasduttori sono realizzate in modo da analizzare il comportamento dei trasduttori prima di montarli sul banco prova.

La prima prova riguarda i trasduttori considerati singolarmente, quindi non collegati alla scheda di acquisizione.

Il trasduttore viene collegato alla linea pneumatica attraverso un riduttore di pressione, che permette di variare il valore di pressione che percepisce al sensore.

Contestualmente, mediante un raccordo a T, viene collegato con un manometro di precisione, utilizzato come riferimento per controllare il livello di pressione. L'uscita del trasduttore viene, a sua volta collegato, ad un multimetro, che permetta di leggerne la tensione in uscita. Durante la

prova verranno rilevati diversi punti di misura, sia in fase di salita sia in fase di discesa, al fine di valutare il comportamento del trasduttore e la potenziale isteresi.

Collezionando i valori di tensione ottenuti si può ricavare la caratteristica del trasduttore:

$$V = K_p + V_0$$

- $K_p [V]$: guadagno statico del trasduttore;
- $V_0[V]$: valore dell'offset in uscita.

La seconda prova ricalca la stessa logica utilizzata per la prima ma in questo caso si fa un passo in avanti, le tensioni invece di essere misurate con un multimetro verranno acquisite dalla scheda di acquisizione ed elaborate dall'ambiente MATLAB al fine di restituire i valori automaticamente di guadagno ed offset.

Questa prova riveste particolare importanza perché permette di verificare la gestione dei collegamenti tra il banco, scheda di acquisizione ed elaboratore: Inoltre, permette di verificare l'implementazione delle strutture di dati contenenti i risultati dell'acquisizione e la successiva rielaborazione.

Il risultato ottenuto deve coincidere, entro i limiti di incertezza di misura, con quello ricavato sul banco manualmente.

I trasduttori adibiti alla misura della pressione a monte e a valle della valvola sono dello stesso modello. Ration per cui, i risultati ottenuti durante la prima prova per il trasduttore di monte sono stati presi come riferimento per le acquisizioni con la scheda NI per entrambi i trasduttori.

Prima prova preliminare

Verifica del trasduttore di pressione a monte della valvola in prova

La prima prova è stata effettuata realizzando un semplice circuito pneumatico, composto da un riduttore di pressione, un raccordo a T, il trasduttore in prova ed un manometro di riferimento. Il riduttore permette di controllare il valore di pressione scelto, mentre il manometro consente di verificarne il valore effettivo.

In Figura 42 è riportata la configurazione del circuito pneumatico allestito per la prova.

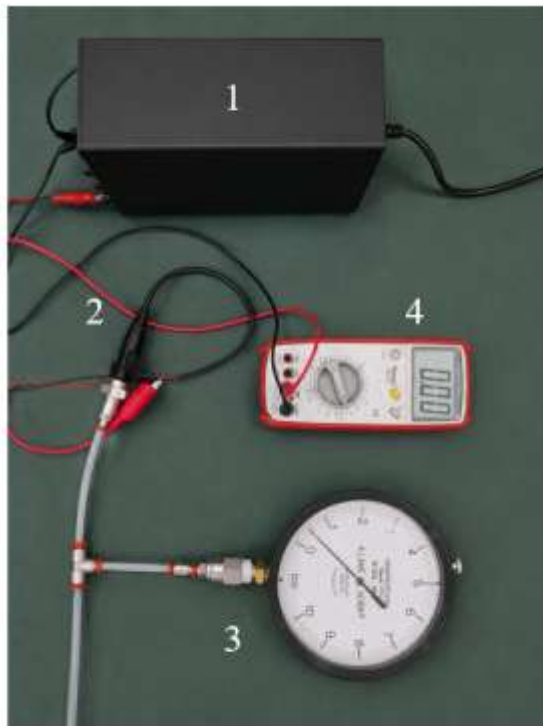


Figura 42 – Circuito pneumatico prima prova del trasduttore di monte della valvola

Dove:

1. Alimentatore 5 V;
2. Trasduttore di pressione;
3. Manometro di riferimento;
4. Multimetro;
5. Riduttore di pressione.

Il trasduttore è alimentato con una tensione di 5 V, mentre la sua uscita è misurata con un multimetro. Per ogni valore di pressione è stato registrato il valore di tensione corrispondente, così da ricavare la caratteristica del sensore.

La Figura 43 riporta i risultati ottenuti, mentre la Figura 44 riporta la regressione lineare utilizzata per determinare il guadagno statico.

Punto	Pressione rif. [bar]	Tensione salita [V]	Tensione discesa [V]	Tensione teorica [V]	Tensione media [V]	Errore	Errore [%]
1	0	0,49	0,48	0,5	0,485	-0,015	0,375
2	0,5	0,65	0,68	0,7	0,665	-0,035	0,875
3	1	0,85	0,86	0,9	0,855	-0,045	1,125
4	1,5	1,06	1,06	1,1	1,06	-0,04	1
5	2	1,25	1,26	1,3	1,255	-0,045	1,125
6	2,5	1,44	1,43	1,5	1,435	-0,065	1,625
7	3	1,64	1,63	1,7	1,635	-0,065	1,625
8	3,5	1,84	1,84	1,9	1,84	-0,06	1,5
9	4	2,03	2,04	2,1	2,035	-0,065	1,625
10	4,5	2,22	2,21	2,3	2,215	-0,085	2,125
11	5	2,40	2,40	2,5	2,4	-0,1	2,5
12	5,5	2,62	2,60	2,7	2,61	-0,09	2,25
13	6	2,80	2,80	2,9	2,8	-0,1	2,5

Figura 43 - Valori di pressione e tensione acquisiti durante la caratterizzazione del trasduttore.

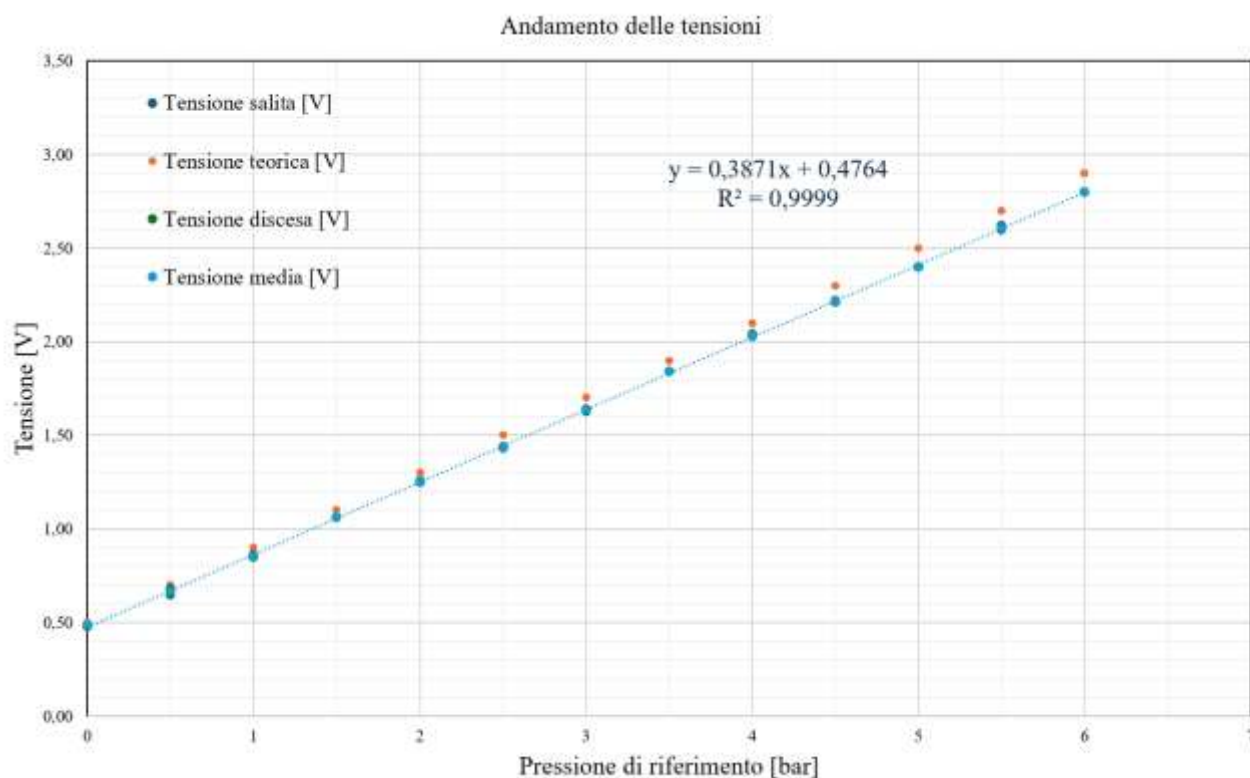


Figura 44 - Andamento della tensione in uscita in funzione della pressione di riferimento e relativa regressione lineare.

I risultati ottenuti dalla prima prova sono complessivamente molto positivi. Il comportamento del trasduttore si conferma pressoché lineare. A conferma di ciò, l'indice di determinazione R^2 è praticamente unitario.

In media, la tensione misurata risulta leggermente inferiore rispetto al valore teorico, con un errore percentuale massimo pari al 2,5%.

L'errore percentuale è calcolato mediante la seguente formula:

$$Err_{relativo} = \frac{|V_m - V_r|}{V_{max} - V_{min}} \cdot 100$$

In cui V_m rappresenta il valore di tensione [V] misurato, mentre V_r la sua controparte teorica. La differenza tra il valore minimo e massimo misurato rappresenta lo *Span* del trasduttore.

La differenza tra i valori acquisiti in fase di salita ed in fase di riduzione della pressione è pressoché trascurabile; quindi, si può considerare non influente il fenomeno dell'isteresi.

Il risultato della prova restituisce l'espressione della retta di regressione lineare, definita come segue:

$$V [V] = 0.3871 \left[\frac{V}{bar} \right] \cdot p [bar] + 0.4764 [V]$$

Poiché la prova finale verrà effettuata con una pressione che non superiore ai 5 bar relativi, perciò, la caratterizzazione del trasduttore è stata eseguita in un intervallo compreso tra 0 e 6 bar relativi.

Verifica del trasduttore differenziale

La caratterizzazione del trasduttore differenziale richiede la realizzazione di un circuito pneumatico ad hoc, a causa del fondo scala del sensore, pari a 10 kPa. Lo schema pneumatico è riportato nella seguente Figura 45.

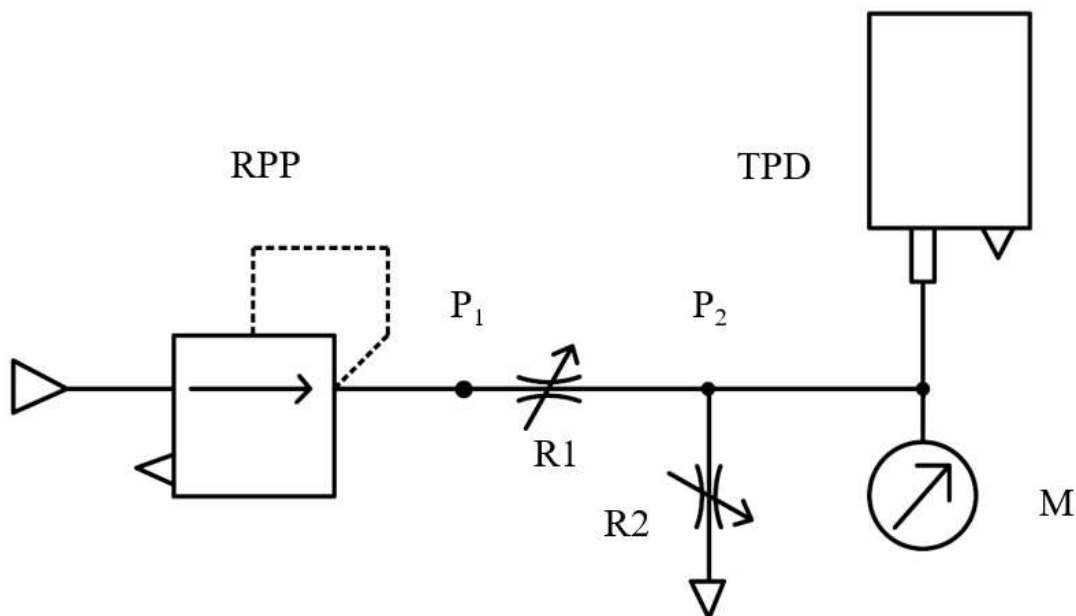


Figura 45 – Schema circuito pneumatico per trasduttore differenziale

Di cui:

- RPP : riduttore di pressione;
- R_1 e R_2 : regolatore di flusso in linea;
- M : manometro di bassa pressione;
- TDP : trasduttore di pressione differenziale.

Lo scopo del circuito è generare la minima differenza di pressione ai capi del regolatore di flusso R_1 . Pertanto, è inserito il ramo di scarico, in cui è montato R_2 , che consente di realizzare il flusso d'aria; in caso contrario il circuito sarebbe in equilibrio e non si creerebbe la caduta di pressione necessaria.

Prima di installare il trasduttore di pressione, viene verificata il range di pressioni realizzare nel circuito, chiudendo con un tappo il collegamento destinato al trasduttore. In tal modo, si elimina il rischio di superamento della soglia di sovraccarico e, quindi, del danneggiamento del sensore.

All'inizio della prova, R_2 viene mantenuto completamente aperto, mentre R_1 è quasi completamente chiuso. La regolazione viene eseguita con l'obiettivo di partire da un valore quasi nullo di pressione fino ad arrivare alla pressione massima di 10 kPa (100 mbar).

Il circuito realizzato in laboratorio è mostrato in Figura 46.

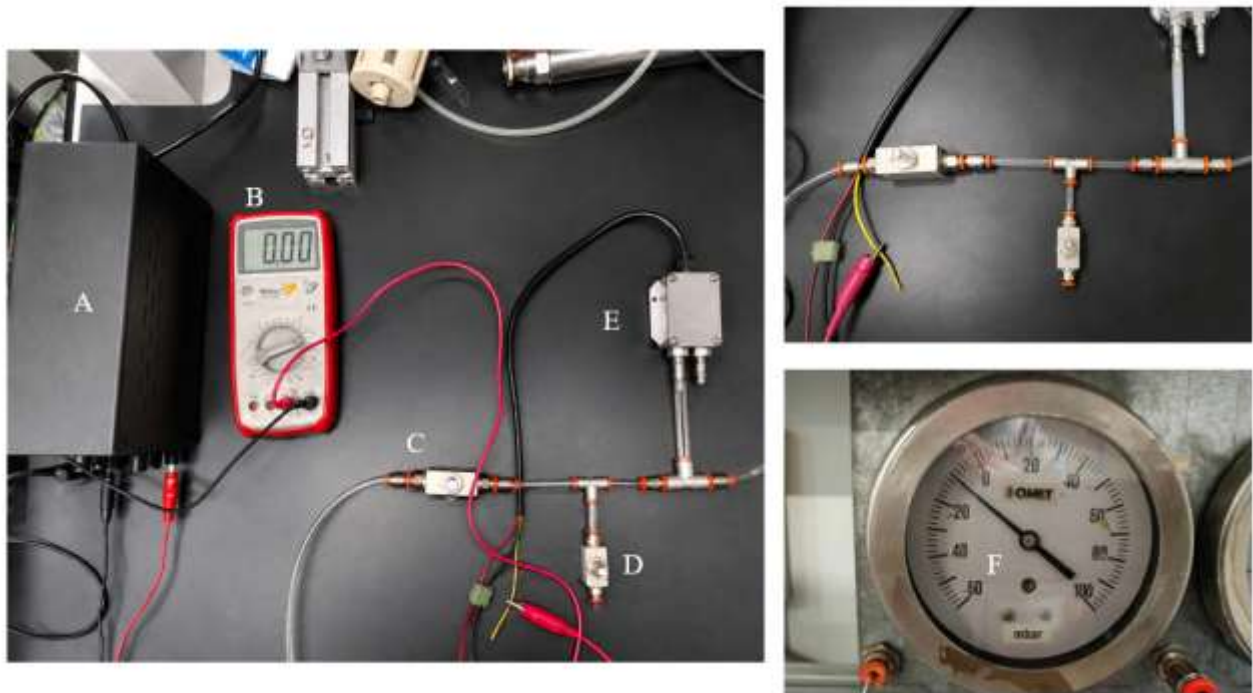


Figura 46 – Circuito prova trasduttore differenziale

Il banco di prova è costituito dall'alimentatore del trasduttore (A), dal multimetro per la lettura del segnale elettrico (B), dai due regolatori di flusso (R_1) e (R_2) (C e D), dal trasduttore di pressione differenziale (E) e dal manometro di riferimento (F). La regolazione combinata di (R_1) e (R_2) consente di generare e controllare la differenza di pressione applicata al sensore durante la prova.

Punto	Pressione rif. [kPa]	Tensione salita [V]	Tensione discesa [V]	Tensione teorica [V]	Tensione media [V]	Errore	Errore [%]
1	0	0,00	0,00	0,00	0	0	0
2	1	1,04	0,99	1,00	1,015	0,015	0,375
3	2	2,05	2,05	2,00	2,05	0,05	1,25
4	3	3,00	2,91	3,00	2,955	-0,045	1,125
5	4	4,02	3,90	4,00	3,96	-0,04	1
6	5	4,82	4,80	5,00	4,81	-0,19	4,75
7	6	5,82	5,76	6,00	5,79	-0,21	5,25
8	7	6,80	6,70	7,00	6,75	-0,25	6,25
9	8	7,50	7,65	8,00	7,575	-0,425	10,625
10	9	8,60	8,50	9,00	8,55	-0,45	11,25
11	10	9,45	9,45	10,00	9,45	-0,55	13,75

Figura 47 – Valori di pressione e tensione acquisiti durante la caratterizzazione del trasduttore.

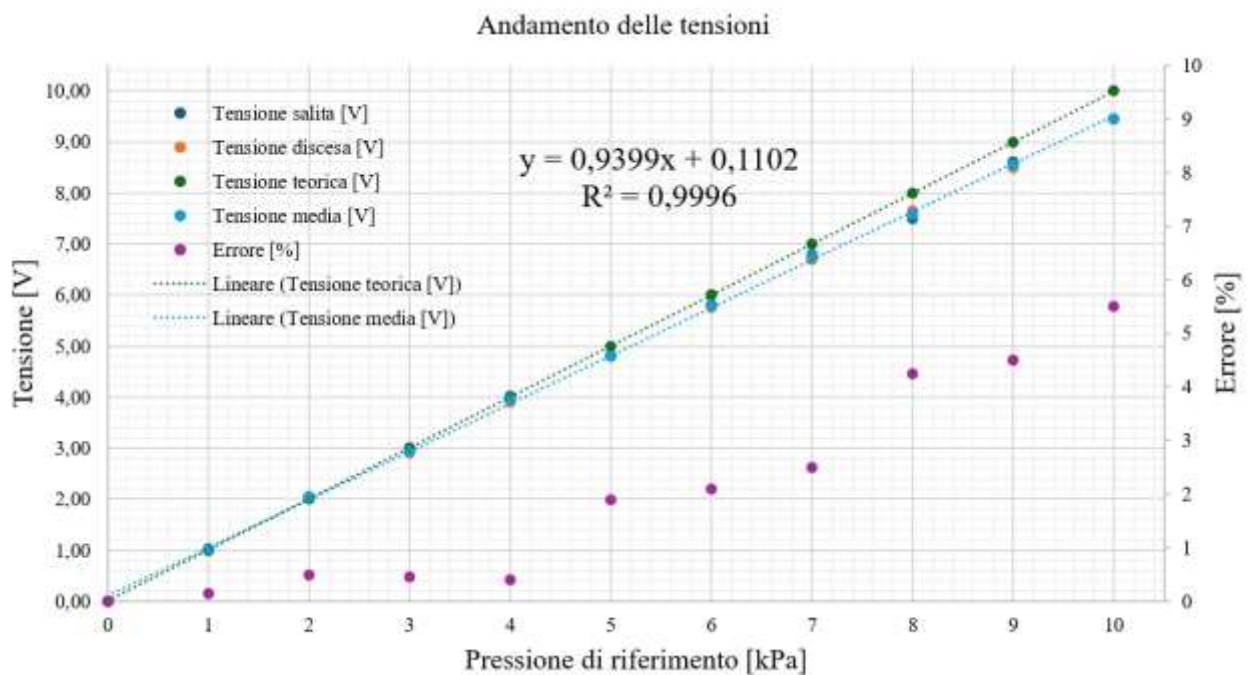


Figura 48 - Andamento della tensione in uscita in funzione della pressione di riferimento e relativa regressione lineare.

Dai risultati è possibile affermare che la tensione media presenti un buon livello di linearità. Tuttavia, all'aumentare della pressione in ingresso si osserva un aumento dello scostamento rispetto ai valori teorici. Ciò è evidente dalla colonna della Figura 47, nella colonna relativa agli errori percentuali.

La regressione lineare dei valori medi è descritta dalla seguente equazione:

$$V = 0.9399 \cdot p + 0.1102$$

In generale, i valori letti in fase di salita e di discesa sono pressoché sovrapponibili; quindi, l'isteresi è un fenomeno generalmente trascurabile.

Le conversioni effettuate nella prova successiva saranno eseguite considerando i coefficienti sperimentali ricavati in questa fase.

Verifica del trasduttore a monte del diaframma

Per la verifica del trasduttore della pressione a monte del diaframma è stato utilizzato lo stesso circuito pneumatico impiegato nella prova del precedente, poiché presentano lo stesso fondo scala pari a 10 kPa (100 mbar). L'unica differenza va ritrovata nel sensore in prova. La configurazione del banco è presentata nella seguente figura.

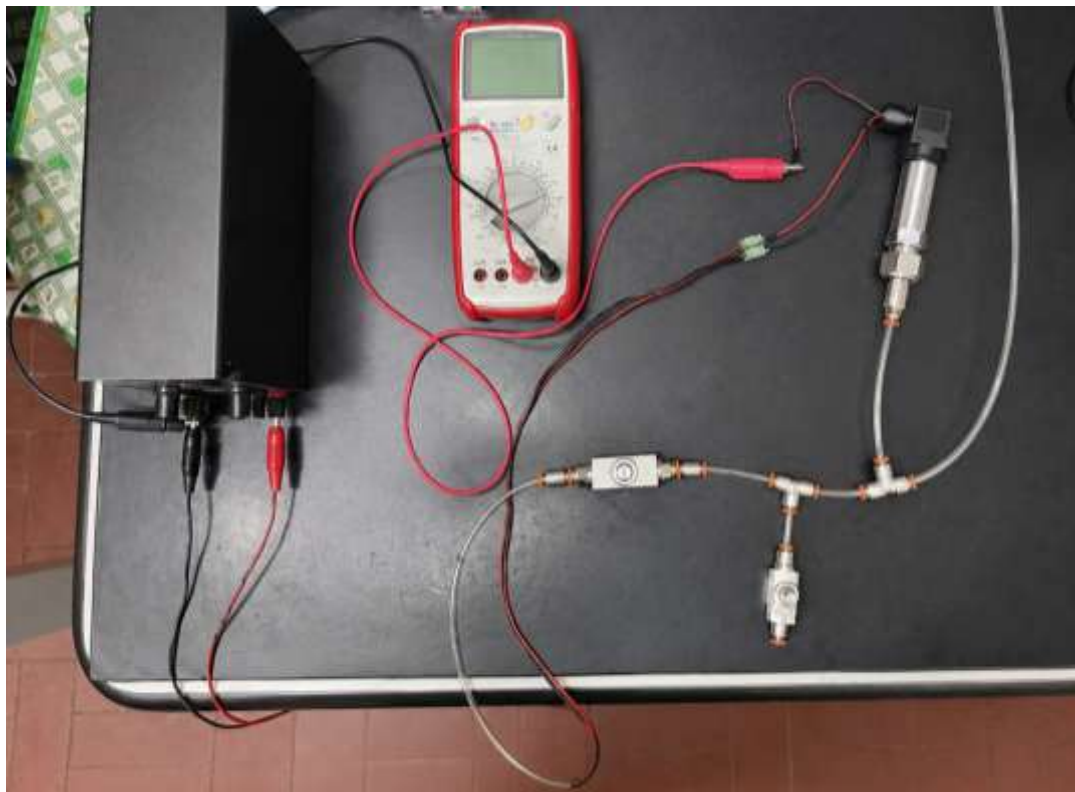


Figura 49 - Circuito pneumatico prova sul trasduttore di monte del disp. primario

Come per il layout del banco, anche la procedura di prova è rimasta invariata.

Punto	Pressione rif. [kPa]	Tensione salita [V]	Tensione discesa [V]	Tensione teorica [V]	Tensione media [V]	Errore	Errore [%]
1	0	0,00	0,00	0,00	0	0	0
2	1	1,06	0,96	1,00	1,01	0,01	0,1
3	2	1,89	1,94	2,00	1,915	-0,085	0,85
4	3	2,95	2,89	3,00	2,92	-0,08	0,8
5	4	3,90	3,91	4,00	3,905	-0,095	0,95
6	5	4,80	4,80	5,00	4,8	-0,2	2
7	6	5,76	5,79	6,00	5,775	-0,225	2,25
8	7	6,70	6,73	7,00	6,715	-0,285	2,85
9	8	7,63	7,66	8,00	7,645	-0,355	3,55
10	9	8,55	8,58	9,00	8,565	-0,435	4,35
11	10	9,49	9,45	10,00	9,47	-0,53	5,3

Figura 50 – Valori di pressione e tensioni raccolti per il trasduttore di monte del primario

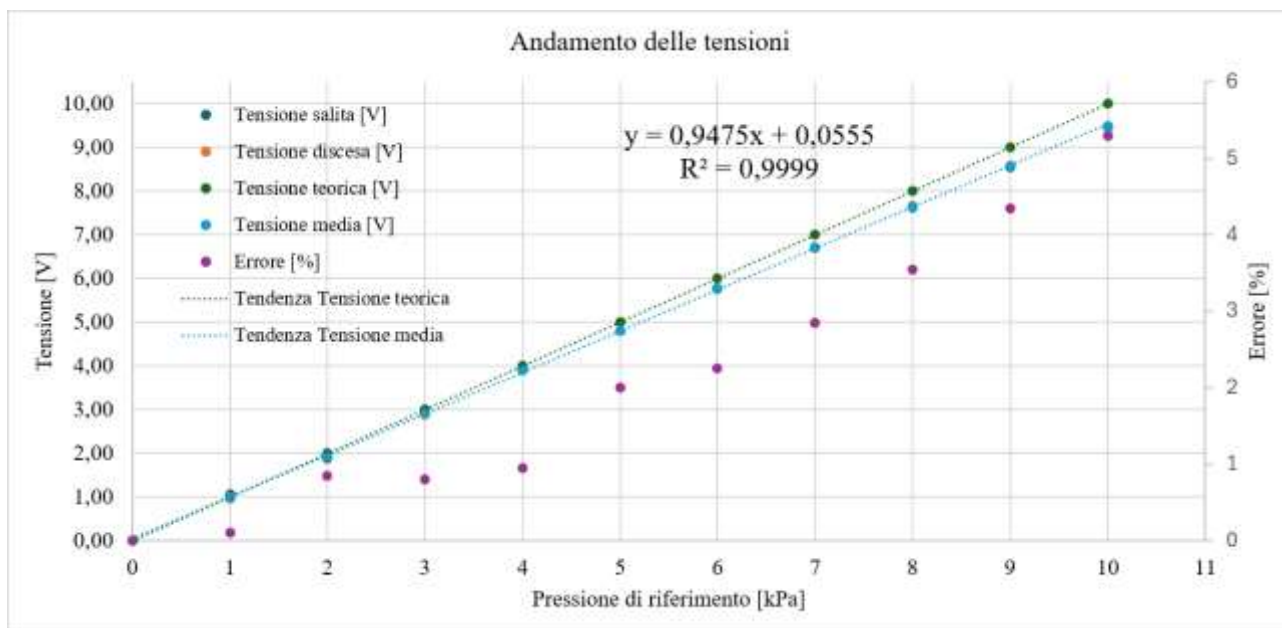


Figura 51 – Andamento delle tensioni e dell'errore percentuale per il trasduttore di monte del primario

I risultati evidenziano, come nei casi precedenti, una buona linearità del trasduttore. La retta di regressione ottenuta è la seguente:

$$V = 0.9475 \cdot p + 0.055$$

La tensione rilevata risulta globalmente inferiore rispetto al valore teorico, presentando un errore massimo pari al 5% in corrispondenza della pressione di fondo scala.

La differenza tra i valori di tensione registrati durante le fasi di salita e discesa è molto contenuta; pertanto, il fenomeno dell'isteresi può essere considerato trascurabile.

Seconda prova preliminare

La seconda prova ha come obiettivo l'integrazione del sistema di acquisizione nel circuito pneumatico utilizzato nella prova precedente e la valutazione dello scostamento tra i valori letti tramite il multimetro e quelli acquisiti mediante la scheda NI USB 6002.

Poiché l'elaborazione viene eseguita in ambiente MATLAB, è possibile implementare automaticamente la fase di post processing dei dati acquisiti.

Collegamento tra il trasduttore di pressione a monte della valvola in prova e la scheda di acquisizione

Il circuito pneumatico utilizzato è lo stesso usato per la precedente prova. La pressione viene regolata mediante un riduttore di pressione e monitorata mediante un manometro di riferimento. Il trasduttore è alimentato a 5 V e collegato con l'ingresso analogico della scheda NI USB 6002.

In Figura 52 è riportato uno schema del collegamento elettrico tra alimentatore, trasduttore e scheda di acquisizione. In Figura 53, invece, è mostrato l'allestimento del banco sperimentale.

Dopo aver verificato il corretto funzionamento del sistema, il codice permette di impostare il numero di punti da acquisire. A questo punto, inizia la prova: la scheda di acquisizione, dialogando con il trasduttore, acquisisce i valori di tensione e li converte in pressione. Sulla base di questi dati, viene usato un modello di regressione lineare e, quindi, caratterizzato il comportamento del trasduttore. I dati acquisiti vengono salvati in una struttura (`struct`), analogamente a quanto previsto per il listato principale, ed elaborati al fine di visualizzarli efficacemente.

Il listato completo dello script utilizzato per la prova è presente nell'appendice dedicata.

La Figura 54 riporta la tabella dei valori acquisiti, mentre in Figura 55 sono mostrati gli andamenti della pressione di riferimento e della pressione calcolata tramite MATLAB.

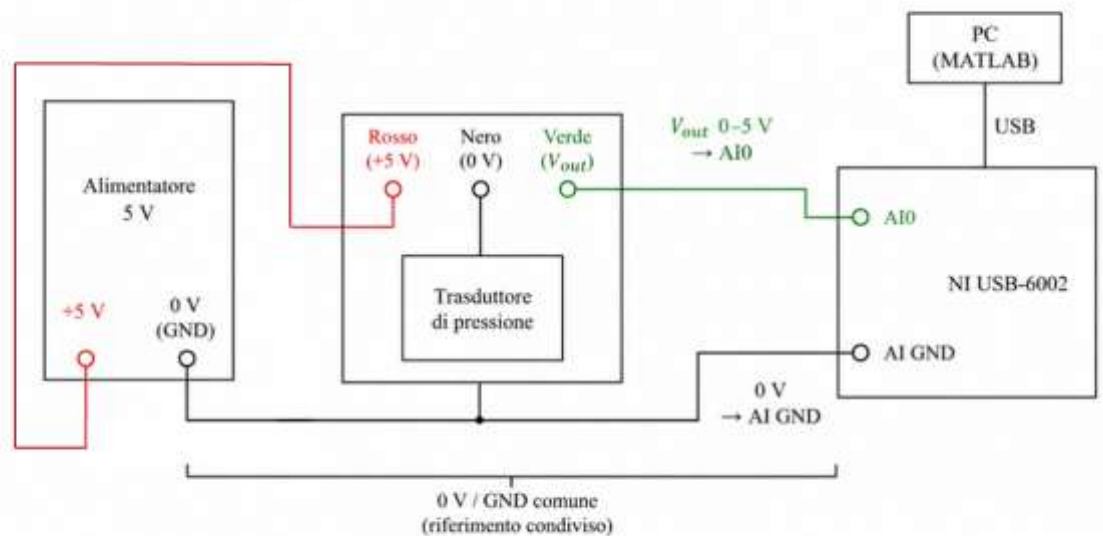


Figura 52 - Schema di collegamento del trasduttore di pressione alla scheda NI USB-6002 e al sistema di acquisizione MATLAB.

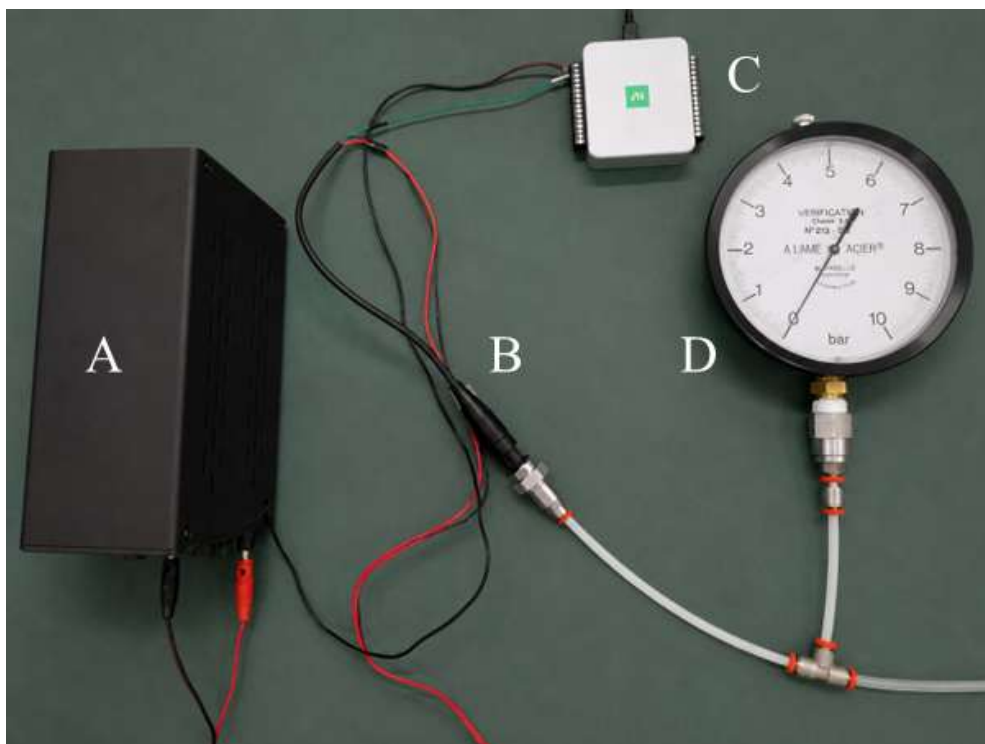


Figura 53 – Circuito pneumatico seconda prova per il trasduttore a monte della valvola

Dove A, B e D sono rispettivamente l'alimentatore, trasduttore e manometro di riferimento, come nella prova precedente, mentre C indica la scheda di acquisizione NI USB 6002. Nello schema elettrico, i colori del collegamento sono coerenti con quelli dei fili utilizzati nel banco fisico.

Punto	Pressione rif. [bar]	Tensione salita [V]	Tensione discesa [V]	Tensione teorica [V]	Tensione media [V]	Errore	Errore [%]
1	0	0,5001	0,4963	0,4767	0,4982	0,02147	0,53675
2	0,5	0,68142	0,6886	0,6700	0,6886	0,01861	0,46525
3	1	0,84544	0,8548	0,8635	0,8548	-0,00871	0,21775
4	1,5	1,0471	1,0561	1,0571	1,0516	-0,0055	0,1375
5	2	1,2530	1,2440	1,2506	1,2485	-0,0021	0,0525
6	2,5	1,4553	1,4366	1,4442	1,446	0,00175	0,04375
7	3	1,6423	1,6430	1,6377	1,6427	0,00495	0,12375
8	3,5	1,8393	1,8412	1,8312	1,8403	0,00905	0,22625
9	4	2,0361	2,0208	2,0248	2,0285	0,00365	0,09125
10	4,5	2,2246	2,2260	2,2184	2,2253	0,0069	0,1725
11	5	2,4165	2,4170	2,4119	2,4168	0,00485	0,12125
12	5,5	2,6093	2,6100	2,6054	2,6097	0,00425	0,10625

Figura 54 – Tabella risultati con sistema di acquisizione NI

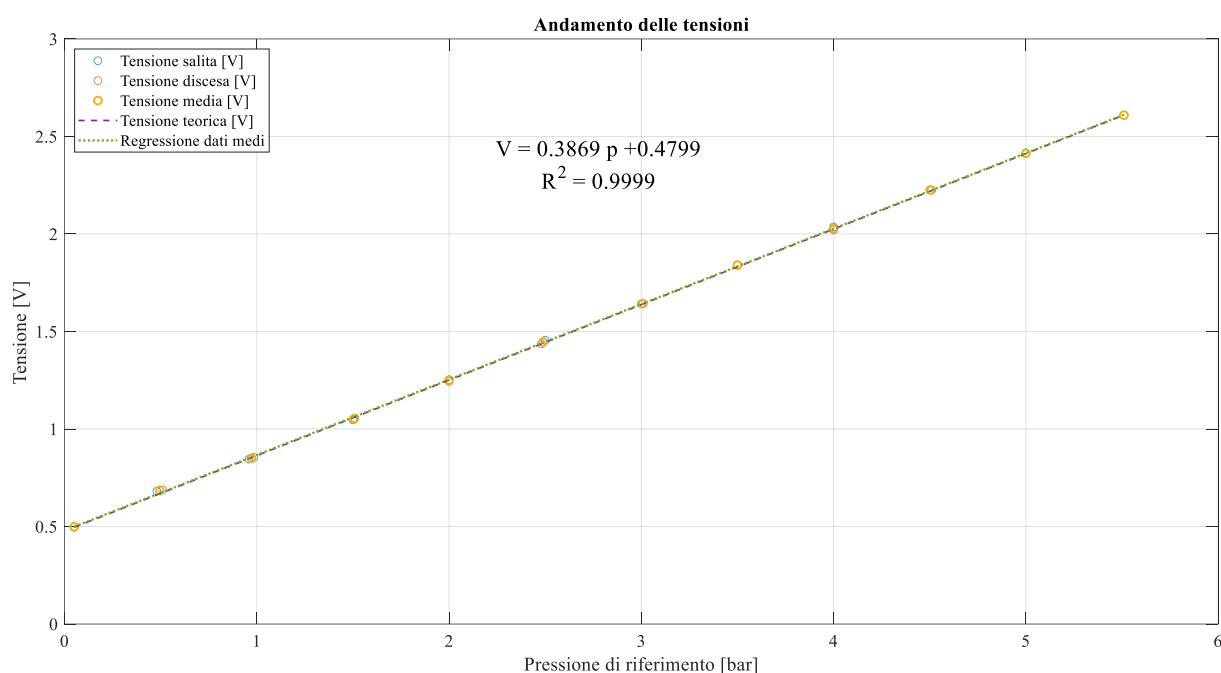


Figura 55 – Andamento dei risultati ottenuti per valvola a monte della valvola

I risultati ottenuti evidenziano una buona coerenza tra la prova eseguita in precedenza ed i dati acquisiti dalla scheda NI. Dal grafico si osserva come i valori misurati in salita ed in discesa si attestino in prossimità della retta di regressione, mostrando quindi uno scostamento molto contenuto, che non supera mai la soglia del punto percentuale.

Anche i valori dei coefficienti ricavati risultano prossimi a quelli calcolati nella prova precedente, confermando il corretto funzionamento della catena di acquisizione.

$$V = 0.3689 \cdot p + 0.4799$$

I risultati ottenuti saranno utilizzati nello script principale, all'interno dell'equazione di conversione della tensione in pressione relativa al trasduttore verificato.

Collegamento tra il trasduttore a valle della valvola in prova e la scheda di acquisizione

Come accennato precedentemente, il trasduttore a valle della valvola in prova è lo stesso modello del trasduttore a monte. Pertanto, la prova è stata eseguita mediante lo stesso circuito pneumatico. Di seguito sono riportati i risultati ottenuti.

Punto	Pressione rif. [bar]	Tensione salita [V]	Tensione discesa [V]	Tensione teorica [V]	Tensione media [V]	Errore	Errore [%]
1	0	0,4977	0,4983	0,5000	0,49801	-0,002	0,0497
2	1	0,8662	0,8953	0,8635	0,88077	0,0173	0,4313
3	2	1,2428	1,2584	1,2506	1,2506	-4E-06	0,0001
4	3	1,6481	1,6386	1,6377	1,64335	0,0057	0,1414
5	4	2,0321	2,0367	2,0248	2,0344	0,0096	0,2405
6	5	2,4093	2,4124	2,4119	2,41085	-0,001	0,0255
7	6	2,8017	2,7934	2,7990	2,79755	-0,001	0,0352

Figura 56 – Risultati ottenuti dall'acquisizione mediante scheda NI

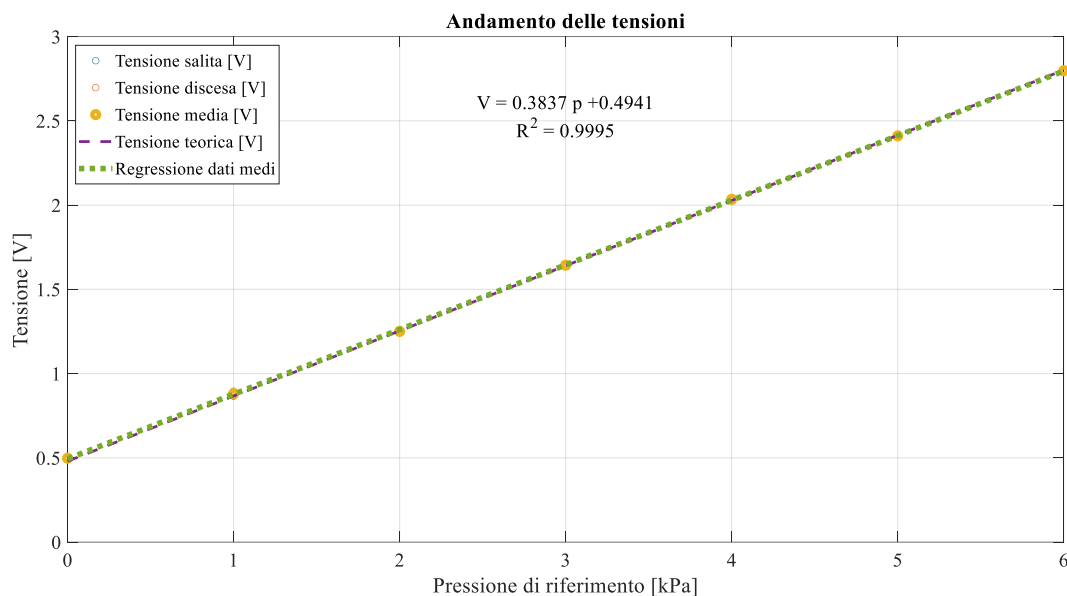


Figura 57 – Andamento delle tensioni per il trasduttore posto a valle della valvola

I risultati ottenuti evidenziano la corretta acquisizione delle tensioni da parte della scheda di acquisizione ed il comportamento lineare del trasduttore. L'equazione della retta di regressione ricavata è:

$$V = 0.3837 \cdot p + 0.4941$$

Il valore del guadagno si discosta da quello del trasduttore di monte di meno di un punto percentuale; quindi, si può considerare accettabile l'ipotesi di utilizzare, per entrambi i sensori, i coefficienti ricavati durante la prima prova.

I valori misurati in fase di salita e di discesa della pressione risultano pressoché sovrapponibili, è possibile, dunque, considerare trascurabile il fenomeno dell'isteresi.

Collegamento tra trasduttore differenziale e la scheda di acquisizione

Come già accaduto nella seconda prova condotta sul trasduttore relativo alla valvola in prova, anche per il trasduttore differenziale è stata adottata la medesima la configurazione del banco, integrata con la scheda di acquisizione e i relativi collegamenti elettrici.

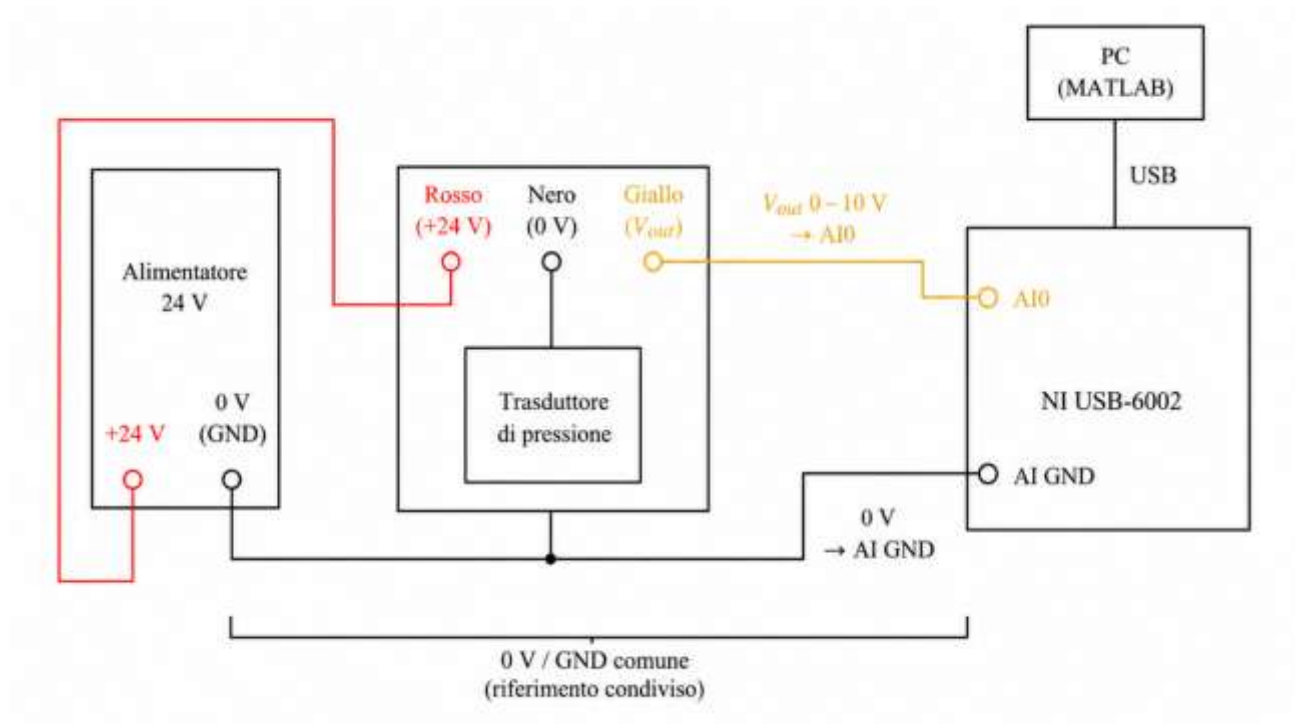


Figura 58 - Schema elettrico trasduttore differenziale

Lo schema elettrico è analogo a quello realizzato per i trasduttori posti a monte e a valle della valvola in prova. L'unica differenza riguarda la tensione d'alimentazione, per questo trasduttore pari a 24 V. Per facilitare l'identificazione dei collegamenti, a ciascun trasduttore è stato associato un colore diverso per il cavo del segnale.

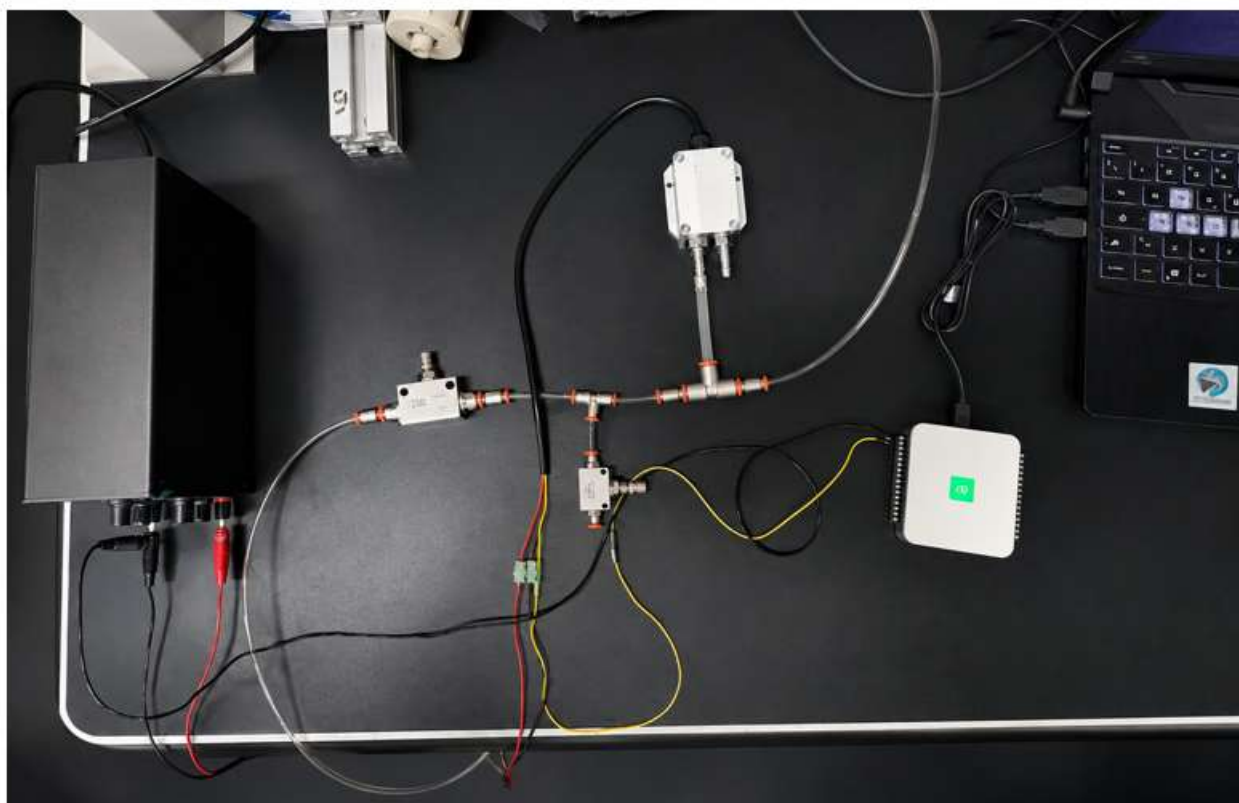


Figura 59 – Circuito pneumatico seconda prova trasduttore differenziale

Punto	Pressione rif. [kPa]	Tensione salita [V]	Tensione discesa [V]	Tensione teorica [V]	Tensione media [V]	Errore	Errore [%]
1	0	0,003	0,003	0,1102	0,00265	-0,10758	1,076
2	1	0,971	0,958	1,0501	0,9647	-0,08539	0,854
3	2	1,816	2,024	1,9900	1,91995	-0,07000	0,700
4	3	2,876	2,867	2,9298	2,8716	-0,05822	0,582
5	4	3,863	3,917	3,8697	3,89	0,02032	0,203
6	5	4,732	4,780	4,8095	4,7561	-0,05345	0,534
7	6	5,660	5,745	5,7494	5,7024	-0,04701	0,470
8	7	6,677	6,739	6,6893	6,7078	0,01853	0,185
9	8	7,622	7,672	7,6291	7,6471	0,01796	0,180
10	9	8,662	8,662	8,5690	8,6621	0,09310	0,931

Figura 60 - Tabella dei risultati ottenuti dal trasduttore differenziale e scheda NI

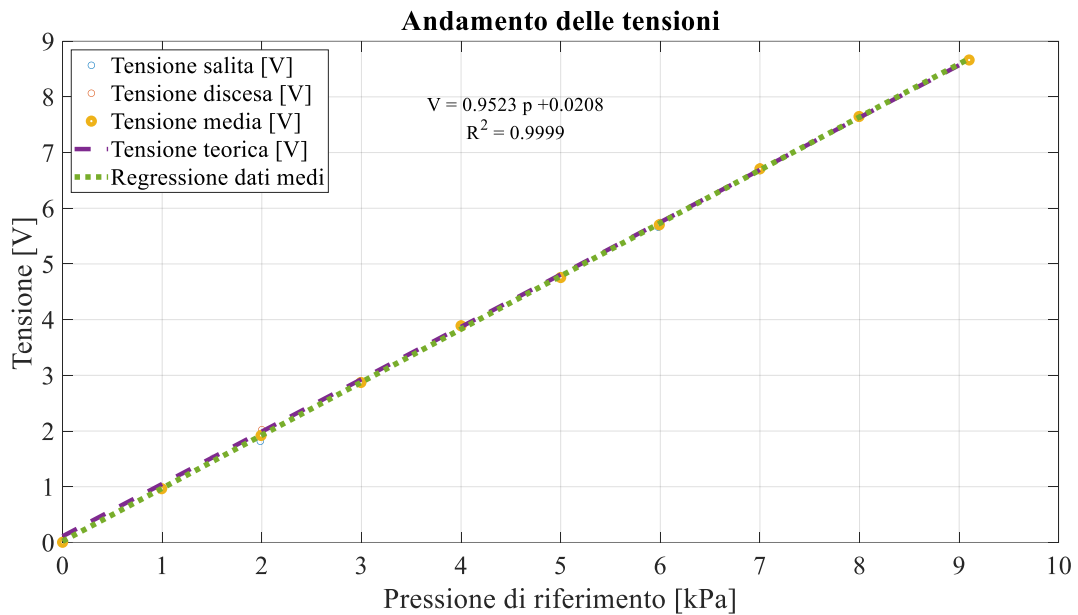


Figura 61 – Andamento dei risultati dell'acquisizione del trasduttore differenziale

I risultati ottenuti confermano l'andamento lineare già evidenziato mediante l'utilizzo del multimetro.

La nuova espressione della retta di regressione lineare è la seguente:

$$V = 0.9523 \frac{V}{kPa} \cdot p + 0.0208 V$$

La differenza tra i valori del guadagno risulta minima, confermando la corretta acquisizione e funzionamento del trasduttore. L'offset, invece, risulta significativamente inferiore rispetto al precedente; tuttavia, considerando la scala del fenomeno e l'errore in termini assoluti e non percentuali, tale differenza non ha effetto sul comportamento del trasduttore.

L'acquisizione, come nel caso precedente, risulta più aderente alle caratteristiche del trasduttore in quanto si utilizzano i coefficienti sperimentali ricavati precedentemente.

Collegamento tra trasduttore di monte del diaframma e la scheda di acquisizione

La verifica della catena di acquisizione è stata eseguita con modalità analoghe a quelle già descritte, collegando il trasduttore alla scheda NI USB-6002 e acquisendo il segnale in MATLAB.

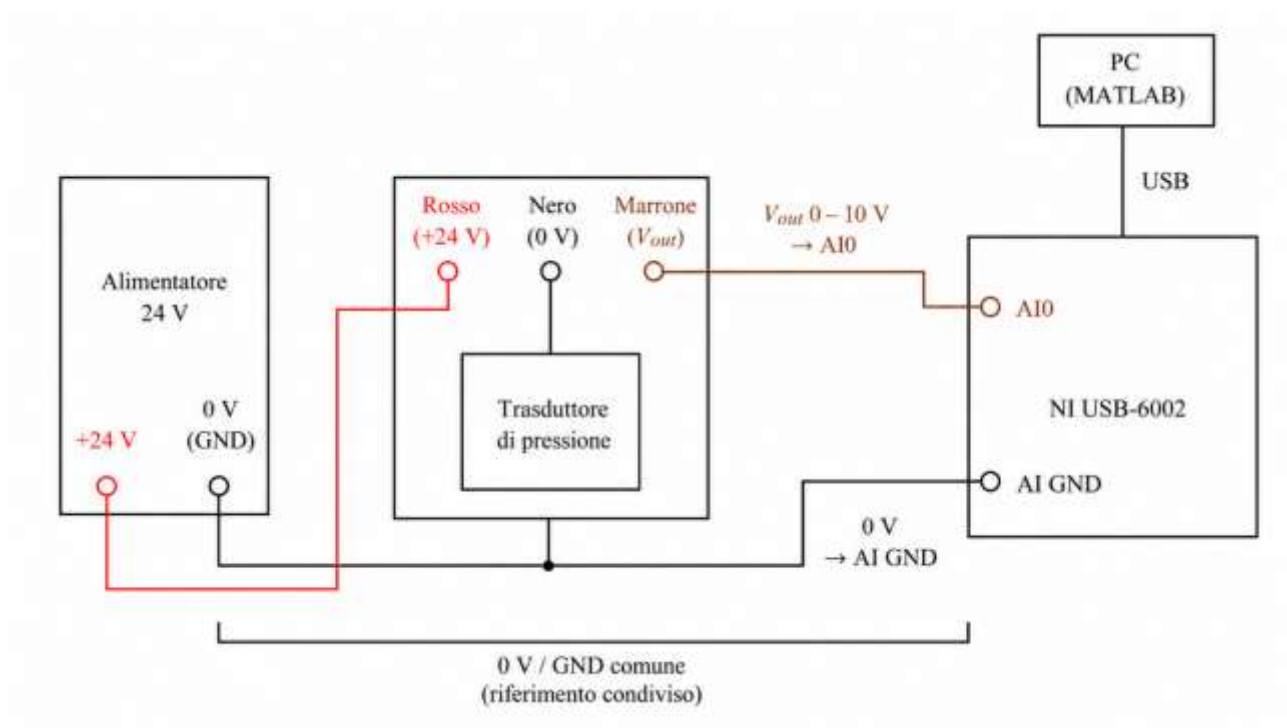


Figura 62 – Collegamento elettrico trasduttore di monte del disp. primario

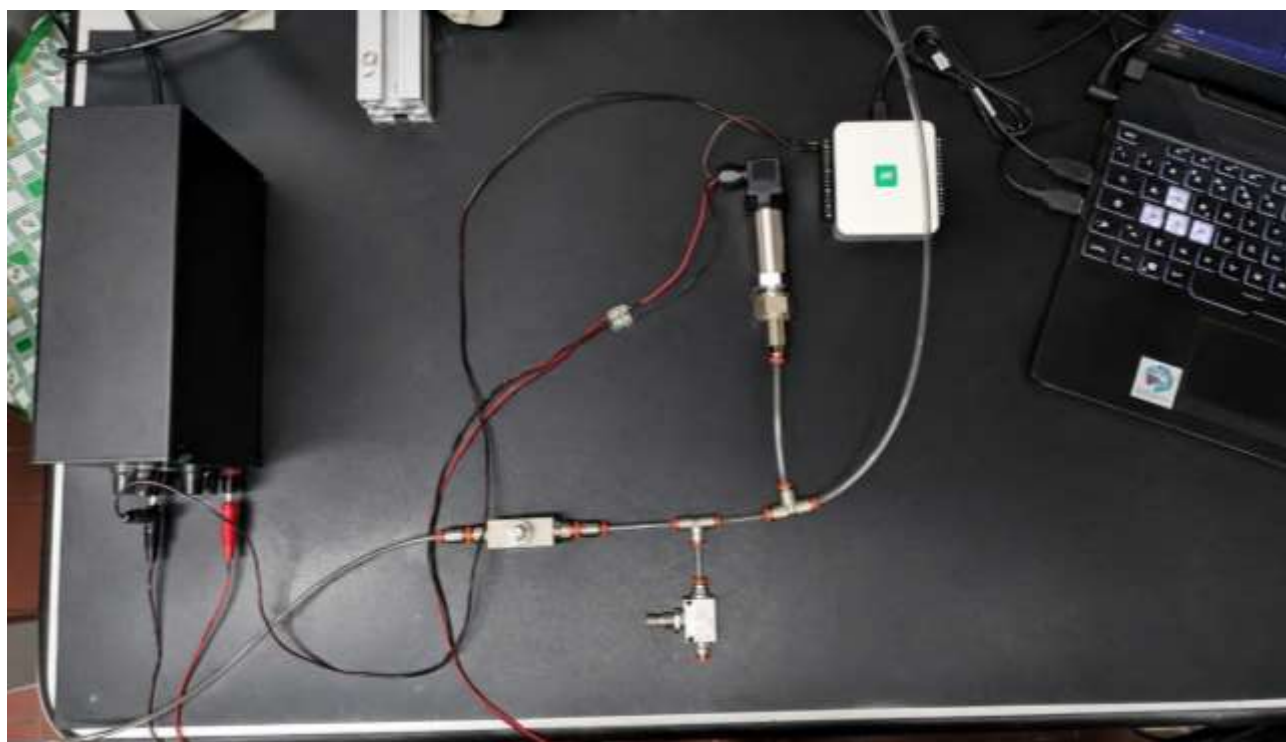


Figura 63 – Circuito pneumatico trasduttore di monte del primario collegato con scheda NI

Punto	Pressione rif. [kPa]	Tensione salita [V]	Tensione discesa [V]	Tensione teorica [V]	Tensione media [V]	Errore	Errore [%]
1	0	0,011	0,011	0,0555	0,011	-0,044	0,4446
2	1	1,024	1,007	1,0029	1,0157	0,013	0,1279
3	2	2,040	1,948	1,9504	1,99405	0,044	0,4369
4	3	2,968	2,917	2,8978	2,9428	0,045	0,4498
5	4	3,959	3,903	3,8453	3,93075	0,085	0,8548
6	5	4,834	4,799	4,7927	4,81625	0,024	0,2352
7	6	5,824	5,769	5,7402	5,7965	0,056	0,5632
8	7	6,775	6,723	6,6876	6,74895	0,061	0,6131
9	8	7,680	7,650	7,6351	7,6652	0,030	0,3011
10	9	8,624	8,622	8,5825	8,62275	0,040	0,402
11	10	9,521	9,538	9,5300	9,52905	-0,001	0,0095

Figura 64 – Tabella dei risultati ottenuti per il trasduttore a monte del disp. primario

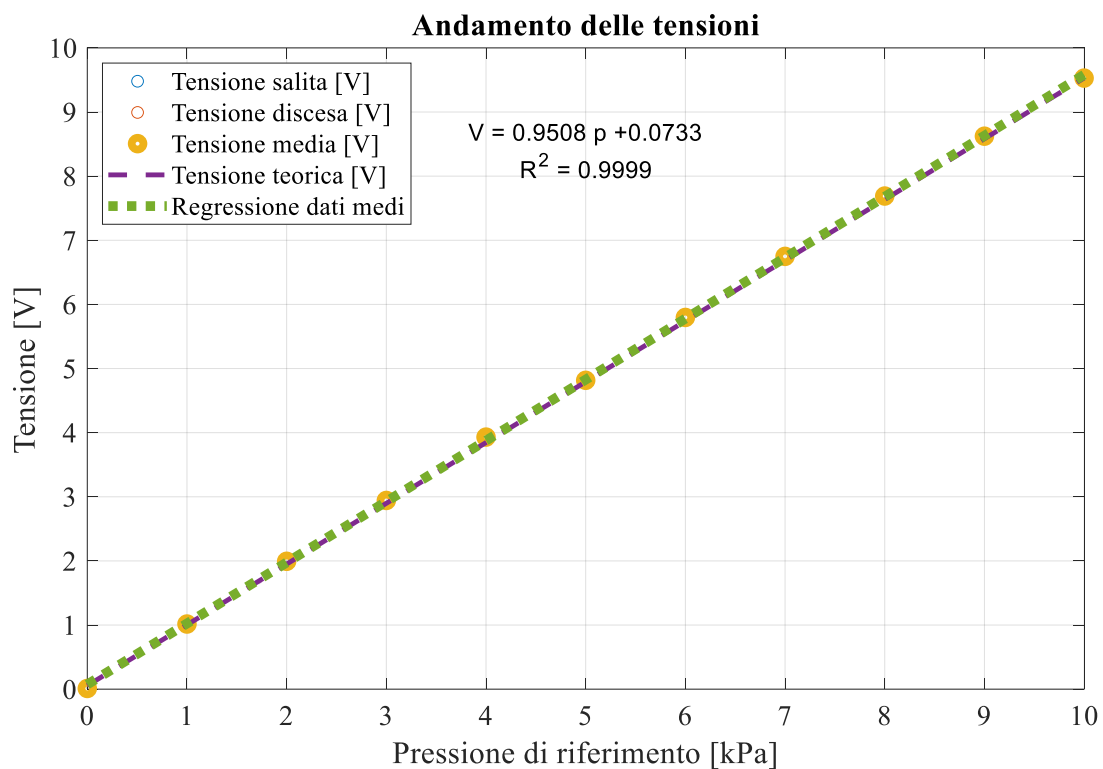


Figura 65 – Andamento dei valori acquisiti di tensione tramite scheda NI per il trasduttore a monte del primario

I coefficienti ottenuti risultano molto simili a quelli già ricavati durante la prima prova.

$$V = 0.9508 \cdot p + 0.0733$$

Anche in questo caso il fenomeno dell'isteresi può essere considerato trascurabile. L'errore risulta molto contenuto, con un massimo di circa 1% in prossimità dei 4 kPa relativi.

Nel complesso, la prova conferma la corretta acquisizione del segnale da parte della scheda NI e la coerenza dei risultati con quelli ottenuti mediante multimetro.

Banco prova utilizzato

Il banco prova, completo, utilizzato per la misura della portata ha il seguente schema:

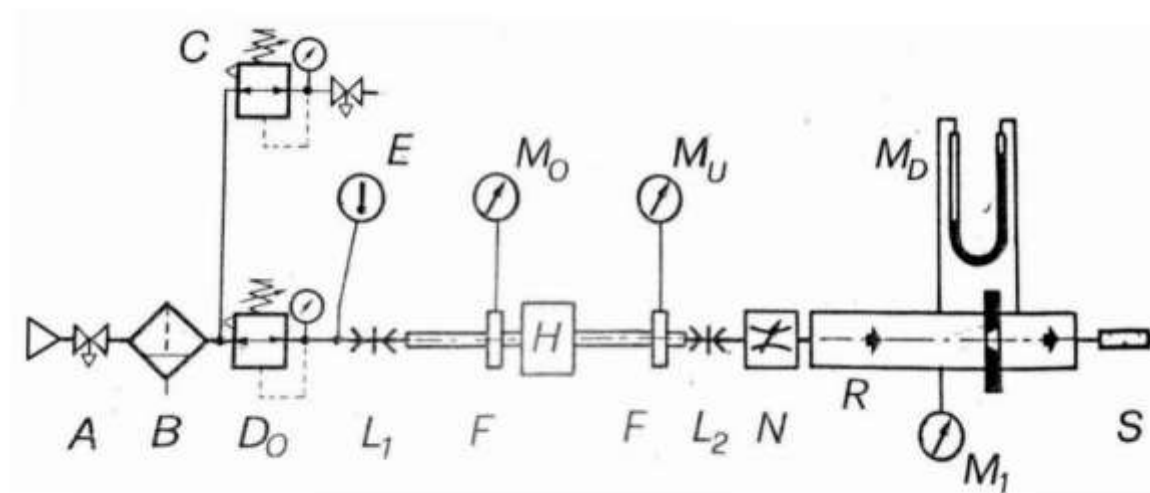


Figura 66 – Schema pneumatico banco prova utilizzato

Il sistema presenta un funzionamento analogo a quello descritto nel capitolo precedente. La linea viene attraversata da aria compressa, la cui pressione è controllata mediante un regolatore di pressione e mantenuta costante a monte della valvola in prova H. Dopo aver superato la valvola, il flusso attraversa lo strozzatore N, responsabile della variazione delle condizioni di lavoro del banco. Successivamente, l'aria entra nel tratto di misura, in cui è presente la piastra forata, responsabile della variazione di pressione. In origine, tale grandezza veniva misurata attraverso un manometro differenziale ad acqua; nella configurazione attuale, invece, è un trasduttore di pressione differenziale digitale. All'estremità del banco è presente un silenziatore, che possa attenuare il rumore prodotto dal fluire dell'aria compressa.

Nella configurazione originale, le pressioni venivano lette attraverso dei manometri analogici, di conseguenza ad ogni variazione dello strozzatore, l'operatore doveva appuntare il valore letto, creando l'insieme dei valori. Nella nuova configurazione, l'acquisizione del valore di pressione è automatica ed affidata all'insieme composto da trasduttore e scheda di acquisizione.

Come già illustrato precedentemente, le prove sono considerabili come una successione di punti di misura stazionari, ottenuti modificando la pressione a valle della valvola in prova mediante uno strozzatore.

Nuova configurazione del banco prova

La nuova configurazione del banco mantiene inalterati i componenti pneumatici del banco. La modifica riguarda l'aggiunta dei trasduttori di pressione in parallelo ai manometri ad acqua, già presenti, e della scheda di acquisizione. La scelta di mantenere collegati i manometri ad acqua è funzionale al confronto diretto dei valori acquisiti di pressione.

Al fine di alimentare i trasduttori sono stati impiegati due alimentatori, regolati rispettivamente a 5 V e 24 V.

Di seguito, è presentata la configurazione aggiornata della zona di misura del banco e della valvola in prova.

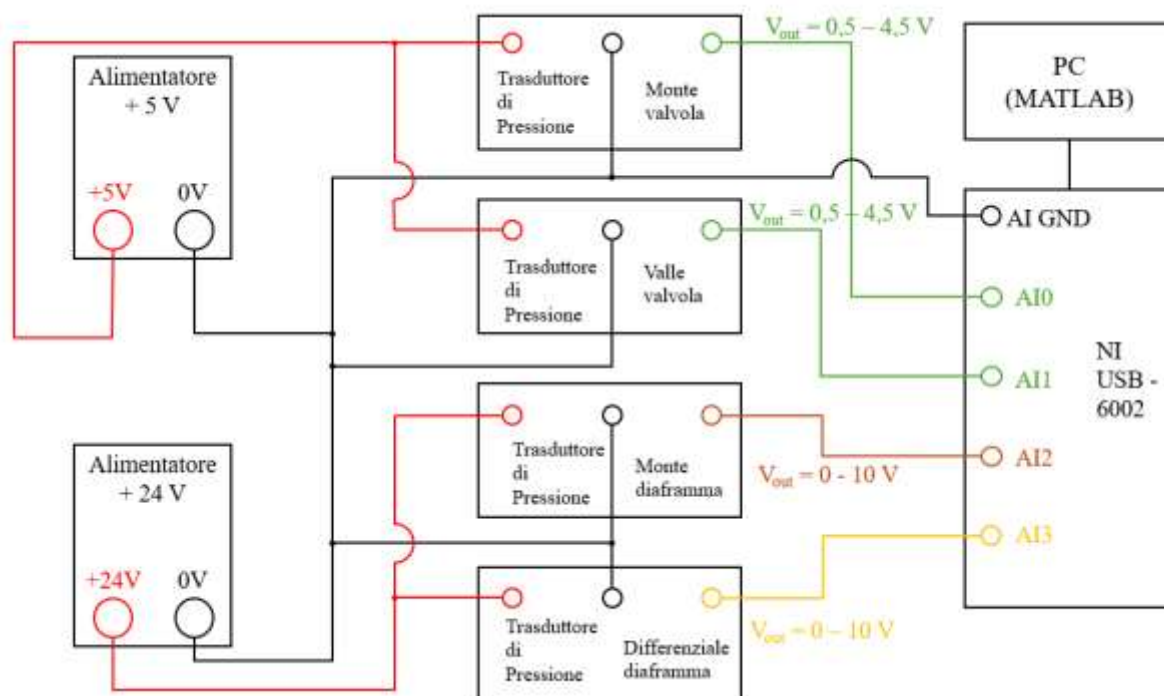


Figura 67 –Schema finale collegamenti elettrici nel banco

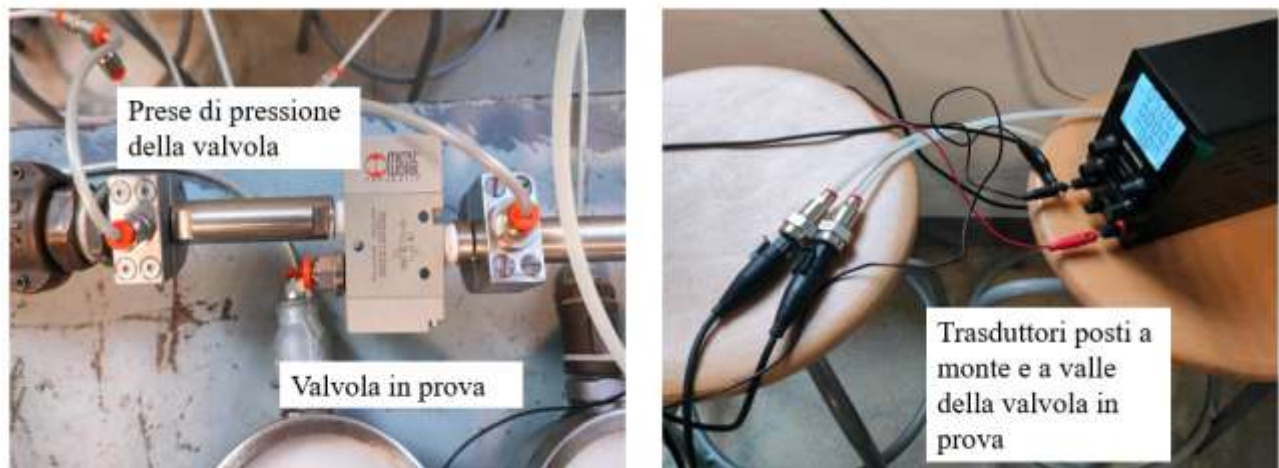


Figura 68 – Valvola in prova e relativi trasduttori

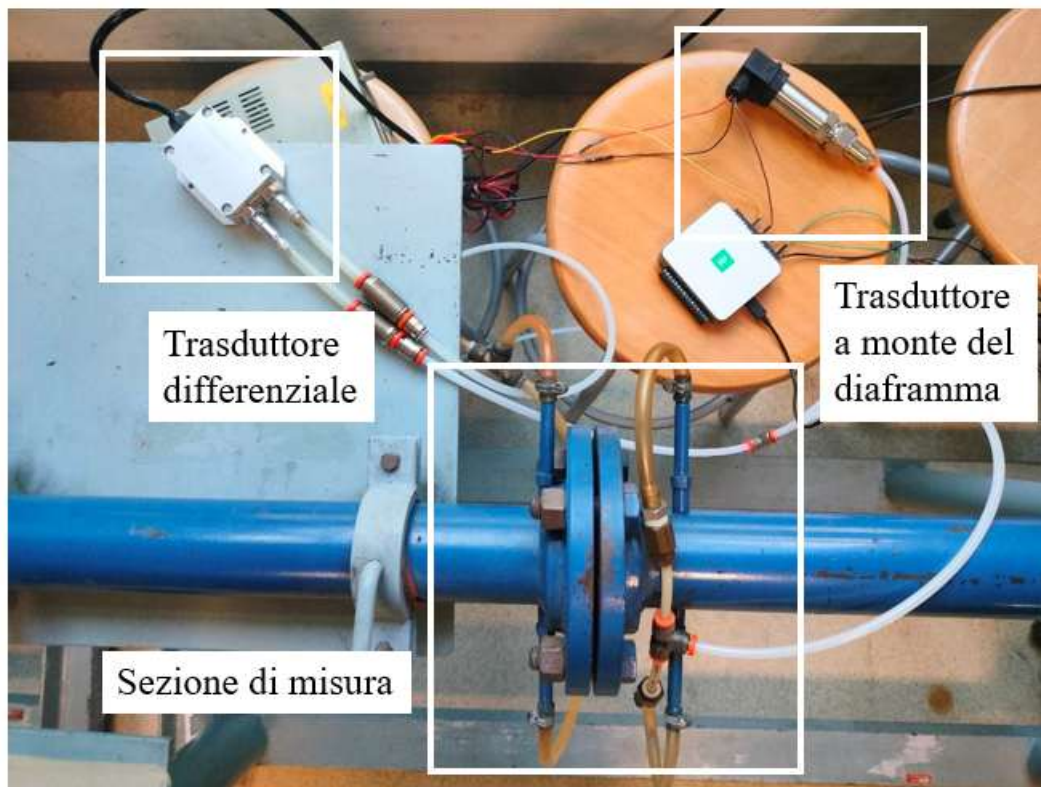


Figura 69 – Sezione di misura e relativi trasduttori

Esecuzione della prova finale

Prima dell'avvio della prova, è necessario verificare i collegamenti elettrici dei trasduttori, sia verso l'alimentazione sia verso la scheda di acquisizione. Successivamente, si valuti la configurazione iniziale del banco. Particolare attenzione è dedicata al regolatore di pressione posto

a monte della valvola in prova e allo strozzatore adibito alla modifica della pressione di valle della stessa.

Quando la configurazione è completamente chiusa, viene aperta l'alimentazione pneumatica, al valore di pressione desiderato. Inoltre, modificando l'apertura del regolatore si regoli più finemente il valore della pressione a monte. L'ultima caratteristica da verificare è la posizione iniziale dello strozzatore, in quanto da essa dipende la direzione della prova. Per una prova a portata decrescente lo strozzatore deve essere mantenuto completamente aperto e progressivamente chiuso, mentre per una prova a portata crescente viene posto inizialmente in condizioni completamente chiusa. In Figura 70 vengono indicati il regolatore e lo strozzatore.

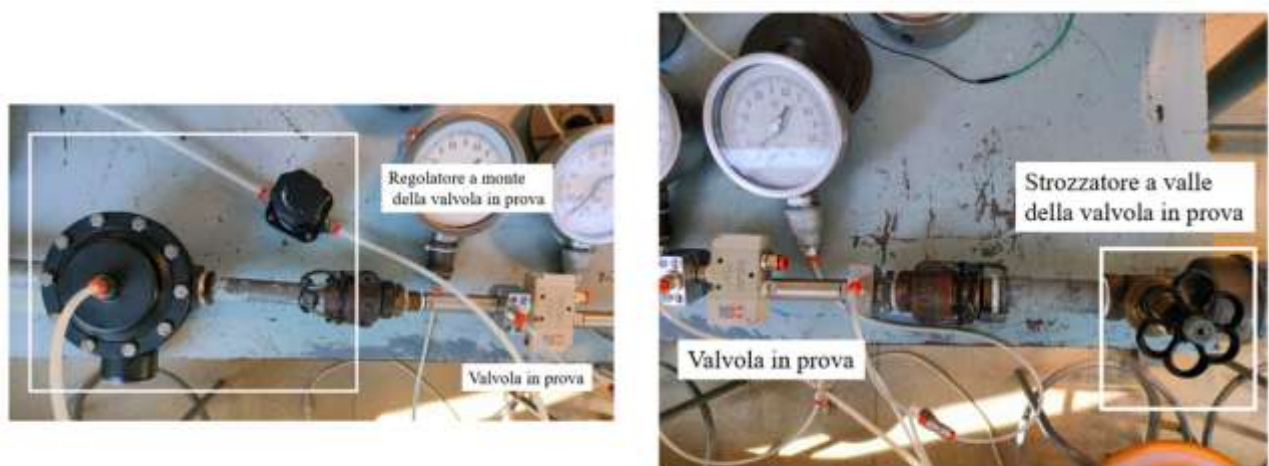


Figura 70 - Regolatore di pressione e strozzatore

A questo punto viene avviato lo script su MATLAB. All'avvio l'operatore seleziona la modalità di prova, scegliendo tra portata crescente, decrescente oppure entrambe le direzioni. In quest'ultimo caso, viene chiesto di specificare quale direzione viene acquisita per prima. Successivamente, si inseriscono il numero totale di punti, il valore della pressione atmosferica ed il valore nominale della pressione di monte della valvola.

Conclusa la fase di inizializzazione, si procede ad acquisire il primo punto. Per ogni punto, il software richiede la pressione relativa target a valle della valvola e la temperatura. L'operatore, a questo punto, regola la pressione di valle fino ad arrivare al target ed aggiusta quella di monte attraverso il riduttore mentre il programma visualizza continuamente i valori misurati a monte e a valle della valvola. Una volta raggiunte le condizioni richieste, viene eseguito il controllo di stabilità, solo se soddisfatto il punto viene salvato.

La procedura è ripetuta per tutti i punti della prova. Per ciascun punto il programma calcola la portata secondo la ISO 5167 e aggiorna in tempo reale il grafico dell'andamento della prova, di cui in Figura 71. Al termine, i risultati vengono salvati in un file CSV associato alla singola prova

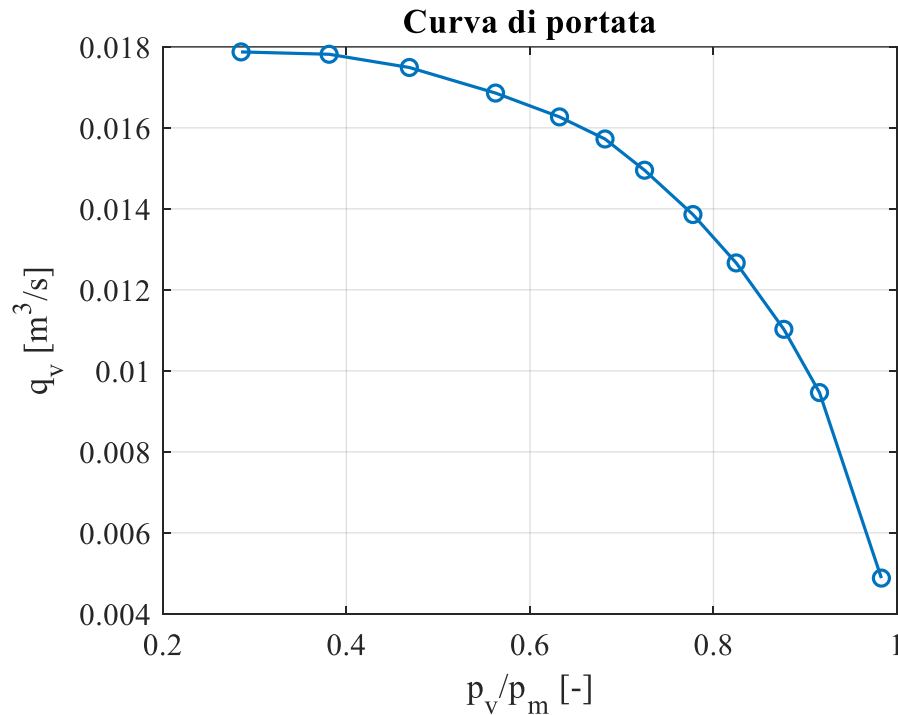


Figura 71 - Caratteristica della portata ricavata in tempo reale

La procedura descritta ha consentito di acquisire in modo strutturato le grandezze necessarie al calcolo della portata e alla caratterizzazione del comportamento della valvola. Nel capitolo successivo verranno analizzati i dati ottenuti, con particolare attenzione alla stabilità delle misure, alla ripetibilità delle prove, all'eventuale presenza di isteresi ed al confronto con i dati di targa della valvola.

Analisi sperimentali

Organizzazione delle prove sperimentali

La campagna sperimentale si è articolata in due differenti tipologie di prove, caratterizzate da finalità diverse. Il primo gruppo consta di tre prove eseguite nelle medesime condizioni operative, acquisendo sia la curva a portata crescente sia quella decrescente. Lo scopo è stato quello di valutare la ripetibilità e l'isteresi del sistema.

Il secondo gruppo, invece, è costituito da tre prove eseguite con valori diversi della pressione di alimentazione, acquisendo la curva di portata in un'unica direzione. In questo modo è possibile valutare il comportamento della valvola al variare della pressione di alimentazione.

Prova	Tipologia	N. di punti	Pressione di monte media (g)	Intervallo p_2/p_1	Finalità
AR1	Andata e ritorno	27	3,306	0,286 – 0,976	Ripetibilità e confronto tra i due rami
AR2	Andata e ritorno	27	3,305	0,286 – 0,976	Ripetibilità e confronto tra i due rami
AR3	Andata e ritorno	27	3,303	0,285 – 0,976	Ripetibilità e confronto tra i due rami
N1	Portata Crescente	10	3,252	0,283 – 0,961	Costruzione della caratteristica normalizzata
N2	Portata Crescente	10	2,8	0,307 – 0,959	Costruzione della caratteristica normalizzata
N3	Portata Crescente	10	2,311	0,340 - 0,963	Costruzione della caratteristica normalizzata

Figura 72 - Sintesi della campagna sperimentale

Verifica preliminare dei dati acquisiti

Prima dell'analisi delle caratteristiche, è stata verificata la coerenza dei dati acquisiti. Durante le prove di andata e ritorno, è stata mantenuta la pressione di monte prossima ai 3,3 bar (g), con una variazione inferiore allo 0.53%. Scostamenti analoghi sono stati registrati anche nelle prove eseguite con pressione di monte differenti.

La quasi totalità dei punti, pari a 105 su 111, ha rispettato i requisiti di stabilità al primo tentativo, mentre i rimanenti sei l'hanno raggiunta al secondo tentativo. A causa della configurazione del banco, non è stato possibile raggiungere valori del rapporto tra le pressioni p_2/p_1 inferiori a 0.28, mentre il valore massimo registrato è pari a 0.98. Il numero di Reynolds presenta valori compresi tra $8.4 \cdot 10^3$ e $3.15 \cdot 10^4$, mantenendosi, quindi, ampiamente sopra il limite di 5000 previsto dalla ISO 5167. I dati sono, quindi, ritenuti idonei alle successive analisi.

Analisi della ripetibilità e confronto tra andata e ritorno

Al fine di valutare la ripetibilità della prova sono state confrontate le tre prove eseguite con la stessa pressione di alimentazione. Dato che le ascisse dei punti non coincidevano esattamente, i dati di andata e ritorno sono stati interpolati separatamente mediante il metodo pchip, su una griglia comune [24].

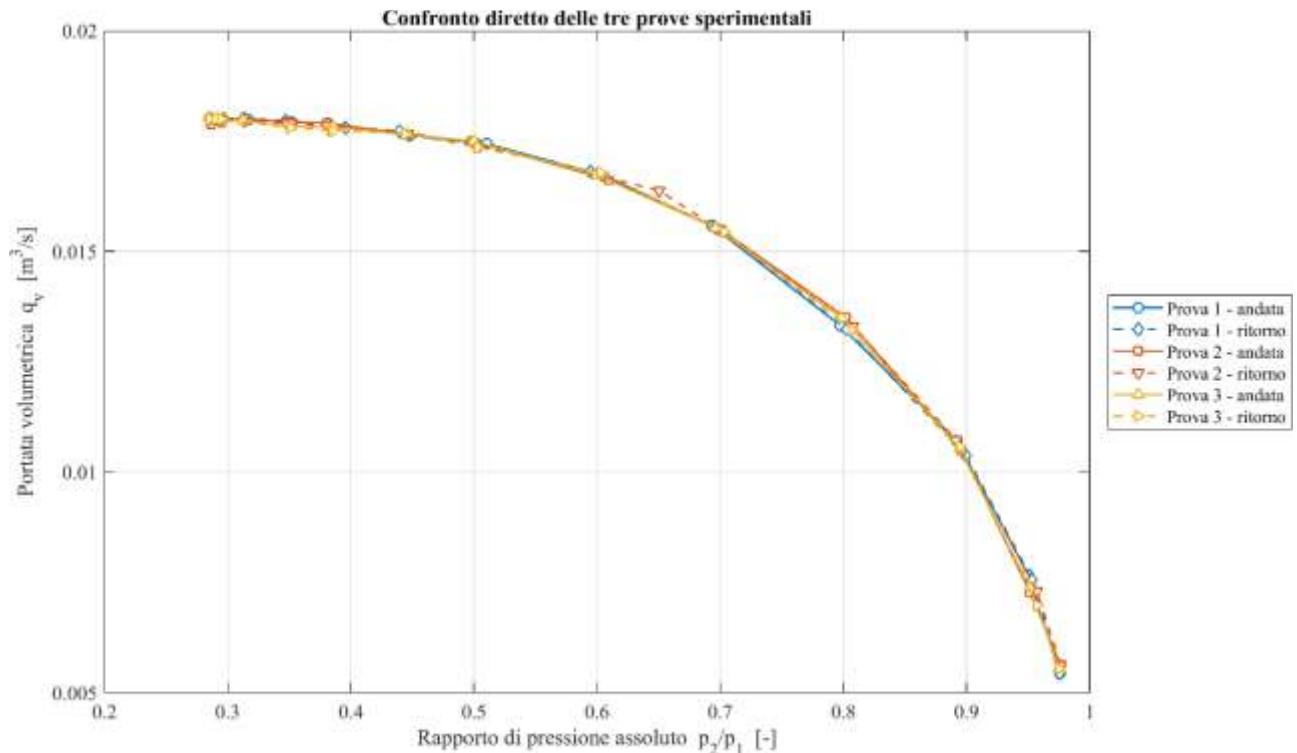


Figura 73 - Confronto diretto delle prove sperimentali

Le curve risultano quasi completamente sovrapposte.

Il coefficiente di variazione³ medio è pari a 0.419 % per il tratto di salita, mentre per il tratto in discesa vale 0.46 %. Gli scostamenti massimi si attestano per entrambe le curve intorno al 2.5%, concentrandosi nella zona in cui il rapporto tra le pressioni è unitario. Ciò è evidenziato dalla elevata pendenza della caratteristica: una piccola variazione della pressione di valle si riflette in una variazione più grande della portata.

Nella seguente figura è riportato il confronto tra l'andamento del coefficiente di variazione medio tra le prove.

³ Coefficiente di variazione medio: $CV = \frac{s_q}{\bar{q}_v} \cdot 100$; $\forall r \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \rightarrow \bar{q}_v = \frac{q_{v1} + q_{v2} + q_{v3}}{3}$; s_q : deviazione standard del punto in esame.

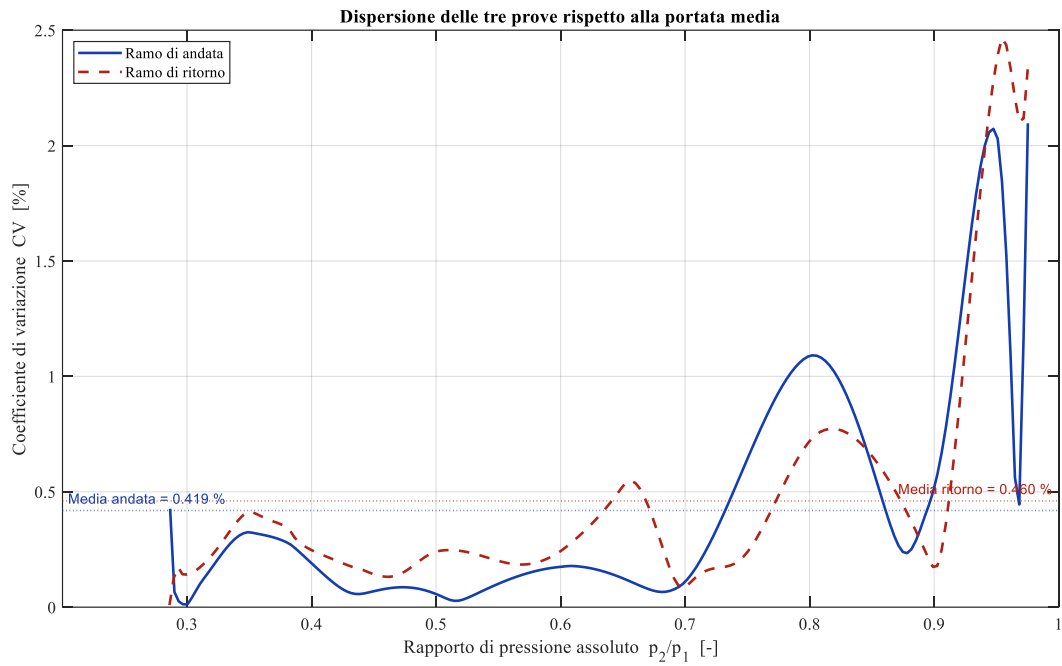


Figura 74 - Andamento del coefficiente di variazione medio

Inoltre, è stata calcolata la differenza percentuale tra il ramo di andata e di ritorno:

$$\delta_H = \frac{q_a - q_r}{(q_a + q_r)/2} \cdot 100$$

Dove q_a e q_r rappresentano le portate interpolate sul ramo di andata e su quello di ritorno. A differenza del coefficiente di variazione globale, questo parametro mette in evidenza la differenza tra andata e ritorno delle singole prove.

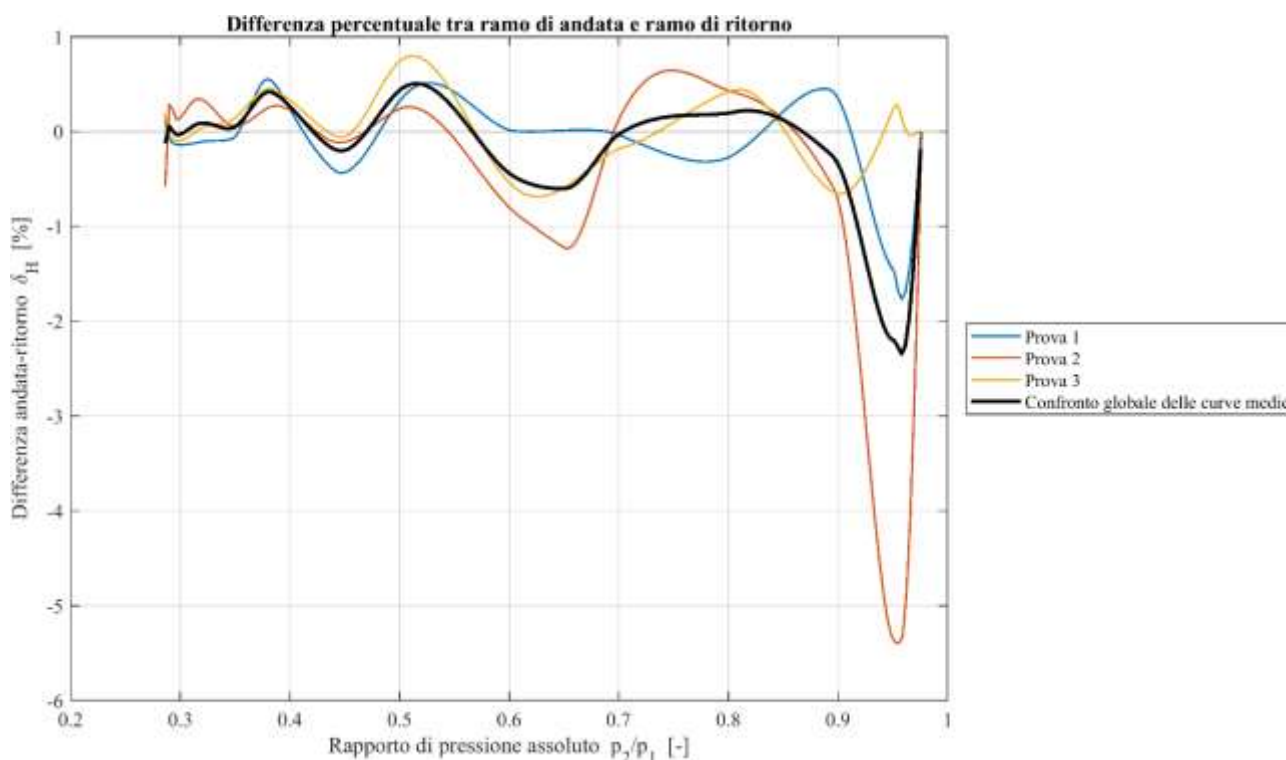


Figura 75 - Differenza percentuale tra ramo di andata e di ritorno

L'analisi delle curve evidenzia l'assenza di un pattern comune tra gli errori nelle prove; quindi, non è possibile delineare un comportamento isterico sistematico della valvola. Gli errori sono dovuti, quindi, alla configurazione sperimentale e alla maggiore sensibilità emersa nelle zone a bassa portata.

Indicatore	Andata	Ritorno
CV medio	0,42%	0,46%
CV massimo	2,10%	2,47%
Scostamento massimo dalla media	2,31%	2,85%
Differenza media assoluta andata-ritorno	0,36%	
Differenza massima globale	2,35%	

Figura 76 - Sintesi dei risultati di ripetibilità

In conclusione, le prove mostrano una buona ripetibilità, con coefficienti di variazione medi inferiori allo 0,5%. Anche il confronto tra i rami di andata e ritorno evidenzia differenze contenute, con uno scostamento medio assoluto globale pari allo 0,364%. I valori più elevati risultano localizzati nella zona con p_2/p_1 prossimo all'unità. Poiché le differenze cambiano segno e non presentano un andamento comune alle tre prove, non emerge una chiara isteresi sistematica della valvola.

Analisi dei coefficienti caratteristici della valvola

Durante la fase di post processing dei dati sono stati ricavati i valori caratteristici della valvola, utilizzando il modello descritto nella normativa ISO 6358. La norma prescrive l'esecuzione delle prove che abbiano inizio in condizioni di portata massima, procedano riducendo il flusso e si concludano ripetendo la misura nel verso crescente. La pressione di alimentazione assoluta a monte della valvola deve essere mantenuta costante e non inferiore a 5 bar.

Al fine di realizzare una descrizione dettagliata del comportamento della valvola, la normativa prescrive il calcolo di diversi coefficienti caratteristici. Il primo è il coefficiente di conduttanza sonica equivalente, associato ad ogni punto della prova. Tale coefficiente rappresenta l'utilizzo della valvola rispetto alla condizione sonica, indipendentemente dalla pressione di alimentazione.

$$C_e = \frac{q_N}{p_1} \sqrt{\frac{T_1}{T_N}}$$

dove q_N è la portata riferita alle condizioni ANR, p_1 la pressione assoluta di monte, T_1 la temperatura dell'aria durante la prova e $T_N = 293,15$ K.

La conduttanza sonica C rappresenta la capacità della valvola di farsi attraversarla dall'aria nelle sue condizioni soniche, indipendentemente dalla pressione di alimentazione.

Il coefficiente C deve essere calcolato come media dei valori di C_e appartenenti al plateau sonico.

$$C = \frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{n_s} C_{e_i}$$

Un ulteriore parametro è il rapporto critico di pressioni b , definito come il rapporto tra la pressione di valle rispetto a quella di monte. Esso individua il punto di transizione tra il comportamento sonico e quello sub-sonico.

Il modello adottato per descrivere il comportamento della valvola è il seguente:

$$\frac{C_e}{C} = \begin{cases} 1, & \frac{p_2}{p_1} \leq b \\ \left[1 - \left(\frac{\frac{p_2}{p_1} - b}{1 - b} \right)^2 \right]^m, & \frac{p_2}{p_1} > b \end{cases}$$

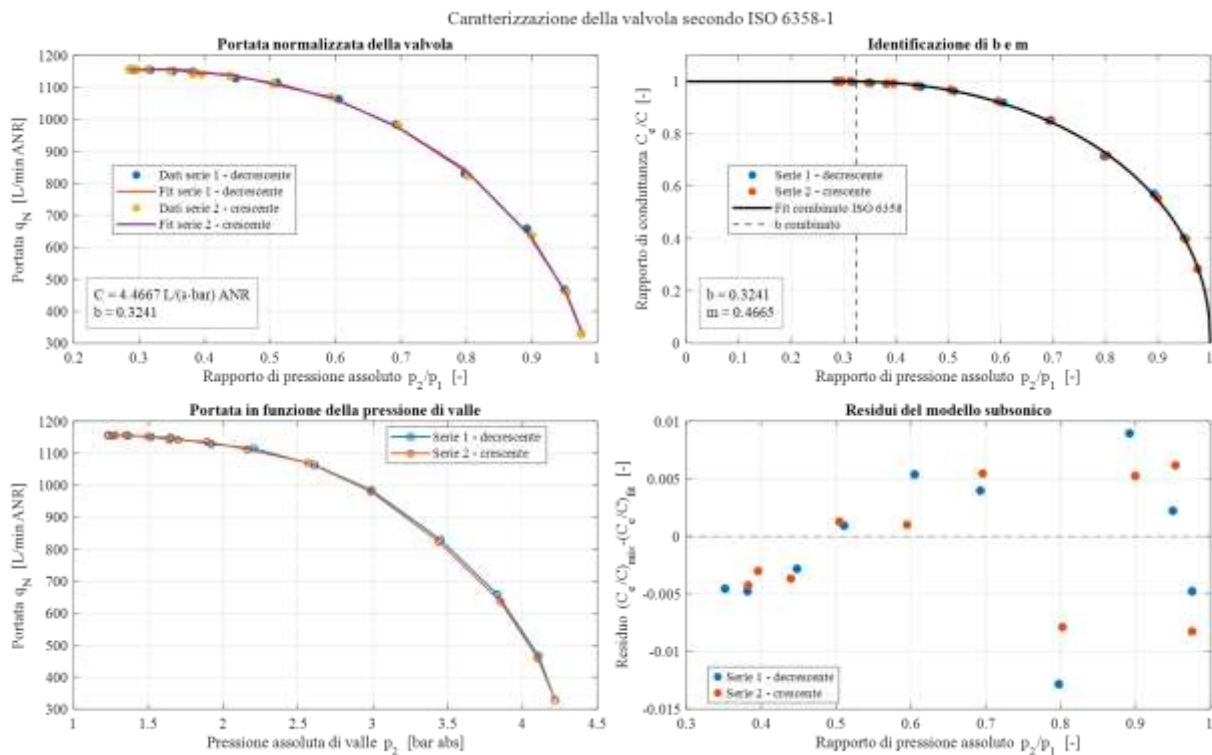
La normativa prescrive l'acquisizione di almeno di tre punti per il tratto sonico ed almeno cinque per la caratterizzazione della regione subsonica. Nel caso in cui i valori dei coefficienti differiscano di un valore superiore al 5%, essi devono essere riportati separatamente.

Nel caso in esame sono stati acquisiti 14 punti, di cui 4 usati per la caratterizzazione del tratto sonico e i rimanenti per la regione subsonica. Poiché i valori ottenuti non presentano scostamenti superiori al 5, i coefficienti sono considerati univoci e presentati come la media dei valori ricavati tra i tratti di salita e di discesa della medesima prova.

L'ultimo parametro considerato è il coefficiente m , definito indice subsonico, che definisce la forma della curva nel tratto subsonico. Quando il suo valore è compreso tra $0.48 \leq m \leq 0.52$, esso può essere assunto pari $m = 0.5$.

I coefficienti b ed m devono essere ricavati mediante fit non lineare dei punti subsonici.

A titolo esemplificativo, la Figura 77 mostra il risultato del post-processing applicato a una delle tre prove. Sono riportati il confronto tra i rami decrescente e crescente, il fit della caratteristica secondo il modello ISO 6358, la posizione del rapporto critico b e l'andamento dei residui. La buona sovrapposizione tra dati sperimentali e curve interpolate conferma la coerenza dell'elaborazione, mentre la distribuzione dei residui intorno allo zero evidenzia l'assenza di scostamenti sistematici rilevanti.



Dopo aver determinato i coefficienti, è stata valutata la capacità del modello di rappresentare i dati sperimentali mediante l'utilizzo del parametro R^{24} . Tutte le curve presentano valori prossimi all'unità, confermando la capacità del modello di descrivere i dati sperimentali.

Nella seguente figura è riportata una sintesi dei risultati ottenuti.

Prova	C [L/(s·bar) ANR]	C [L/(min·bar) ANR]	b	m	R ²
1	4,4667	268,002	0,3241	0,4665	0,99945
2	4,4716	268,296	0,3274	0,4635	0,99939
3	4,4634	267,804	0,3336	0,4733	0,99974
Media	4,4672	268,032	0,3284	0,4677	—

Figura 78 - Sintesi dei risultati del fitting

Le differenze tra valori del coefficiente C tra i rami di salita e di discesa sono inferiori allo 0,1%, ciò testimonia l'alta ripetibilità della prova.

Per concludere l'analisi, i risultati ottenuti sono stati confrontati con i dati dichiarati dal costruttore:

$$C_{cat} = 264.76 \frac{Nl}{min \cdot bar}$$

$$b_{cat} = 0.27$$

La conduttanza media sperimentale presenta uno scostamento percentuale pari all'1,24%, mostrando una buona coerenza tra la misura ed il valore nominale. Il rapporto critico misurato risulta, invece, maggiore di quello dichiarato; tale differenza può essere imputabile alla mancata conformità del banco prova ai requisiti previsti dalla ISO 6358.

⁴ L'espressione del coefficiente di determinazione è: $R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$
dove:

- y_i è il valore sperimentale;
- $\hat{y}_i$ è il valore previsto dal modello;
- $\bar{y}$ è la media dei valori sperimentali;
- n è il numero di punti.

Nel complesso, la vicinanza dei punti misurati nei rami in salita e di discesa della stessa prova, la coerenza tra le diverse prove e il ridotto scostamento tra il coefficiente C sperimentale e quello dichiarato da catalogo, consentono di confermare la correttezza delle misure e della procedura di elaborazione. Tale risultato è particolarmente significativo, considerando che né il banco prova né le modalità sperimentali sono pienamente conformi alla ISO6358.

Curva caratteristica normalizzata

Al fine di comprovare l'indipendenza della caratteristica della valvola dalla pressione di alimentazione, sono state svolte tre prove con pressioni assolute di monte diverse, pari a circa 4.25, 3.80 e 3.30 bar (a).

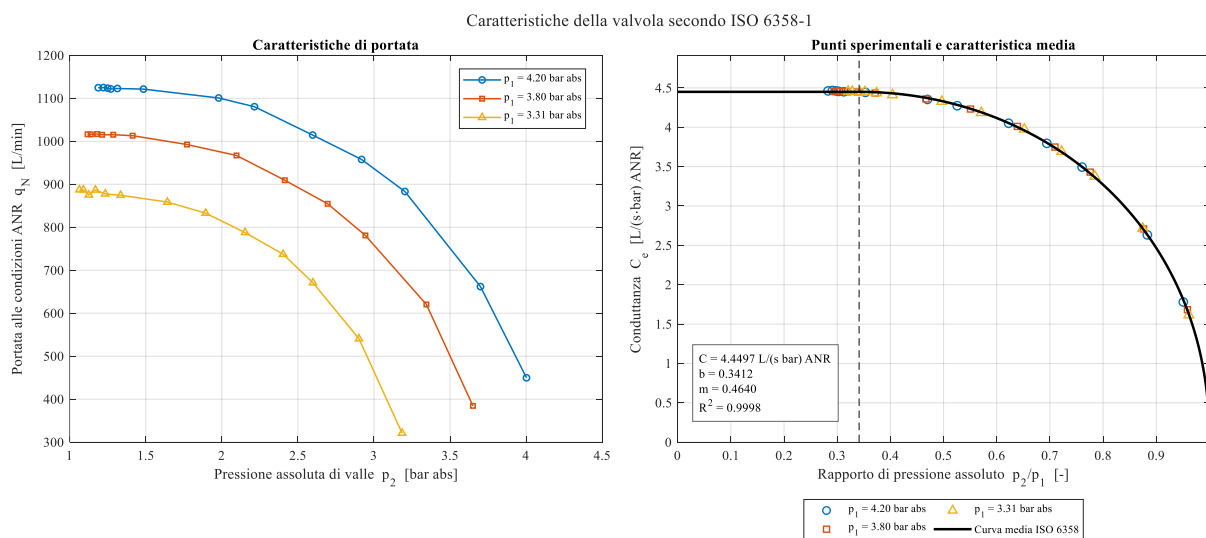


Figura 79 - Curva normalizzata

I coefficienti della caratteristica normalizzata sono stati confrontati con i valori medi ricavati dalle prove di andata e ritorno.

Elaborazione	C [L/(s·bar) ANR]	b	m
Media prove andata-ritorno	4,4672	0,3284	0,4677
Caratteristica normalizzata	4,4497	0,3412	0,464
Scostamento relativo	0,39%	3,91%	0,79%

Figura 80 - Confronto dei dati

Nel complesso i coefficienti sono vicini quindi si può affermare che confermino la coerenza tra le procedure di prova. Il parametro b presenta la variabilità maggiore, ciò potrebbe essere imputabile alla sensibilità dei punti che si concentrano nel tratto di transizione tra il regime sonico e subsonico.

Limiti dell'analisi sperimentale

I risultati ottenuti devono essere analizzati avendo presente i limiti della campagna sperimentale. Le prove sono state realizzate analizzando un solo esemplare di valvola. Inoltre, la temperatura è stata considerata costante e non è stata misurata per ogni punto, la pressione di monte risulta inferiore al limite inferiore indicato dalla norma ISO 6358 e la geometria dei tratti a monte e valle della valvola non rispettano le prescrizioni.

Tali scostamenti sembrano aver inciso sul calcolo del coefficiente b , più sensibile nella regione di transizione, mentre la conduttanza sonora C ha mostrato una maggiore stabilità. Perciò, i risultati possono essere definiti ripetibili ma non formalmente conformi alla ISO 6358.

Aspetto	Valutazione
Numero di punti sonici e subsonici	Rispettato
Acquisizione nei due versi	Rispettata
Stabilizzazione prima dell'acquisizione	Rispettata
Uso delle pressioni assolute	Rispettato
Pressione di monte $p_1 = 500$ kPa	Non rispettato
Misura della temperatura per ogni punto	Non rispettata
Geometria completa dei tubi ISO 6358	Non rispettata
Verifica completa di taratura e incertezza	Non dimostrata
Cinque esemplari per dati di catalogo	Non rispettato

Figura 81 - Sintesi requisiti

Valutazione complessiva dei risultati

Nel complesso, la campagna sperimentale ha evidenziato una buona coerenza delle misure e dell'elaborazione sviluppata. Le tre prove di andata e ritorno hanno mostrato una dispersione contenuta, con coefficienti di variazione medi inferiori allo 0,5%, mentre il confronto tra i due rami non ha evidenziato un comportamento isteretico sistematico.

Anche i coefficienti caratteristici ricavati mediante il modello ISO 6358 risultano tra loro molto vicini. In particolare, la conduttanza sonora ha mostrato un'elevata ripetibilità e uno scostamento ridotto rispetto al valore dichiarato dal costruttore. La caratteristica normalizzata ottenuta a differenti pressioni di alimentazione ha inoltre evidenziato una buona sovrapposizione dei punti sperimentali e un'elevata qualità del fit.

Una maggiore variabilità è stata osservata per il rapporto critico b , maggiormente sensibile alla distribuzione dei punti nella regione di transizione e alle condizioni sperimentali. Nonostante i

limiti del banco e la mancata piena conformità alla ISO 6358, i risultati confermano la corretta acquisizione dei dati, la stabilità del sistema e l'affidabilità delle procedure di post-processing sviluppate in MATLAB.

Conclusioni e sviluppi futuri

Il presente lavoro di tesi ha avuto come obiettivo la progettazione di un banco prova destinato alla misura della portata d'aria attraverso componenti pneumatici di piccola taglia. L'attività ha avuto inizio con lo studio della normativa e l'applicazione delle relative prescrizioni costruttive e delle procedure di calcolo della portata.

Inoltre, è stato studiato il sistema di acquisizione ed elaborazione dei dati in ambiente MATLAB. Il lavoro ha quindi permesso di realizzare un primo dimensionamento dell'intera architettura del sistema di misura, comprendendo una metodologia di acquisizione che permetta all'operatore di acquisire i segnali, determinare la portata ed elaborare successivamente i dati.

Conclusioni

Dal punto di vista progettuale, il lavoro ha portato alla definizione di un banco prova per aria compressa operante a una pressione di riferimento di 7 bar assoluti e destinato alla caratterizzazione di valvole pneumatiche di piccola taglia. La sezione di misura è stata dimensionata con una tubazione di diametro interno pari a 50 mm, una piastra con orifizio di diametro pari a 12,5 mm, corrispondente a un rapporto $\beta = 0,25$, prese di pressione di tipo flange taps e un condizionatore di flusso Zanker.

Parallelamente, è stato sviluppato in MATLAB un sistema modulare in grado di acquisire i segnali dei quattro trasduttori mediante la scheda NI USB-6002, verificarne la stabilità, calcolare iterativamente la portata secondo la ISO 5167 e salvare i risultati delle prove. La successiva applicazione del sistema su un banco già esistente ha mostrato coefficienti di variazione medi inferiori allo 0,5% e una differenza media assoluta tra i rami di andata e ritorno pari allo 0,364%, senza evidenziare un comportamento isteretico sistematico. Anche i coefficienti caratteristici ricavati mediante il modello ISO 6358 sono risultati coerenti tra le diverse prove, con una conduttanza sonica prossima al valore dichiarato dal costruttore.

Limiti del lavoro

Il principale limite del lavoro è rappresentato dalla mancata realizzazione del banco prova dimensionato. Perciò, non è stato possibile verificare sperimentalmente la configurazione progettata né valutare gli effetti reali delle scelte geometriche sul profilo di velocità, sulle perdite di pressione e sull'incertezza della misura. Inoltre, il rispetto delle prescrizioni relative ai tratti rettilinei e l'ingombro dei componenti hanno portato a una lunghezza complessiva stimata di circa 2255 mm, superiore al limite iniziale di 2 m. Il contenimento dell'ingombro ha richiesto alcuni

compromessi, in particolare nei tratti posti a monte e a valle della valvola in prova, che non rispettano integralmente la configurazione indicata dalla ISO 6358.

Anche la validazione sperimentale presenta alcune limitazioni, poiché è stata eseguita su un banco già esistente, non ufficialmente certificato, e ha riguardato un solo esemplare di valvola. La temperatura è stata assunta costante anziché essere misurata in ciascun punto, mentre la pressione di monte e la geometria della sezione di prova non rispettavano completamente le prescrizioni della ISO 6358. Pertanto, i risultati ottenuti possono essere considerati coerenti e ripetibili, ma non formalmente conformi alla normativa. Non è stata inoltre sviluppata una valutazione completa dell'incertezza dell'intera catena di misura.

Sviluppi futuri

Gli sviluppi futuri riguardano innanzitutto la realizzazione e il collaudo del banco prova dimensionato, così da verificare sperimentalmente la configurazione definita e il rispetto delle condizioni previste dalla ISO 5167. Una volta completato il montaggio, sarà necessario valutare l'effetto delle scelte geometriche sulla stabilità del flusso, sulle pressioni misurate e sull'incertezza associata al calcolo della portata. Il sistema potrà inoltre essere completato introducendo la misura della temperatura e automatizzando la regolazione della pressione di monte mediante il regolatore proporzionale. Dal punto di vista sperimentale, sarà opportuno estendere la campagna di prove a più tipologie ed esemplari di valvole, così da verificare la ripetibilità del metodo e ampliare il campo di applicazione del banco. Infine, il software MATLAB potrà essere ulteriormente sviluppato integrando il calcolo automatico dell'incertezza, e una gestione più completa della prova da parte dell'operatore.

Appendice A: Codice sorgente MATLAB

Listato 1 - Main prova portata

```
%% MAIN PROVA PORTATA CON MPPE
% Regolazione automatica della pressione di monte tramite MPPE
% Regolazione manuale dello strozzatore
% Acquisizione del punto stabile
% Calcolo della portata secondo ISO 5167
% Salvataggio dei risultati su CSV
% Acquisizione di serie crescenti, decrescenti o di un ciclo completo
% andata-ritorno con punto di inversione unico

clear;
clc;
close all;

%% 1. PARAMETRI GEOMETRICI

tap_type = "DD2";      % "flange", "corner", "DD2"

D_mm = 50;             % Diametro interno del tubo [mm]
d_mm = 19.05;          % Diametro del foro del diaframma [mm]

D = D_mm/1000;         % [m]
d = d_mm/1000;         % [m]

%% 2. PARAMETRI DEL FLUIDO

R_air = 287;           % Costante specifica dell'aria [J/(kg K)]
mu1    = 1.85e-5;      % Viscosita' dinamica [Pa s]
kappa = 1.4;           % Coefficiente di espansione isentropica [-]

%% 3. PARAMETRI SOLVER ISO 5167

tol_iso = 1e-8;
Nmax_iso = 100;

%% 4. PARAMETRI DI ACQUISIZIONE

params.window_s      = 3;      % Durata della finestra [s]
params.max_attempts  = 20;     % Numero massimo di tentativi
params.pause_s       = 1;      % Pausa tra i tentativi [s]

%% Modalita' della prova

mode_choice = input([ ...
    'Selezionare la modalita'' di prova:\n' ...
    ' [1] Solo portata crescente\n' ...
    ' [2] Solo portata decrescente\n' ...
    ' [3] Ciclo completo andata-ritorno\n' ...
    'Scelta: '], 's');

mode_choice = strtrim(mode_choice);

switch mode_choice

    case {'1', '2'}
```

```

is_full_cycle = false;

n_points = input( ...
    'Inserisci il numero totale di punti della singola serie: ');

if isempty(n_points) || ...
    ~isscalar(n_points) || ...
    ~isfinite(n_points) || ...
    n_points < 2 || ...
    n_points ~= floor(n_points)

    error(['Il numero di punti deve essere un intero ' ...
        'maggiore o uguale a 2.']);
end

n_points_branch = NaN;
first_direction = "";
second_direction = "";
turning_state = "";

if strcmp(mode_choice, '1')
    single_direction = "crescente";
    fprintf(['\nProva singola a portata crescente: partire dalla ' ...
        'portata minima e aprire progressivamente lo strozzatore.\n']);
else
    single_direction = "decrescente";
    fprintf(['\nProva singola a portata decrescente: partire dalla ' ...
        'portata massima e chiudere progressivamente lo
strozzatore.\n']);
end

case '3'

    is_full_cycle = true;
    single_direction = "";

    n_points_branch = input([ ...
        'Inserisci il numero di punti per ciascun ramo, ' ...
        'incluso il punto di inversione: ']);

    if isempty(n_points_branch) || ...
        ~isscalar(n_points_branch) || ...
        ~isfinite(n_points_branch) || ...
        n_points_branch < 2 || ...
        n_points_branch ~= floor(n_points_branch)

        error(['Il numero di punti per ramo deve essere un intero ' ...
            'maggiore o uguale a 2.']);
    end

    % Il punto di inversione viene acquisito una sola volta.
    n_points = 2*n_points_branch - 1;

    cycle_choice = input([ ...
        'Direzione del primo ramo: [D] portata decrescente ' ...
        'oppure [C] portata crescente? ', 's'));

    cycle_choice = upper(strtrim(cycle_choice));

    switch cycle_choice

```



```

        case 'D'
            first_direction = "decescente";
            second_direction = "crescente";
            turning_state = "portata minima";

        case 'C'
            first_direction = "crescente";
            second_direction = "decescente";
            turning_state = "portata massima";

        otherwise
            error('Scelta non valida. Inserire D oppure C.');
```

end

```

    otherwise
        error('Modalita' non valida. Inserire 1, 2 oppure 3.');
```

end

```

fprintf('Numero totale di acquisizioni previsto: %d\n', n_points);

%% 5. FILE CSV

header = { ...
    'point_id', ...
    'flow_direction', ...
    'cycle_branch', ...
    'is_turning_point', ...
    'T1_K', ...
    'p_atm_abs_Pa', ...
    'p_set_valve_up_gauge_Pa', ...
    'p_target_valve_down_gauge_Pa', ...
    'p_valve_up_gauge_Pa', ...
    'p_valve_up_abs_Pa', ...
    'p_valve_down_gauge_Pa', ...
    'p_valve_down_abs_Pa', ...
    'pressure_ratio', ...
    'p1_orifice_gauge_Pa', ...
    'p1_orifice_abs_Pa', ...
    'dp_orifice_Pa', ...
    'p2_orifice_gauge_Pa', ...
    'p2_orifice_abs_Pa', ...
    'rho1_kg_m3', ...
    'qm_kg_s', ...
    'qv_m3_s', ...
    'ReD', ...
    'C', ...
    'epsilon', ...
    'beta', ...
    'd_mm', ...
    'MPPE_Vcmd', ...
    'MPPE_err_rel', ...
    'stable_attempts'};

output_folder = "Dati_prove";

if ~isfolder(output_folder)
    mkdir(output_folder);
end

timestamp = char(datetime( ...
```

```

        'now', ...
        'Format', 'yyyyMMdd_HH:mm:ss'));

csv_filename = fullfile( ...
    output_folder, ...
    ['risultati_prove_MPPE_' timestamp '.csv']);

writecell(header, csv_filename);

%% 6. INIZIALIZZAZIONE NI USB-6002

dq = daq("ni");

ch0 = addinput(dq, "Dev2", "ai0", "Voltage"); % Monte valvola
ch1 = addinput(dq, "Dev2", "ai1", "Voltage"); % Valle valvola
ch2 = addinput(dq, "Dev2", "ai2", "Voltage"); % Monte diaframma
ch3 = addinput(dq, "Dev2", "ai3", "Voltage"); % Differenziale diaframma

% Uscita analogica per il comando della MPPE
addoutput(dq, "Dev2", "ao0", "Voltage");

ch0.TerminalConfig = "SingleEnded";
ch1.TerminalConfig = "SingleEnded";
ch2.TerminalConfig = "SingleEnded";
ch3.TerminalConfig = "SingleEnded";

dq.Rate = 100; % Frequenza di acquisizione [Hz]

%% 7. MAPPA DEI CANALI

channels.valve_up = 1; % AI0
channels.valve_down = 2; % AI1
channels.p1 = 3; % AI2
channels.dp = 4; % AI3

%% 8. PRESSIONE ATMOSFERICA E PRESSIONE NOMINALE DI MONTE

p_atm_bar_abs = input( ...
    'Inserisci pressione atmosferica [bar abs]: ');

if isempty(p_atm_bar_abs) || ...
    ~isscalar(p_atm_bar_abs) || ...
    ~isfinite(p_atm_bar_abs) || ...
    p_atm_bar_abs <= 0

    error('Pressione atmosferica non valida.');
```

```

end

p_atm_Pa = p_atm_bar_abs * 1e5;

p_set_up_bar_gauge = input( ...
    'Inserisci pressione nominale a monte della valvola [bar(g)]: ');

if isempty(p_set_up_bar_gauge) || ...
    ~isscalar(p_set_up_bar_gauge) || ...
    ~isfinite(p_set_up_bar_gauge) || ...
    p_set_up_bar_gauge < 0

    error('Pressione nominale di monte non valida.');
```

```

end

```

```

p_set_up_gauge_Pa = p_set_up_bar_gauge * 1e5;
p_set_up_abs_Pa   = p_atm_Pa + p_set_up_gauge_Pa;

%% 9. PARAMETRI MPPE

mppe.p_min_bar = 0;
mppe.p_max_bar = 10;

mppe.V_min = 0;
mppe.V_max = 10;

ctrl.max_iter = 20;
ctrl.settle_s = 0.5;
ctrl.read_s   = 0.5;
ctrl.tol_rel  = 0.05;      % Tolleranza relativa: 5%
ctrl.Kp       = 0.6;

%% 10. PARAMETRI CONTROLLO TARGET DI VALLE

target_params.tolerance_bar = 0.02; % Tolleranza [bar]
target_params.window_s      = 0.5;  % Durata lettura [s]
target_params.n_confirm     = 6;    % Conferme consecutive
target_params.timeout_s     = 180;  % Tempo massimo [s]

%% 11. INIZIALIZZAZIONE DATI PER IL GRAFICO

pressure_ratio_array = nan(1, n_points);
qv_array             = nan(1, n_points);

figure(1);
set(gcf, 'Color', 'w');

%% 12. CICLO DEI PUNTI DI PROVA

fprintf('\n===== INIZIO PROVA CON MPPE =====\n');

%% Temperatura

T1 = input('Inserisci la temperatura del punto [K]: ');

if isempty(T1) || ~isscalar(T1) || ~isfinite(T1) || T1 <= 0
    error('Temperatura non valida. Prova interrotta.');
```

```

end

for i = 1:n_points

    fprintf('\n-----\n');
    fprintf('PUNTO %d di %d\n', i, n_points);

    %% Identificazione del ramo della prova

    if is_full_cycle

        if i < n_points_branch

            flow_direction = first_direction;
            cycle_branch   = "andata";
            is_turning_point = false;

```

```

elseif i == n_points_branch

    flow_direction    = "inversione";
    cycle_branch      = "inversione";
    is_turning_point  = true;

else

    flow_direction    = second_direction;
    cycle_branch      = "ritorno";
    is_turning_point  = false;

end

else

    flow_direction    = single_direction;
    cycle_branch      = "singolo";
    is_turning_point  = false;

end

if is_turning_point
    fprintf('PUNTO DI INVERSIONE: %s.\n', char(turning_state));
    fprintf(['Questo punto viene acquisito una sola volta e sara' ' ' ...
            'utilizzato per entrambi i rami nel post-processing.\n']);
elseif flow_direction == "decrescente"
    fprintf('Ramo %s: portata decrescente.\n', char(cycle_branch));
    fprintf('Chiudere progressivamente lo strozzatore.\n');
else
    fprintf('Ramo %s: portata crescente.\n', char(cycle_branch));
    fprintf('Aprire progressivamente lo strozzatore.\n');
end

%% Prima regolazione della pressione di monte con MPPE

fprintf('\nRegolazione iniziale della pressione di monte...\n');

ctrl_out = regola_pressione_monte( ...
    dq, ...
    channels, ...
    p_set_up_abs_Pa, ...
    p_atm_Pa, ...
    mppe, ...
    ctrl);

if ~ctrl_out.converged
    warning(['Pressione di monte non raggiunta entro la tolleranza. ' ...
            'Punto scartato.']);
    continue;
end

fprintf('Pressione monte regolata = %.4f bar abs\n', ...
    ctrl_out.p_meas_abs_Pa/1e5);

fprintf('Errore relativo MPPE = %.3f %%\n', ...

```

```

        ctrl_out.err_rel*100);

%% Regolazione manuale della pressione a valle

p_target_bar = input( ...
    'Inserisci pressione target a valle della valvola [bar(g)]: ');

if isempty(p_target_bar) || ...
    ~isscalar(p_target_bar) || ...
    ~isfinite(p_target_bar) || ...
    p_target_bar < 0

    warning('Pressione target di valle non valida. Punto scartato. ');
    continue;
end

target_ok = controlla_pressione_target( ...
    dq, ...
    channels, ...
    p_target_bar, ...
    target_params);

if ~target_ok
    fprintf('Target non raggiunto. Punto %d scartato.\n', i);
    continue;
end

%% Seconda regolazione della pressione di monte

% La regolazione dello strozzatore puo' aver modificato la pressione
% a monte della valvola. La MPPE viene quindi regolata nuovamente.

fprintf('\nVerifica finale della pressione di monte...\n');

ctrl_out = regola_pressione_monte( ...
    dq, ...
    channels, ...
    p_set_up_abs_Pa, ...
    p_atm_Pa, ...
    mppe, ...
    ctrl);

if ~ctrl_out.converged
    warning(['Pressione di monte non raggiunta dopo la regolazione ' ...
        'dello strozzatore. Punto scartato.']);
    continue;
end

%% Riconferma della pressione target a valle

fprintf('\nRiconferma della pressione target a valle...\n');

target_ok = controlla_pressione_target( ...
    dq, ...
    channels, ...
    p_target_bar, ...
    target_params);

if ~target_ok
    fprintf(['Target di valle non riconfermato. ' ...

```

```

        'Punto %d scartato.\n'], i);
    continue;
end

fprintf('\nNon modificare piu'' lo strozzatore.\n');
fprintf('Verifica della stabilita'' in corso...\n');

%% Acquisizione del punto stabile

point = acquisisci_punto_equilibrio( ...
    dq, ...
    channels, ...
    params);

if ~point.ok
    fprintf('Punto %d NON valido: %s\n', ...
        i, point.message);
    continue;
end

fprintf('%s\n', point.message);

%% Pressioni del diaframma

p1_orifice_gauge = point.P_mean.p1;
dp = point.P_mean.dp;

if ~isfinite(dp) || dp <= 0
    warning( ...
        'Delta p non valida: %.2f Pa. Punto scartato.', ...
        dp);
    continue;
end

p1_orifice_abs = p_atm_Pa + p1_orifice_gauge;

p2_orifice_gauge = p1_orifice_gauge - dp;
p2_orifice_abs = p1_orifice_abs - dp;

%% Pressioni della valvola

p_valve_up_gauge = point.P_mean.valve_up;
p_valve_down_gauge = point.P_mean.valve_down;

p_valve_up_abs = ...
    p_atm_Pa + p_valve_up_gauge;

p_valve_down_abs = ...
    p_atm_Pa + p_valve_down_gauge;

if p_valve_up_abs <= 0 || p_valve_down_abs <= 0
    warning('Pressione assoluta della valvola non valida. Punto scartato.');
```

```

rho1 = p1_orifice_abs / (R_air*T1);

%% Calcolo della portata secondo ISO 5167

results = portata_orifizio( ...
    tap_type, ...
    D, ...
    d, ...
    dp, ...
    p1_orifice_abs, ...
    rho1, ...
    mu1, ...
    kappa, ...
    tol_iso, ...
    Nmax_iso);

%% Aggiornamento del grafico

pressure_ratio_array(i) = pressure_ratio;
qv_array(i) = results.qv;

valid_plot = ...
    isfinite(pressure_ratio_array) & ...
    isfinite(qv_array);

figure(1);
clf;

plot( ...
    pressure_ratio_array(valid_plot), ...
    qv_array(valid_plot), ...
    'o-', ...
    'LineWidth', 1.2, ...
    'MarkerSize', 6);

xlabel('p_v/p_m [-]');
ylabel('q_v [m^3/s]');
title('Curva di portata');
grid on;
box on;

set(gca, ...
    'FontName', 'Times New Roman', ...
    'FontSize', 12);

drawnow;

%% Stampa sintetica del punto

fprintf('\nRISULTATI PUNTO %d\n', i);

fprintf('p monte valvola relativa = %.2f Pa\n', ...
    p_valve_up_gauge);

fprintf('p monte valvola assoluta = %.2f Pa\n', ...
    p_valve_up_abs);

fprintf('p valle valvola relativa = %.2f Pa\n', ...
    p_valve_down_gauge);

```

```

fprintf('p valle valvola assoluta = %.2f Pa\n', ...
        p_valve_down_abs);

fprintf('Rapporto p_v/p_m          = %.4f\n', ...
        pressure_ratio);

fprintf('p1 diaframma relativa    = %.2f Pa\n', ...
        p1_orifice_gauge);

fprintf('p1 diaframma assoluta    = %.2f Pa\n', ...
        p1_orifice_abs);

fprintf('Delta p                  = %.2f Pa\n', ...
        dp);

fprintf('rho1                    = %.4f kg/m^3\n', ...
        rho1);

fprintf('qm                      = %.6f kg/s\n', ...
        results.qm);

fprintf('qv                      = %.6f m^3/s\n', ...
        results.qv);

fprintf('ReD                      = %.4e\n', ...
        results.ReD);

fprintf('C                        = %.6f\n', ...
        results.C);

fprintf('epsilon                    = %.6f\n', ...
        results.epsilon);

%% Riga da salvare nel CSV

row = { ...
    i, ...
    char(flow_direction), ...
    char(cycle_branch), ...
    is_turning_point, ...
    T1, ...
    p_atm_Pa, ...
    p_set_up_gauge_Pa, ...
    p_target_bar*1e5, ...
    p_valve_up_gauge, ...
    p_valve_up_abs, ...
    p_valve_down_gauge, ...
    p_valve_down_abs, ...
    pressure_ratio, ...
    p1_orifice_gauge, ...
    p1_orifice_abs, ...
    dp, ...
    p2_orifice_gauge, ...
    p2_orifice_abs, ...
    rho1, ...
    results.qm, ...
    results.qv, ...
    results.ReD, ...
    results.C, ...
    results.epsilon, ...

```



```

        results.beta, ...
        results.d_mm, ...
        ctrl_out.Vcmd, ...
        ctrl_out.err_rel, ...
        point.attempts};

writecell( ...
    row, ...
    csv_filename, ...
    'WriteMode', 'append');

fprintf('\nPunto %d salvato su:\n%s\n', ...
    i, csv_filename);

fprintf('E' possibile procedere con il punto successivo.\n');
end

%% 13. ARRESTO DELLA MPPE E FINE PROVA

write(dq, 0);
clear dq;

fprintf('\n===== FINE PROVA CON MPPE =====\n');
fprintf('Comando MPPE riportato a 0 V.\n');
fprintf('File risultati:\n%s\n', csv_filename);

```

```

function results = portata_orifizio(tap_type, D, d, dp, p1, rho1, mu1, kappa, tol,
Nmax)
%PORTATA_ORIFIZIO Calcolo diretto della portata con orifizio secondo ISO 5167
%seguendo lo schema iterativo dell'Annex A.
%
% results = portata_orifizio(tap_type, D, d, dp, p1, rho1, mu1, kappa, tol, Nmax)
%
% Input:
%     tap_type - tipo prese: 'flange', 'corner', 'DD2'
%     D       - diametro interno tubo [m]
%     d       - diametro orifizio [m]
%     dp      - pressione differenziale [Pa]
%     p1      - pressione assoluta a monte [Pa]
%     rho1    - densita' a monte [kg/m^3]
%     mu1     - viscosita' dinamica [Pa*s]
%     kappa   - esponente isentropico [-]
%     tol     - tolleranza relativa [-]
%     Nmax    - massimo numero iterazioni [-]
%
% Output:
%     results - struct con qm, qv, ReD, C, epsilon, convergenza, controlli ISO
%
% Metodo ISO Annex A:
%     A1 = epsilon * (D*beta)^2 * sqrt(2*dp*rho1) / (mu1*D*sqrt(1-beta^4))
%     ReD / C = A1
%     X1 = ReD
%     qm = (pi/4) * mu1 * D * X1
%
% Controlli input
if D <= 0, error('D deve essere > 0.');
```

```

end
if d <= 0, error('d deve essere > 0.');
```

```

end
if d >= D, error('Deve essere d < D.');
```

```

end
if dp <= 0, error('dp deve essere > 0.');
```

```

end
if p1 <= 0, error('p1 deve essere > 0.');
```

```

end
if rho1 <= 0, error('rho1 deve essere > 0.');
```

```

end
if mu1 <= 0, error('mu1 deve essere > 0.');
```

```

end
if kappa <= 0, error('kappa deve essere > 0.');
```

```

end
if tol <= 0, error('tol deve essere > 0.');
```

```

end
if Nmax < 3 || floor(Nmax) ~= Nmax
    error('Nmax deve essere un intero >= 3.');
```

```

end

% Geometria
beta = d / D;

if beta <= 0 || beta >= 1
    error('beta = d/D deve stare tra 0 e 1.');
```

```

end

% Fattore di espansibilita'
eps = epsilon_orifizio(beta, dp, p1, kappa);

```

```

% Invariante A1 (Annex A)

A1 = eps * (D * beta)^2 * sqrt(2 * dp * rho1) / (mu1 * D * sqrt(1 - beta^4));

% First guess 1

C1 = 0.61;           % C_infty
X1_1 = C1 * A1;      % X1 = ReD
ReD1 = X1_1;
C1 = C_orifizio(tap_type, beta, ReD1, D);
delta1 = A1 - X1_1 / C1;

% First guess 2

X1_2 = 1.05 * X1_1;
ReD2 = X1_2;
C2 = C_orifizio(tap_type, beta, ReD2, D);
delta2 = A1 - X1_2 / C2;

converged = false;
resid = NaN;
k_final = 2;

% Iterazione lineare (secante)

for k = 3:Nmax

    if abs(delta2 - delta1) < realmin
        warning('portata_orifizio: denominatore nullo nel linear algorithm.');
```

break;

```
    end

    X1_3 = X1_2 - delta2 * (X1_2 - X1_1) / (delta2 - delta1);
    ReD3 = X1_3;

    if ReD3 <= 0
        warning('portata_orifizio: ReD non fisico durante l''iterazione.');
```

break;

```
    end

    C3 = C_orifizio(tap_type, beta, ReD3, D);

    delta3 = A1 - X1_3 / C3;
    resid = abs(delta3) / max(abs(A1), realmin);

    k_final = k;

    if resid < tol
        converged = true;
        break;
    end

% Shift iterativo
X1_1 = X1_2;
delta1 = delta2;

```

```

        X1_2 = X1_3;
        delta2 = delta3;
    end

    if ~converged
        warning('portata_orifizio: non convergente entro Nmax iterazioni.');
```

end

```

    if ~exist('X1_3', 'var')
        error('portata_orifizio: iterazione interrotta prima di produrre un risultato valido.');
```

end

```

% Risultati finali

ReD = X1_3;
C = C3;

qm = (pi / 4) * mu1 * D * ReD;
qv = qm / rho1;

checks = check_limiti_orifizio(tap_type, D, d, beta, ReD);

% Output struct

results = struct();

results.tap_type = string(tap_type);
results.D = D;
results.d = d;
results.d_mm = d * 1000;
results.beta = beta;
results.dp = dp;
results.p1 = p1;
results.rho1 = rho1;
results.mu1 = mu1;
results.kappa = kappa;

results.A1 = A1;
results.qm = qm;
results.qv = qv;
results.C = C;
results.epsilon = eps;
results.ReD = ReD;
results.delta = delta3;
results.resid = resid;

results.iterations = k_final;
results.converged = converged;

results.checks = checks;
end
```

```

%% MAIN - Dimensionamento orifizio: calcolo di beta e d
% Dati noti: D, dp, qm, p1, rho1, mu1, kappa
% Incognite: beta, d

clear;
clc;

%% DATI DI INPUT
tap_type = "DD2";      % "flange", "corner", "DD2"

D      = 0.055;          % [m]
p1      = 4.3e5;          % [Pa]
R      = 287;            % [J/(kg K)]
T1      = 293;           % [K]
rho1    = p1/(R*T1);     % [kg/m^3]
mu1     = 1.85e-5;       % [Pa s]

qv      = 0.00533;       % [m^3/s]
qm      = qv * rho1;     % [kg/s]

dp      = 2402;          % [Pa]
kappa   = 1.4;           % [-]

tol     = 1e-8;          % [-]
Nmax    = 100;           % [-]

%% CHIAMATA AL SOLVER
results = sizing_beta_orifizio(tap_type, D, dp, qm, p1, rho1, mu1, kappa, tol, Nmax);

%% STAMPA RISULTATI
fprintf('\n===== \n');
fprintf('DIMENSIONAMENTO ORIFIZIO - CALCOLO DI BETA E d \n');
fprintf('===== \n');

fprintf('Tipo prese           = %s \n', results.tap_type);
fprintf('Convergenza           = %d \n', results.converged);
fprintf('Iterazioni            = %d \n', results.iterations);

fprintf('\n--- DATI PRINCIPALI --- \n');
fprintf('D                     = %.6f m \n', results.D);
fprintf('dp                    = %.6f Pa \n', results.dp);
fprintf('qm                    = %.6f kg/s \n', results.qm);
fprintf('p1                    = %.6f Pa \n', results.p1);
fprintf('rho1                  = %.6f kg/m^3 \n', results.rho1);
fprintf('mu1                   = %.6e Pa s \n', results.mu1);
fprintf('kappa                 = %.6f \n', results.kappa);

fprintf('\n--- RISULTATI --- \n');
fprintf('ReD                   = %.6e \n', results.ReD);
fprintf('A2                    = %.6e \n', results.A2);
fprintf('C                     = %.6f \n', results.C);
fprintf('epsilon              = %.6f \n', results.epsilon);
fprintf('beta                 = %.6f \n', results.beta);
fprintf('d                    = %.6f m \n', results.d);
fprintf('d                    = %.3f mm \n', results.d_mm);
fprintf('delta finale          = %.6e \n', results.delta);
fprintf('residuo finale        = %.6e \n', results.resid);

```

```
fprintf('\n--- CONTROLLI ISO 5167-2 ---\n');
fprintf('d >= 12.5 mm      = %d\n', results.checks.ok_d_min);
fprintf('50 mm <= D <= 1000 mm = %d\n', results.checks.ok_D_range);
fprintf('0.10 <= beta <= 0.75 = %d\n', results.checks.ok_beta);
fprintf('Vincolo ReD #1      = %d\n', results.checks.ok_ReD_1);
fprintf('Vincolo ReD #2      = %d\n', results.checks.ok_ReD_2);
fprintf('ISO compliant       = %d\n', results.checks.ok_all);

fprintf('=====\n\n');
```

```

function results = sizing_beta_orifizio(tap_type, D, dp, qm, p1, rho1, mu1, kappa,
tol, Nmax)
%SIZING_BETA_ORIFIZIO Dimensionamento ISO 5167 di beta e d per orifizio.
%
% results = sizing_beta_orifizio(tap_type, D, dp, qm, p1, rho1, mu1, kappa, tol,
Nmax)
%
% Input:
%   tap_type - tipo di prese: 'flange', 'corner', 'DD2'
%   D        - diametro interno del tubo [m]
%   dp        - pressione differenziale [Pa]
%   qm        - portata massica [kg/s]
%   p1        - pressione assoluta a monte [Pa]
%   rho1      - densita' a monte [kg/m^3]
%   mu1       - viscosita' dinamica [Pa*s]
%   kappa     - esponente isentropico [-]
%   tol       - tolleranza relativa di convergenza [-]
%   Nmax      - numero massimo iterazioni [-]
%
% Output:
%   results - struct con risultati finali, convergenza e controlli ISO
%
% Metodo:
%   algoritmo lineare (secante) su X2 secondo Annex A ISO 5167.

% Controlli input

if nargin < 10
    error(['sizing_beta_orifizio: servono 10 input: ', ...
'tap_type, D, dp, qm, p1, rho1, mu1, kappa, tol, Nmax.']);
end
if D <= 0, error('sizing_beta_orifizio: D deve essere > 0.');
if dp <= 0, error('sizing_beta_orifizio: dp deve essere > 0.');
if qm <= 0, error('sizing_beta_orifizio: qm deve essere > 0.');
if p1 <= 0, error('sizing_beta_orifizio: p1 deve essere > 0.');
if rho1 <= 0, error('sizing_beta_orifizio: rho1 deve essere > 0.');
if mu1 <= 0, error('sizing_beta_orifizio: mu1 deve essere > 0.');
if kappa <= 0, error('sizing_beta_orifizio: kappa deve essere > 0.');
if tol <= 0, error('sizing_beta_orifizio: tol deve essere > 0.');
if Nmax < 3 || floor(Nmax) ~= Nmax
    error('sizing_beta_orifizio: Nmax deve essere un intero >= 3.');
end

% Grandezze derivate

ReD = Re_pipe(qm, mu1, D);

% Invariante A2

A2 = (mu1 * ReD) / (D * sqrt(2 * dp * rho1));

% First guess 1

C1    = 0.6;
eps1  = 1.0;
X2_1  = A2 / (C1 * eps1);
beta1 = (X2_1^2 / (1 + X2_1^2))^0.25;

```

```

if beta1 <= 0 || beta1 >= 1
    error('sizing_beta_orifizio: first guess beta1 fuori range (0,1).');
end

C1      = C_orifizio(tap_type, beta1, ReD, D);
eps1    = epsilon_orifizio(beta1, dp, p1, kappa);
delta1 = A2 - X2_1 * C1 * eps1;

% First guess 2
X2_2 = 1.05 * X2_1;
beta2 = (X2_2^2 / (1 + X2_2^2))^0.25;

if beta2 <= 0 || beta2 >= 1
    error('sizing_beta_orifizio: first guess beta2 fuori range (0,1).');
end

C2      = C_orifizio(tap_type, beta2, ReD, D);
eps2    = epsilon_orifizio(beta2, dp, p1, kappa);
delta2 = A2 - X2_2 * C2 * eps2;

% Inizializzazione sicurezza
converged = false;
k_final   = 2;
resid     = NaN;

% Iterazione lineare (secante)
for k = 3:Nmax

    if abs(delta2 - delta1) < realmin
        warning('sizing_beta_orifizio: denominatore nullo nel linear
algorithm. ');
        break;
    end

    X2_3 = X2_2 - delta2 * (X2_2 - X2_1) / (delta2 - delta1);
    beta3 = (X2_3^2 / (1 + X2_3^2))^0.25;

    if beta3 <= 0 || beta3 >= 1
        warning('sizing_beta_orifizio: beta fuori range fisico durante
1''iterazione. ');
        break;
    end

    C3      = C_orifizio(tap_type, beta3, ReD, D);
    eps3    = epsilon_orifizio(beta3, dp, p1, kappa);

    delta3 = A2 - X2_3 * C3 * eps3;
    resid  = abs(delta3) / max(abs(A2), realmin);

    k_final = k;

    if resid < tol
        converged = true;
        break;
    end

% Shift iterativo
X2_1 = X2_2;

```



```

        delta1 = delta2;

        X2_2    = X2_3;
        delta2 = delta3;
    end

    % Verifica convergenza

    if ~converged
        warning('sizing_beta_orifizio: non convergente entro Nmax iterazioni.');
```

end

```

    % Se per qualche motivo non è stato mai definito C3/eps3/beta3
    if ~exist('beta3', 'var')
        error('sizing_beta_orifizio: iterazione interrotta prima di produrre un
risultato valido.');
```

end

```

    % Risultati finali

    beta = beta3;
    d     = beta * D;
    C     = C3;
    eps   = eps3;

    checks = check_limiti_orifizio(tap_type, D, d, beta, ReD);

    % Struct output

    results = struct();

    % input principali
    results.tap_type = string(tap_type);
    results.D        = D;
    results.dp       = dp;
    results.qm       = qm;
    results.p1       = p1;
    results.rho1     = rho1;
    results.mu1      = mu1;
    results.kappa    = kappa;
    results.tol      = tol;
    results.Nmax     = Nmax;

    % risultati
    results.ReD      = ReD;
    results.A2       = A2;
    results.beta     = beta;
    results.d        = d;
    results.d_mm     = d * 1000;
    results.C        = C;
    results.epsilon  = eps;
    results.delta    = delta3;
    results.resid    = resid;

    % stato iterativo
    results.iterations = k_final;
    results.converged  = converged;

```

```
% controlli normativi  
results.checks = checks;  
end
```

```

%% MAIN - Dimensionamento orifizio: calcolo di Delta p
% Dati noti: D, d, qm, p1, rho1, mu1, kappa
% Incognita: dp

clear;
clc;

%% DATI DI INPUT
tap_type = "dd2";      % "flange", "corner", "DD2"

D      = 55/1000;      % [m]
d      = 19.05/1000;   % [m]

p1      = 1.0678e5;     % [Pa]
R       = 287;          % [J/(kg K)]
T1      = 293;         % [K]
rho1    = p1/(R*T1);    % [kg/m^3]
mu1     = 1.85e-5;      % [Pa s]

qv      = 5.33e-3;      % [m^3/s]
qm      = qv * rho1;     % [kg/s]

kappa   = 1.4;          % [-]

tol     = 1e-6;         % [-]
Nmax    = 500;          % [-]

%% SOLVER
results = sizing_dp_orifizio(tap_type, D, d, qm, p1, rho1, mu1, kappa, tol, Nmax);

%% RISULTATI
fprintf('\n===== \n');
fprintf('DIMENSIONAMENTO ORIFIZIO - CALCOLO DI DELTA p \n');
fprintf('===== \n');

fprintf('Tipo prese           = %s \n', results.tap_type);
fprintf('Convergenza           = %d \n', results.converged);
fprintf('Iterazioni            = %d \n', results.iterations);

fprintf('\n--- DATI PRINCIPALI --- \n');
fprintf('D                     = %.6f m \n', results.D);
fprintf('d                     = %.6f m \n', results.d);
fprintf('d                     = %.3f mm \n', results.d_mm);
fprintf('beta                  = %.6f \n', results.beta);
fprintf('qv                    = %.6f m^3/s \n', qv);
fprintf('qm                    = %.6f kg/s \n', results.qm);
fprintf('p1                    = %.6f Pa \n', results.p1);
fprintf('rho1                  = %.6f kg/m^3 \n', results.rho1);
fprintf('mu1                   = %.6e Pa s \n', results.mu1);
fprintf('kappa                 = %.6f \n', results.kappa);

fprintf('\n--- RISULTATI --- \n');
fprintf('ReD                   = %.6e \n', results.ReD);
fprintf('A3                    = %.6e \n', results.A3);
fprintf('C                     = %.6f \n', results.C);
fprintf('epsilon              = %.6f \n', results.epsilon);
fprintf('dp                   = %.6f Pa \n', results.dp);
fprintf('dp                   = %.6f kPa \n', results.dp_kPa);

```

```

fprintf('dp                = %.6f bar\n', results.dp_bar);
fprintf('residuo finale    = %.6e\n', results.resid);

fprintf('\n--- CONTROLLI ISO 5167-2 ---\n');
fprintf('d >= 12.5 mm        = %d\n', results.checks.ok_d_min);
fprintf('50 mm <= D <= 1000 mm = %d\n', results.checks.ok_D_range);
fprintf('0.10 <= beta <= 0.75 = %d\n', results.checks.ok_beta);
fprintf('Vincolo ReD #1        = %d\n', results.checks.ok_ReD_1);
fprintf('Vincolo ReD #2        = %d\n', results.checks.ok_ReD_2);
fprintf('ISO compliant         = %d\n', results.checks.ok_all);

fprintf('=====\n\n');

```

```

function results = sizing_dp_orifizio(tap_type, D, d, qm, p1, rho1, mu1, kappa, tol,
Nmax)
%SIZING_DP_ORIFIZIO Dimensionamento ISO 5167 della pressione differenziale
%per orifizio.
%
% Input:
%   tap_type - tipo di prese: 'flange', 'corner', 'DD2'
%   D       - diametro interno del tubo [m]
%   d       - diametro orifizio [m]
%   qm      - portata massica [kg/s]
%   p1      - pressione assoluta a monte [Pa]
%   rho1    - densita' a monte [kg/m^3]
%   mu1     - viscosita' dinamica [Pa*s]
%   kappa   - esponente isentropico [-]
%   tol     - tolleranza relativa [-]
%   Nmax    - numero massimo iterazioni [-]
%
% Output:
%   results - struct con risultati, convergenza e controlli ISO

% Controlli input

if D <= 0, error('D deve essere > 0. '); end
if d <= 0, error('d deve essere > 0. '); end
if d >= D, error('Deve essere d < D. '); end
if qm <= 0, error('qm deve essere > 0. '); end
if p1 <= 0, error('p1 deve essere > 0. '); end
if rho1 <= 0, error('rho1 deve essere > 0. '); end
if mu1 <= 0, error('mu1 deve essere > 0. '); end
if kappa <= 0, error('kappa deve essere > 0. '); end
if tol <= 0, error('tol deve essere > 0. '); end
if Nmax < 1 || floor(Nmax) ~= Nmax
    error('Nmax deve essere un intero >= 1. ');
end

% Grandezze note

beta = d / D;
ReD = Re_pipe(qm, mu1, D);

if beta <= 0 || beta >= 1
    error('beta = d/D deve stare tra 0 e 1. ');
end

% C e' noto dai dati di input, non e' un first guess!
C = C_orifizio(tap_type, beta, ReD, D);

% Invariante A3
A3 = (8 * (1 - beta^4) / rho1) * ( qm / (C * pi * (D * beta)^2) )^2;

% First guess: epsilon

eps_k = 1.0;
dp_k = 0;

```

```

converged = false;
resid      = NaN;
k_final    = 0;

% Iterazione su epsilon <-> dp

for k = 1:Nmax

    % 1) aggiorno dp con epsilon vecchio
    dp_new = (eps_k^2) * A3;

    if dp_new <= 0
        warning('sizing_dp_orifizio: Delta p non positiva durante l''iterazione. ');
        break;
    end

    if dp_new >= p1
        warning('sizing_dp_orifizio: Delta p >= p1 durante l''iterazione. Dati non fisici. ');
        break;
    end

    % 2) aggiorno epsilon con il nuovo dp
    eps_new = epsilon_orifizio(beta, dp_new, p1, kappa);

    % 3) residuo: confronto coerente ma non tautologico
    resid = abs(A3 - dp_new / (eps_new^2)) / max(abs(A3), realmin);

    % aggiorno stato
    dp_k    = dp_new;
    eps_k    = eps_new;
    k_final = k;

    if resid < tol
        converged = true;
        break;
    end
end

if ~converged
    warning('sizing_dp_orifizio: non convergente entro Nmax iterazioni. ');
end

dp = dp_k;
eps = eps_k;

checks = check_limiti_orifizio(tap_type, D, d, beta, ReD);

% Struct output

results = struct();

results.tap_type = string(tap_type);
results.D        = D;
results.d        = d;
results.d_mm     = d * 1000;
results.beta     = beta;

```

```
results.qm      = qm;  
results.p1      = p1;  
results.rho1    = rho1;  
results.mu1     = mu1;  
results.kappa   = kappa;  
results.tol     = tol;  
results.Nmax    = Nmax;  
  
results.ReD     = ReD;  
results.C       = C;  
results.A3      = A3;  
results.dp      = dp;  
results.dp_kPa  = dp / 1000;  
results.dp_bar  = dp / 1e5;  
results.epsilon = eps;  
results.resid   = resid;  
  
results.iterations = k_final;  
results.converged  = converged;  
  
results.checks   = checks;  
end
```

```

function checks = check_limiti_orifizio(tap_type, D, d, beta, ReD)
%CHECK_LIMITI_ORIFIZIO Limiti di applicabilita' ISO 5167-2
% per piastra con orifizio.
%
% checks = check_limiti_orifizio(tap_type, D, d, beta, ReD)
%
% Input:
%     tap_type - tipo di prese di pressione: 'flange', 'corner', 'DD2'
%     D        - diametro interno del tubo    [m]
%     d        - diametro orifizio           [m]
%     beta     - rapporto di diametro d/D    [-]
%     ReD      - Reynolds nel tubo           [-]
%
% Output:
%     checks   - struct con esito dei controlli ISO

if ~ischar(tap_type) && ~isstring(tap_type)
    error('check_limiti_orifizio: tap_type deve essere una stringa.');
```

end

```

if D <= 0
    error('check_limiti_orifizio: D deve essere > 0.');
```

end

```

if d <= 0
    error('check_limiti_orifizio: d deve essere > 0.');
```

end

```

if beta <= 0 || beta >= 1
    error('check_limiti_orifizio: beta deve stare tra 0 e 1.');
```

end

```

if ReD <= 0
    error('check_limiti_orifizio: ReD deve essere > 0.');
```

end

```

tap_type = lower(string(tap_type));

% Conversioni in mm per i limiti normativi
Dmm = D * 1000;
dmm = d * 1000;

% Controlli geometrici comuni
checks.tap_type = tap_type;
checks.D_mm     = Dmm;
checks.d_mm     = dmm;
checks.beta     = beta;
checks.ReD      = ReD;

checks.ok_d_min = (dmm >= 12.5);
checks.ok_D_range = (Dmm >= 50) && (Dmm <= 1000);
checks.ok_beta   = (beta >= 0.10) && (beta <= 0.75);

% Controllo Reynolds, dipendente dal tipo di prese
switch tap_type
    case {"corner", "dd2"}

        if beta <= 0.56
```



```

        ReD_min = 5000;
    else
        ReD_min = 16000 * beta^2;
    end

    checks.ReD_min_1 = ReD_min;
    checks.ReD_min_2 = NaN;

    checks.ok_ReD_1 = (ReD >= ReD_min);
    checks.ok_ReD_2 = true;

    case "flange"

        ReD_min_1 = 5000;
        ReD_min_2 = 170 * beta^2 * Dmm;

        checks.ReD_min_1 = ReD_min_1;
        checks.ReD_min_2 = ReD_min_2;

        checks.ok_ReD_1 = (ReD >= ReD_min_1);
        checks.ok_ReD_2 = (ReD >= ReD_min_2);

    otherwise
        error('check_limiti_orifizio: tap_type non riconosciuto. Usare "flange",
"corner" o "DD2".');
    end

    % Esito complessivo
    checks.ok_all = checks.ok_d_min && ...
        checks.ok_D_range && ...
        checks.ok_beta && ...
        checks.ok_ReD_1 && ...
        checks.ok_ReD_2;
end

```

```

%% TEST PRELIMINARE COLLEGAMENTI NI
% Verifica canali, sensori e conversione Volt -> Pressione

clear;
clc;

%% 1. INIZIALIZZAZIONE NI
dq = daq("ni");

% Sostituisci "Dev1" con il nome reale visto in NI MAX
addinput(dq, "Dev1", "ai0", "Voltage"); % TJE monte valvola
addinput(dq, "Dev1", "ai1", "Voltage"); % TJE valle valvola
addinput(dq, "Dev1", "ai2", "Voltage"); % P30 monte diaframma
addinput(dq, "Dev1", "ai3", "Voltage"); % FP2000 differenziale diaframma

dq.Rate = 50;

%% 2. ACQUISIZIONE BREVE
disp('Acquisizione in corso...');
TT = read(dq, seconds(2));
disp('Acquisizione completata.');
```

%% 3. ESTRAZIONE CANALI IN VOLT

```

V_valve_up   = TT(:,1);
V_valve_down = TT(:,2);
V_p1         = TT(:,3);
V_dp         = TT(:,4);
```

%% 4. MEDIE IN VOLT

```

Vmean_valve_up   = mean(V_valve_up);
Vmean_valve_down = mean(V_valve_down);
Vmean_p1         = mean(V_p1);
Vmean_dp         = mean(V_dp);
```

%% 5. CONVERSIONE IN PRESSIONI

```

p_valve_up   = volt_to_pressure(Vmean_valve_up, 'TJE');
p_valve_down = volt_to_pressure(Vmean_valve_down, 'TJE');
p1_orifice   = volt_to_pressure(Vmean_p1, 'P30');
dp_orifice   = volt_to_pressure(Vmean_dp, 'FP2000');
```

%% 6. STAMPA RISULTATI

```

fprintf('\n===== TEST COLLEGAMENTI NI =====\n');

fprintf('\nCanale ai0 - TJE monte valvola\n');
fprintf('Tensione media   = %.4f V\n', Vmean_valve_up);
fprintf('Pressione media   = %.2f Pa (%.4f bar)\n', p_valve_up, p_valve_up/1e5);

fprintf('\nCanale ai1 - TJE valle valvola\n');
fprintf('Tensione media   = %.4f V\n', Vmean_valve_down);
fprintf('Pressione media   = %.2f Pa (%.4f bar)\n', p_valve_down, p_valve_down/1e5);

fprintf('\nCanale ai2 - P30 monte diaframma\n');
fprintf('Tensione media   = %.4f V\n', Vmean_p1);
fprintf('Pressione media   = %.2f Pa (%.4f bar)\n', p1_orifice, p1_orifice/1e5);

fprintf('\nCanale ai3 - FP2000 differenziale diaframma\n');
fprintf('Tensione media   = %.4f V\n', Vmean_dp);
fprintf('Pressione media   = %.2f Pa (%.4f mbar)\n', dp_orifice, dp_orifice/100);
```

```
fprintf('\n===== \n');
```

```
function point = acquisisci_punto_equilibrio(dq, channels, params)
%ACQUISISCI_PUNTO_EQUILIBRIO Acquisisce un punto di prova a regime.
%
% point = acquisisci_punto_equilibrio(dq, channels, params)
%
% Input:
%   dq      - oggetto DataAcquisition di MATLAB
%   channels - struct con indici colonna dei canali acquisiti
%   params  - struct con parametri di acquisizione
%
% channels deve contenere:
%   channels.valve_up
%   channels.valve_down
%   channels.p1
%   channels.dp
%
% params deve contenere:
%   params.window_s      % durata finestra acquisizione [s]
%   params.max_attempts  % numero massimo tentativi
%   params.pause_s       % pausa tra tentativi [s]
%
% Output:
%   point - struct con dati medi, statistiche e ultimo segnale acquisito

% Controlli input minimi

requiredCh = {'valve_up', 'valve_down', 'p1', 'dp'};
for i = 1:numel(requiredCh)
    if ~isfield(channels, requiredCh{i})
        error('Manca channels.%s', requiredCh{i});
    end
end

requiredPar = {'window_s', 'max_attempts', 'pause_s'};
for i = 1:numel(requiredPar)
    if ~isfield(params, requiredPar{i})
        error('Manca params.%s', requiredPar{i});
    end
end

if params.window_s <= 0
    error('params.window_s deve essere > 0. ');
end
if params.max_attempts < 1
    error('params.max_attempts deve essere >= 1. ');
end
if params.pause_s < 0
    error('params.pause_s deve essere >= 0. ');
end

% Inizializzazione output

point = struct();
point.ok = false;           %necessario per far capire che il punto esiste ma non
è valido
```

```

point.attempts = 0;
point.message = "";
point.stability = struct();

% Loop acquisizione

for k = 1:params.max_attempts

    % Acquisizione finestra
    TT = read(dq, seconds(params.window_s));

    % Estrazione segnali in Volt
    V_valve_up = TT(:, channels.valve_up);
    V_valve_down = TT(:, channels.valve_down);
    V_p1 = TT(:, channels.p1);
    V_dp = TT(:, channels.dp);

    % Conversione Volt -> Pressione [Pa]
    p_valve_up = volt_to_pressure(V_valve_up, 'TJE');
    p_valve_down = volt_to_pressure(V_valve_down, 'TJE');
    p1 = volt_to_pressure(V_p1, 'P30');
    dp = volt_to_pressure(V_dp, 'FP2000');

    % Verifica stabilità sul diaframma
    [ok_stable, stats] = verifica_stabilita_punto(dp, p1);

    point.attempts = k;
    point.stability = stats;
    point.raw = TT;

    if ok_stable
        % Valori medi del punto stabile
        point.ok = true;
        point.message = "Punto stabile acquisito";

        point.V_mean.valve_up = mean(V_valve_up);
        point.V_mean.valve_down = mean(V_valve_down);
        point.V_mean.p1 = mean(V_p1);
        point.V_mean.dp = mean(V_dp);

        point.P_mean.valve_up = mean(p_valve_up);
        point.P_mean.valve_down = mean(p_valve_down);
        point.P_mean.p1 = mean(p1);
        point.P_mean.dp = mean(dp);

        point.P_std.valve_up = std(p_valve_up);
        point.P_std.valve_down = std(p_valve_down);
        point.P_std.p1 = std(p1);
        point.P_std.dp = std(dp);

        % Utile anche il valore medio a valle del diaframma
        point.P_mean.p2_orifice = point.P_mean.p1 - point.P_mean.dp;

        return;
    end

    % Se non stabile, attesa e nuovo tentativo
    pause(params.pause_s);
end

```

```
% Se esce dal loop senza return  
point.ok = false;  
point.message = "Punto non stabile entro il numero massimo di tentativi";  
end
```

```

function p = volt_to_pressure(V, sensor_type)
%VOLT_TO_PRESSURE Converte la tensione misurata in pressione [Pa].
%
% Tipi disponibili:
%   'VALVOLA'
%   'MONT-PROVVISORIO'
%   'DIFF-PROVVISORIO'

if ~ischar(sensor_type) && ~isstring(sensor_type)
    error('volt_to_pressure: sensor_type deve essere una stringa.');
```

end

sensor_type = upper(strtrim(char(sensor_type)));

switch sensor_type

case 'VALVOLA-MONTE'

K = 0.3869; % [V/bar]

V0 = 0.4942; % [V]

if any(V < 0.45) || any(V > 4.55)

warning('VALVOLA: tensione fuori dal campo nominale 0.5-4.5 V.');

end

p_bar = (V - V0) ./ K;

p = p_bar .* 1e5; % [Pa]

case 'VALVOLA-VALLE'

K = 0.3837; % [V/bar]

V0 = 0.4987; % [V]

if any(V < 0.45) || any(V > 4.55)

warning('VALVOLA: tensione fuori dal campo nominale 0.5-4.5 V.');

end

p_bar = (V - V0) ./ K;

p = p_bar .* 1e5; % [Pa]

case 'MONT-PROVVISORIO'

K = 0.9508; % [V/kPa]

V0 = 0.0733; % [V]

if any(V < 0) || any(V > 10)

warning('MONT-PROVVISORIO: tensione fuori dal campo 0-10 V.');

end

p_kPa = (V - V0) ./ K;

p = p_kPa .* 1e3; % [Pa]

case 'DIFF-PROVVISORIO'

K = 0.9523; % [V/kPa]

V0 = 0.0208; % [V]

if any(V < 0) || any(V > 10)

warning('DIFF-PROVVISORIO: tensione fuori dal campo 0-10 V.');

end

p_kPa = (V - V0) ./ K;

```
        p = p_kPa .* 1e3;          % [Pa]

    otherwise
        error(['Sensore non riconosciuto. Usare VALVOLA, ', ...
              'MONT-PROVVISORIO o DIFF-PROVVISORIO.']);
    end
end
```



```
function [ok, stats] = verifica_stabilita_punto(dp, p1)
%VERIFICA_STABILITA_PUNTO Controlla se un punto di misura è stabile
%
%   [ok, stats] = verifica_stabilita_punto(dp, p1)

% Controlli input

if isempty(dp) || isempty(p1)
    error('Input vuoti.');
```

end

```
if length(dp) ~= length(p1)
    error('dp e p1 devono avere stessa lunghezza.');
```

end

```
% Statistiche base

stats.dp_mean = mean(dp);
stats.dp_std  = std(dp);

stats.p1_mean = mean(p1);
stats.p1_std  = std(p1);

% Deriva (trend)

N = length(dp);
n_win = max(5, round(0.2 * N)); % 20% dei dati

dp_start = mean(dp(1:n_win));
dp_end   = mean(dp(end-n_win+1:end));

p1_start = mean(p1(1:n_win));
p1_end   = mean(p1(end-n_win+1:end));

stats.dp_drift = abs(dp_end - dp_start);
stats.p1_drift = abs(p1_end - p1_start);

% Indicatori relativi

dp_std_rel  = stats.dp_std / max(abs(stats.dp_mean), 1e-6);
p1_std_rel  = stats.p1_std / max(abs(stats.p1_mean), 1e-6);

dp_drift_rel = stats.dp_drift / max(abs(stats.dp_mean), 1e-6);
p1_drift_rel = stats.p1_drift / max(abs(stats.p1_mean), 1e-6);

% Soglie

TH_STD    = 0.01; % 1%
TH_DRIFT  = 0.01; % 1%

% Decisione
```

```
ok = (dp_std_rel < TH_STD) && ...  
      (p1_std_rel < TH_STD) && ...  
      (dp_drift_rel < TH_DRIFT) && ...  
      (p1_drift_rel < TH_DRIFT);  
  
% Salvataggio stats  
  
stats.dp_std_rel    = dp_std_rel;  
stats.p1_std_rel    = p1_std_rel;  
stats.dp_drift_rel  = dp_drift_rel;  
stats.p1_drift_rel  = p1_drift_rel;  
end
```

```

function ctrl_out = regola_pressione_monte(dq, channels, p_set_abs_Pa, p_atm_Pa,
mppe, ctrl)
%REGOLA_PRESSIONE_MONTE Regola la pressione a monte valvola tramite MPPE.
%
% Input:
%   dq           - oggetto NI DataAcquisition con AI + AO configurati
%   channels      - struct canali AI
%   p_set_abs_Pa  - pressione assoluta desiderata a monte valvola [Pa]
%   p_atm_Pa      - pressione atmosferica [Pa]
%   mppe          - parametri MPPE
%   ctrl          - parametri controllo
%
% Output:
%   ctrl_out      - struct con esito regolazione

% Set relativo da inviare all'MPPE
p_set_rel_Pa = p_set_abs_Pa - p_atm_Pa;

if p_set_rel_Pa < 0
    error('Il set relativo risulta negativo. Controllare p_set_abs_Pa e p_atm_Pa.');
```

end

```

% Comando iniziale feedforward
Vcmd = pressure_to_voltage_MPPE(p_set_rel_Pa, mppe);

converged = false;

for k = 1:ctrl.max_iter

    % Invio comando analogico all'MPPE
    write(dq, Vcmd);

    % Attesa assestamento
    pause(ctrl.settle_s);

    % Lettura breve della pressione monte valvola
    TT = read(dq, seconds(ctrl.read_s));
    V_valve_up = TT{:, channels.valve_up};

    p_valve_up = volt_to_pressure(V_valve_up, 'TJE');
    p_mean = mean(p_valve_up);

    % Errore rispetto al set assoluto
    err_Pa = p_set_abs_Pa - p_mean;
    err_rel = abs(err_Pa) / max(abs(p_set_abs_Pa), realmin);

    if err_rel <= ctrl.tol_rel
        converged = true;
        break;
    end

    % Correzione proporzionale del comando
    % Conversione errore pressione -> incremento tensione
    err_bar = err_Pa / 1e5;
    dV = ctrl.Kp * err_bar / (mppe.p_max_bar - mppe.p_min_bar) * ...
        (mppe.V_max - mppe.V_min);

```

```

        Vcmd = Vcmd + dV;

        % Saturazione 0-10 V
        Vcmd = max(min(Vcmd, mppe.V_max), mppe.V_min);
    end

    ctrl_out = struct();
    ctrl_out.converged = converged;
    ctrl_out.iterations = k;
    ctrl_out.Vcmd = Vcmd;
    ctrl_out.p_set_abs_Pa = p_set_abs_Pa;
    ctrl_out.p_meas_abs_Pa = p_mean;
    ctrl_out.err_Pa = err_Pa;
    ctrl_out.err_rel = err_rel;
end

```

Listato 13 - Pressure to voltage MPPE

```

function Vcmd = pressure_to_voltage_MPPE(p_set_rel_Pa, mppe)
%PRESSURE_TO_VOLTAGE_MPPE Converte pressione relativa richiesta in comando 0-10 V.
%
% Input:
%   p_set_rel_Pa - pressione relativa richiesta [Pa]
%   mppe         - struct con:
%                   mppe.p_min_bar
%                   mppe.p_max_bar
%                   mppe.V_min
%                   mppe.V_max
%
% Output:
%   Vcmd - tensione comando MPPE [V]

    p_set_rel_bar = p_set_rel_Pa / 1e5;

    Vcmd = mppe.V_min + ...
        (p_set_rel_bar - mppe.p_min_bar) / ...
        (mppe.p_max_bar - mppe.p_min_bar) * ...
        (mppe.V_max - mppe.V_min);

    % Saturazione sicurezza 0-10 V
    Vcmd = max(min(Vcmd, mppe.V_max), mppe.V_min);
end

```

```
function ReD = Re_pipe(qm, mu1, D)
%RE_PIPE Coefficiente di Reynolds nel tubo secondo ISO 5167.
%
%   ReD = Re_pipe(qm, mu1, D)
%
%   Input:
%       qm: portata massica [kg/s]
%       mu1: viscosita' dinamica del fluido [Pa*s]
%       D: diametro interno del tubo [m]
%
%   Output:
%       ReD: Reynolds nel tubo [-]

if qm <= 0
    error('Re_pipe: qm deve essere > 0.');
```

$$ReD = \frac{4 * qm}{\pi * mu1 * D}$$

```
end

if mu1 <= 0
    error('Re_pipe: mu1 deve essere > 0.');
```

$$ReD = \frac{4 * qm}{\pi * mu1 * D}$$

```
end

if D <= 0
    error('Re_pipe: D deve essere > 0.');
```

$$ReD = \frac{4 * qm}{\pi * mu1 * D}$$

```
end

ReD = (4 * qm) / (pi * mu1 * D);
end
```

```
function eps = epsilon_orifizio(beta, dp, p1, kappa)
%EPSILON_ORIFIZIO Si calcoli il fattore di espansibilita'.
%
%   eps = epsilon_orifizio(beta, dp, p1, kappa)
%
%   Input:
%       beta: rapporto di diametro d/D      [-]
%       dp: pressione differenziale          [Pa]
%       p1: pressione assoluta a monte       [Pa]
%       kappa: esponente isentropico         [-]
%
%   Output:
%       eps: fattore di espansibilita'  [-]

if beta <= 0 || beta >= 1
    error('epsilon_orifizio: beta deve stare tra 0 e 1.');
```

end

```
if dp < 0
    error('epsilon_orifizio: dp deve essere >= 0.');
```

end

```
if p1 <= 0
    error('epsilon_orifizio: p1 deve essere > 0.');
```

end

```
if kappa <= 0
    error('epsilon_orifizio: kappa deve essere > 0.');
```

end

```
if dp >= p1
    error('epsilon_orifizio: deve essere dp < p1.');
```

end

```
K = 0.351 + 0.256*beta^4 + 0.93*beta^8;
eps = 1 - K * (dp / (kappa * p1));

if eps <= 0 || eps > 1
    error('epsilon_orifizio: epsilon fuori range fisico. Controllare i dati di
input.');
```

end

```
end
```

```
function C = C_orifizio(tap_type, beta, ReD, D)
%C_ORIFIZIO Selettore del coefficiente di efflusso per orifizio.
%
% C = C_orifizio(tap_type, beta, ReD, D)
%
% Input:
%     tap_type - tipo di prese di pressione:
%               'flange', 'corner', 'DD2'
%     beta     - rapporto di diametro d/D [-]
%     ReD      - Reynolds nel tubo [-]
%     D        - diametro interno del tubo [m]
%
% Output:
%     C        - coefficiente di efflusso [-]

if ~ischar(tap_type) && ~isstring(tap_type)
    error('C_orifizio: tap_type deve essere una stringa.');
```

```
end

tap_type = lower(string(tap_type));

switch tap_type
    case "flange"
        C = C_orifizio_flange(beta, ReD, D);

    case "corner"
        C = C_orifizio_corner(beta, ReD, D);

    case "dd2"
        C = C_orifizio_D_D2(beta, ReD, D);

    otherwise
        error('C_orifizio: tap_type non riconosciuto. Usare "flange", "corner" o
"DD2".');
```

```
end
end
```

```
function C = C_orifizio_flange(beta, ReD, D)
%C_ORIFIZIO_FLANGE Coefficiente di efflusso per orifizio con flange tappings.
%
% C = C_orifizio_flange(beta, ReD, D)
%
% Input:
%   beta: rapporto di diametro d/D [-]
%   ReD: Reynolds nel tubo [-]
%   D: diametro interno del tubo [m]
%
% Output:
%   C: coefficiente di efflusso [-]
%
% Formula ISO 5167-2: Reader-Harris/Gallagher (RHG), caso flange tappings.

if beta <= 0 || beta >= 1
    error('C_orifizio_flange: beta deve stare tra 0 e 1.');
```

end

```
if ReD <= 0
    error('C_orifizio_flange: ReD deve essere > 0.');
```

end

```
if D <= 0
    error('C_orifizio_flange: D deve essere > 0.');
```

end

```
% Conversione in mm, richiesta dalla formulazione RHG
Dmm = D * 1000;

% Flange tappings: L1 = L2'' = 25.4 mm / D
L1 = 25.4 / Dmm;
L2p = 25.4 / Dmm;

A = (19000 * beta / ReD)^0.8;
M2p = (2 * L2p) / (1 - beta);

C = 0.5961 ...
    + 0.0261 * beta^2 ...
    - 0.216 * beta^8 ...
    + 0.000521 * ((1e6 * beta) / ReD)^0.7 ...
    + (0.0188 + 0.0063 * A) * beta^3.5 * ((1e6 / ReD)^0.3) ...
    + (0.043 + 0.080 * exp(-10 * L1) - 0.123 * exp(-7 * L1)) ...
      * (1 - 0.11 * A) * (beta^4 / (1 - beta^4)) ...
    - 0.031 * (M2p - 0.8 * M2p^1.1) * beta^1.3;

% Correzione per piccolo diametro
if Dmm < 71.12
    C = C + 0.011 * (0.75 - beta) * (2.8 - Dmm / 25.4);
end
end
```



```

function C = C_orifizio_corner(beta, ReD, D)
%C_ORIFIZIO_CORNER Coefficiente di efflusso per orifizio con corner tappings.
%
%   C = C_orifizio_corner(beta, ReD, D)
%
%   Input:
%       beta: rapporto di diametro d/D   [-]
%       ReD: Reynolds nel tubo           [-]
%       D: diametro interno del tubo     [m]
%
%   Output:
%       C: coefficiente di efflusso [-]
%
%   Formula ISO 5167-2: Reader-Harris/Gallagher (RHG), caso corner tappings.
%   Per corner tappings:
%       L1 = 0
%       L2' = 0
%
%   if beta <= 0 || beta >= 1
%       error('C_orifizio_corner: beta deve stare tra 0 e 1.');
```

end

```

%   if ReD <= 0
%       error('C_orifizio_corner: ReD deve essere > 0.');
```

end

```

%   if D <= 0
%       error('C_orifizio_corner: D deve essere > 0.');
```

end

```

% Conversione in mm, richiesta dalla formulazione RHG
Dmm = D * 1000;

% Corner tappings
L1 = 0.0;
L2p = 0.0;

A = (19000 * beta / ReD)^0.8;
M2p = (2 * L2p) / (1 - beta);

C = 0.5961 ...
    + 0.0261 * beta^2 ...
    - 0.216 * beta^8 ...
    + 0.000521 * ((1e6 * beta) / ReD)^0.7 ...
    + (0.0188 + 0.0063 * A) * beta^3.5 * ((1e6 / ReD)^0.3) ...
    + (0.043 + 0.080 * exp(-10 * L1) - 0.123 * exp(-7 * L1)) ...
      * (1 - 0.11 * A) * (beta^4 / (1 - beta^4)) ...
    - 0.031 * (M2p - 0.8 * M2p^1.1) * beta^1.3;

% Correzione per piccolo diametro
if Dmm < 71.12
    C = C + 0.011 * (0.75 - beta) * (2.8 - Dmm / 25.4);
end
end
```

```

function C = C_orifizio_DD2(beta, ReD, D)
%C_ORIFIZIO_DD2 Coefficiente di efflusso per orificio con prese D e D/2.
%
% C = C_orifizio_DD2(beta, ReD, D)
%
% Input:
%   beta: rapporto di diametro d/D [-]
%   ReD: Reynolds nel tubo [-]
%   D: diametro interno del tubo [m]
%
% Output:
%   C: coefficiente di efflusso [-]
%
% Formula ISO 5167-2: Reader-Harris/Gallagher (RHG), caso D e D/2 tappings.
% Per D e D/2 tappings:
%   L1 = 1
%   L2' = 0.47

if beta <= 0 || beta >= 1
    error('C_orifizio_DD2: beta deve stare tra 0 e 1.');
```

end

```

if ReD <= 0
    error('C_orifizio_DD2: ReD deve essere > 0.');
```

end

```

if D <= 0
    error('C_orifizio_DD2: D deve essere > 0.');
```

end

```

% Conversione in mm, richiesta dalla formulazione RHG
Dmm = D * 1000;

% D e D/2 tappings
L1 = 1.0;
L2p = 0.47;

A = (19000 * beta / ReD)^0.8;
M2p = (2 * L2p) / (1 - beta);

C = 0.5961 ...
    + 0.0261 * beta^2 ...
    - 0.216 * beta^8 ...
    + 0.000521 * ((1e6 * beta) / ReD)^0.7 ...
    + (0.0188 + 0.0063 * A) * beta^3.5 * ((1e6 / ReD)^0.3) ...
    + (0.043 + 0.080 * exp(-10 * L1) - 0.123 * exp(-7 * L1)) ...
      * (1 - 0.11 * A) * (beta^4 / (1 - beta^4)) ...
    - 0.031 * (M2p - 0.8 * M2p^1.1) * beta^1.3;

% Correzione per piccolo diametro
if Dmm < 71.12
    C = C + 0.011 * (0.75 - beta) * (2.8 - Dmm / 25.4);
end
end

```

```

%% POST_PROCESSING_ISO6358_CICLO_COMPLETO
% Post-processing dei CSV generati da main_prova_portata_senza_MPPE.m
%
% Il programma:
% 1) legge uno o piu CSV delle prove;
% 2) calcola la conduttanza Ce di ogni punto secondo ISO 6358-1;
% 3) ricava C come media di almeno 3 punti sonici;
% 4) ricava b e m con il metodo dei minimi quadrati usando almeno
% 5 punti subsonici;
% 5) se  $0.48 \leq m \leq 0.52$ , puo fissare  $m = 0.5$  e ricalcolare b;
% 6) confronta, quando disponibili, prova crescente e decrescente;
% 7) salva dati elaborati, parametri riassuntivi e grafici.
%
% IMPORTANTE
% Il programma e' compatibile sia con:
% - CSV contenenti una sola direzione di prova;
% - CSV contenenti un ciclo completo crescente/decrescente.
% Se sono presenti le colonne flow_direction e is_turning_point, i due rami
% vengono separati automaticamente. Il punto di inversione, acquisito una
% sola volta, viene incluso logicamente in entrambe le serie.
% Per i vecchi CSV privi di tali colonne viene ancora richiesta manualmente
% la direzione della serie.
%
% Il calcolo e' coerente con le colonne prodotte da:
% main_prova_portata_senza_MPPE.m
%
% Non richiede Optimization Toolbox: il fit usa fminsearch.

clear;
clc;
close all;

%% 1. COSTANTI ISO 6358

T0 = 293.15;      % Temperatura atmosfera normale di riferimento [K]
rho0 = 1.185;     % Densita' atmosfera normale di riferimento [kg/m^3]
p0 = 100000;     % Pressione atmosfera normale di riferimento [Pa]

% Per una normale valvola direzionale completamente azionata si assume
% generalmente Delta pc = 0. Modificare solo se la pressione di apertura
% e' stata effettivamente misurata.
delta_pc_Pa = 0;

% Se il primo fit restituisce  $0.48 \leq m \leq 0.52$ , la norma consente di
% porre  $m = 0.5$  e ricalcolare b.
fix_m_to_half_when_allowed = true;

% Limiti numerici usati dal fit. Non sono valori caratteristici imposti
% dalla norma, ma vincoli per evitare soluzioni non fisiche.
b_lower = 0.0;
m_lower = 0.05;
m_upper = 5.0;

%% 2. SELEZIONE DEI FILE CSV

[file_names, folder] = uigetfile( ...
    '*.csv', ...
    'Seleziona uno o piu file generati da main_prova_portata_senza_MPPE', ...

```

```

        'MultiSelect', 'on');

if isequal(file_names, 0)
    error('Nessun file selezionato.');
```

end

```

if ischar(file_names) || isstring(file_names)
    file_names = cellstr(file_names);
end

%% 3. COLONNE RICHIESTE DALLO SCRIPT DI ACQUISIZIONE

required_variables = { ...
    'point_id', ...
    'T1_K', ...
    'p_atm_abs_Pa', ...
    'p_valve_up_abs_Pa', ...
    'p_valve_down_abs_Pa', ...
    'pressure_ratio', ...
    'p1_orifice_abs_Pa', ...
    'p2_orifice_abs_Pa', ...
    'dp_orifice_Pa', ...
    'qm_kg_s', ...
    'qv_m3_s', ...
    'ReD', ...
    'C', ...
    'epsilon', ...
    'beta', ...
    'd_mm'};

%% 4. PREPARAZIONE E SEPARAZIONE DELLE SERIE

% Ogni elemento di series_inputs rappresenta una sola direzione fisica.
% Un CSV con ciclo completo genera quindi due serie virtuali. Il punto di
% inversione viene mantenuto in entrambe, senza duplicarlo nel file sorgente.
series_inputs = struct( ...
    'source_file', {}, ...
    'direction', {}, ...
    'data', {});

for file_index = 1:numel(file_names)

    current_file = fullfile(folder, file_names{file_index});
    raw_data = readtable(current_file);

    missing_variables = setdiff( ...
        required_variables, raw_data.Properties.VariableNames);

    if ~isempty(missing_variables)
        error('Nel file %s mancano le colonne: %s', ...
            file_names{file_index}, strjoin(missing_variables, ', '));
    end

    variable_names = raw_data.Properties.VariableNames;

    if ismember('flow_direction', variable_names)

        direction_column = lower(strtrim(string(raw_data.flow_direction)));

        % Compatibilita' con eventuali etichette piu' estese.

```

```

direction_column(ismember(direction_column, ...
    ["d", "portata decrescente"])) = "decrescente";
direction_column(ismember(direction_column, ...
    ["c", "portata crescente"])) = "crescente";

if ismember('is_turning_point', variable_names)
    turning_mask = to_logical_mask(raw_data.is_turning_point);
else
    turning_mask = direction_column == "inversione";
end

% Anche l'etichetta "inversione" identifica il punto comune.
turning_mask = turning_mask | direction_column == "inversione";

decreasing_mask = direction_column == "decrescente";
increasing_mask = direction_column == "crescente";

if any(decreasing_mask) && any(increasing_mask)

    if sum(turning_mask) == 0
        warning(['Nel file %s sono presenti entrambi i rami, ma ' ...
            'non e' stato identificato alcun punto di inversione.'], ...
            file_names{file_index});
    elseif sum(turning_mask) > 1
        warning(['Nel file %s sono stati identificati %d punti di ' ...
            'inversione. Tutti verranno inclusi in entrambi i rami.'], ...
            file_names{file_index}, sum(turning_mask));
    end

    new_index = numel(series_inputs) + 1;
    series_inputs(new_index).source_file = ...
        string(file_names{file_index});
    series_inputs(new_index).direction = "decrescente";
    series_inputs(new_index).data = ...
        raw_data(decreasing_mask | turning_mask, :);

    new_index = numel(series_inputs) + 1;
    series_inputs(new_index).source_file = ...
        string(file_names{file_index});
    series_inputs(new_index).direction = "crescente";
    series_inputs(new_index).data = ...
        raw_data(increasing_mask | turning_mask, :);

    fprintf('\nFile %s: ciclo completo riconosciuto automaticamente.\n', ...
        file_names{file_index});
    fprintf(' Serie decrescente: %d punti, incluso il punto di
inversione.\n', ...
        height(series_inputs(end-1).data));
    fprintf(' Serie crescente: %d punti, incluso il punto di
inversione.\n', ...
        height(series_inputs(end).data));

elseif any(decreasing_mask)

    new_index = numel(series_inputs) + 1;
    series_inputs(new_index).source_file = ...
        string(file_names{file_index});
    series_inputs(new_index).direction = "decrescente";
    series_inputs(new_index).data = ...
        raw_data(decreasing_mask | turning_mask, :);

```

```

        fprintf('\nFile %s: serie decrescente riconosciuta automaticamente.\n',
...
            file_names{file_index});

elseif any(increasing_mask)

    new_index = numel(series_inputs) + 1;
    series_inputs(new_index).source_file = ...
        string(file_names{file_index});
    series_inputs(new_index).direction = "crescente";
    series_inputs(new_index).data = ...
        raw_data(increasing_mask | turning_mask, :);

    fprintf('\nFile %s: serie crescente riconosciuta automaticamente.\n', ...
        file_names{file_index});

else
    error(['Nel file %s la colonna flow_direction non contiene ' ...
        'valori crescente o decrescente.'], file_names{file_index});
end

else
    % Compatibilita' con i CSV prodotti dalla precedente versione del main.
    fprintf('\nIl file %s non contiene la colonna flow_direction.\n', ...
        file_names{file_index});

    manual_direction = ask_test_direction();

    new_index = numel(series_inputs) + 1;
    series_inputs(new_index).source_file = ...
        string(file_names{file_index});
    series_inputs(new_index).direction = manual_direction;
    series_inputs(new_index).data = raw_data;
end
end

n_series = numel(series_inputs);

if n_series == 0
    error('Nessuna serie valida trovata nei file selezionati.');
```

end

%% 5. INIZIALIZZAZIONE RISULTATI

```

processed_parts = cell(n_series, 1);
summary_rows = cell(n_series, 17);
fit_series = cell(n_series, 1);

fprintf('\n===== POST-PROCESSING ISO 6358 =====\n');
fprintf('Condizioni ANR: T0 = %.2f K, p0 = %.0f Pa, rho0 = %.3f kg/m^3\n', ...
    T0, p0, rho0);
fprintf('Numero di serie direzionali da elaborare: %d\n', n_series);

%% 6. ELABORAZIONE DI OGNI SERIE

for k = 1:n_series

    data = series_inputs(k).data;
    source_file = series_inputs(k).source_file;
```

```

test_direction = series_inputs(k).direction;

fprintf('\n-----\n');
fprintf('SERIE %d: %s - %s\n', ...
    k, char(source_file), upper(char(test_direction)));

%% 5.1 Controllo e conversione delle grandezze

p1_valve_Pa = data.p_valve_up_abs_Pa(:);
p2_valve_Pa = data.p_valve_down_abs_Pa(:);
T1_K = data.T1_K(:);
qm_kg_s = data.qm_kg_s(:);

pressure_ratio = p2_valve_Pa ./ p1_valve_Pa;

valid = ...
    isfinite(data.point_id(:)) & ...
    isfinite(T1_K) & T1_K > 0 & ...
    isfinite(p1_valve_Pa) & p1_valve_Pa > 0 & ...
    isfinite(p2_valve_Pa) & p2_valve_Pa > 0 & ...
    isfinite(pressure_ratio) & ...
    pressure_ratio > 0 & pressure_ratio < 1 & ...
    isfinite(qm_kg_s) & qm_kg_s > 0;

if any(~valid)
    warning('%d punti non validi esclusi dal file %s.', ...
        sum(~valid), char(source_file));
end

data = data(valid, :);
p1_valve_Pa = p1_valve_Pa(valid);
p2_valve_Pa = p2_valve_Pa(valid);
T1_K = T1_K(valid);
qm_kg_s = qm_kg_s(valid);
pressure_ratio = pressure_ratio(valid);

if height(data) < 8
    error(['Il file %s contiene meno di 8 punti validi. ' ...
        'Per una direzione servono almeno 3 punti sonici e ' ...
        '5 punti subsonici.'], char(source_file));
end

% Ordinamento per rapporto di pressione crescente, utile per la
% selezione e la rappresentazione grafica.
[pressure_ratio, order] = sort(pressure_ratio, 'ascend');

data = data(order, :);
p1_valve_Pa = p1_valve_Pa(order);
p2_valve_Pa = p2_valve_Pa(order);
T1_K = T1_K(order);
qm_kg_s = qm_kg_s(order);

n = height(data);
local_row = (1:n)';

%% 5.2 Portata ANR e conduttanza Ce

qv_ANR_m3_s = qm_kg_s ./ rho0;
qN_ANR_L_min = qv_ANR_m3_s .* 1000 .* 60;

```

```

Ce_m3_s_Pa = ...
    qm_kg_s ./ (rho0 .* p1_valve_Pa) .* ...
    sqrt(T1_K ./ T0);

p1_valve_bar_abs = p1_valve_Pa ./ 1e5;
p2_valve_bar_abs = p2_valve_Pa ./ 1e5;

Ce_L_min_bar = ...
    qN_ANR_L_min ./ p1_valve_bar_abs .* ...
    sqrt(T1_K ./ T0);

Ce_L_s_bar = Ce_L_min_bar ./ 60;

%% 5.3 Controlli sul misuratore ISO 5167

orifice_pressure_ratio = ...
    data.p2_orifice_abs_Pa(:) ./ data.p1_orifice_abs_Pa(:);

iso5167_pressure_ratio_ok = orifice_pressure_ratio >= 0.75;

if any(~iso5167_pressure_ratio_ok)
    warning(['Nel file %s, %d punti hanno p2/p1 del diaframma < 0.75. ' ...
        'Il calcolo ISO 5167 va verificato per tali punti.'], ...
        char(source_file), sum(~iso5167_pressure_ratio_ok));
end

% Lo script di acquisizione usa prese D-D/2 e D = 50 mm.
beta_orifice = data.beta(:);
ReD_min = 5000 .* ones(n, 1);
high_beta = beta_orifice > 0.56;
ReD_min(high_beta) = 16000 .* beta_orifice(high_beta).^2;
iso5167_Re_ok = data.ReD(:) >= ReD_min;

if any(~iso5167_Re_ok)
    warning(['Nel file %s, %d punti non rispettano il limite minimo ' ...
        'di Reynolds adottato per le prese D-D/2.'], ...
        char(source_file), sum(~iso5167_Re_ok));
end

%% 5.4 Selezione dei punti sonici e subsonici

selection_table = table( ...
    local_row, ...
    data.point_id(:), ...
    pressure_ratio, ...
    p1_valve_bar_abs, ...
    p2_valve_bar_abs, ...
    qN_ANR_L_min, ...
    Ce_L_s_bar, ...
    'VariableNames', { ...
        'riga_locale', ...
        'point_id', ...
        'p2_p1', ...
        'p1_bar_abs', ...
        'p2_bar_abs', ...
        'qN_L_min_ANR', ...
        'Ce_L_s_bar_ANR'});

disp(selection_table);

```



```

% Suggerimento: i primi tre punti a rapporto di pressione piu basso.
default_choked = 1:min(3, n);

choked_rows = ask_rows( ...
    ['Inserisci le righe locali dei punti SONICI, ben interni al ' ...
    'plateau'], ...
    default_choked, ...
    n);

remaining_rows = setdiff(1:n, choked_rows, 'stable');

% Come suggerimento vengono proposti tutti i punti rimanenti. L'utente
% deve eliminare eventuali punti ancora sonici o di transizione.
default_subsonic = remaining_rows;

subsonic_rows = ask_rows( ...
    ['Inserisci le righe locali dei punti SUBSONICI da usare nel fit ' ...
    'di b e m'], ...
    default_subsonic, ...
    n);

if numel(choked_rows) < 3
    error('Per C servono almeno 3 punti sonici nella serie %d.', k);
end

if numel(subsonic_rows) < 5
    error('Per b e m servono almeno 5 punti subsonici nella serie %d.', k);
end

if ~isempty(intersect(choked_rows, subsonic_rows))
    error('I punti sonici e subsonici devono essere disgiunti.');
```

end

```

is_choked = false(n, 1);
is_subsonic = false(n, 1);
is_choked(choked_rows) = true;
is_subsonic(subsonic_rows) = true;

%% 5.5 Conduttanza sonica C

C_m3_s_Pa = mean(Ce_m3_s_Pa(is_choked), 'omitnan');
C_L_min_bar = mean(Ce_L_min_bar(is_choked), 'omitnan');
C_L_s_bar = C_L_min_bar / 60;

C_choked_cv_percent = ...
    100 * std(Ce_L_s_bar(is_choked), 'omitnan') / C_L_s_bar;

if C_choked_cv_percent > 2
    warning(['La dispersione dei punti sonici della serie %d e'' ' ...
    'elevata: CV = %.2f %''], k, C_choked_cv_percent);
end

conductance_ratio = Ce_m3_s_Pa ./ C_m3_s_Pa;

%% 5.6 Fit ISO 6358 di b e m

x_sub = pressure_ratio(is_subsonic);
y_sub = conductance_ratio(is_subsonic);
p1_sub_Pa = p1_valve_Pa(is_subsonic);
```

```

if any(y_sub <= 0)
    error('Il rapporto Ce/C deve essere positivo nei punti subsonici.');
```

end

```

fit_result = fit_b_m_iso6358( ...
    x_sub, ...
    y_sub, ...
    p1_sub_Pa, ...
    delta_pc_Pa, ...
    fix_m_to_half_when_allowed, ...
    b_lower, ...
    m_lower, ...
    m_upper);

fit_series{k} = fit_result;

b_value = fit_result.b;
m_value = fit_result.m;

%% 5.7 Ricostruzione della curva su tutti i punti

a_all = 1 - delta_pc_Pa ./ p1_valve_Pa;

shape_model = iso6358_shape( ...
    pressure_ratio, ...
    a_all, ...
    b_value, ...
    m_value);

qN_fit_L_min = ...
    C_L_min_bar .* p1_valve_bar_abs .* ...
    sqrt(T0 ./ T1_K) .* shape_model;

conductance_ratio_fit = shape_model;

residual_qN_L_min = qN_ANR_L_min - qN_fit_L_min;

flow_region = repmat("non_utilizzato", n, 1);
flow_region(is_choked) = "sonico";
flow_region(is_subsonic) = "subsonico";

%% 5.8 Tabella elaborata della serie

processed = data;
processed.series_id = repmat(k, n, 1);
processed.source_file = repmat(string(char(source_file)), n, 1);
processed.test_direction = repmat(test_direction, n, 1);
processed.local_row = local_row;
processed.pressure_ratio_recalculated = pressure_ratio;
processed.orifice_pressure_ratio = orifice_pressure_ratio;
processed.iso5167_pressure_ratio_ok = iso5167_pressure_ratio_ok;
processed.iso5167_Re_ok = iso5167_Re_ok;
processed.qv_ANR_m3_s = qv_ANR_m3_s;
processed.qN_ANR_L_min = qN_ANR_L_min;
processed.Ce_m3_s_Pa_ANR = Ce_m3_s_Pa;
processed.Ce_L_s_bar_ANR = Ce_L_s_bar;
processed.conductance_ratio = conductance_ratio;
processed.flow_region = flow_region;
processed.C_valve_L_s_bar_ANR = repmat(C_L_s_bar, n, 1);
processed.b_valve = repmat(b_value, n, 1);

```

```

processed.m_value = repmat(m_value, n, 1);
processed.conductance_ratio_fit = conductance_ratio_fit;
processed.qN_fit_L_min = qN_fit_L_min;
processed.residual_qN_L_min = residual_qN_L_min;

processed_parts{k} = processed;

%% 5.9 Riga riassuntiva della serie

summary_rows(k, :) = { ...
    k, ...
    string(char(source_file)), ...
    test_direction, ...
    n, ...
    sum(is_choked), ...
    sum(is_subsonic), ...
    C_m3_s_Pa, ...
    C_L_s_bar, ...
    C_choked_cv_percent, ...
    fit_result.b_raw, ...
    fit_result.m_raw, ...
    b_value, ...
    m_value, ...
    fit_result.m_fixed_to_half, ...
    fit_result.R2, ...
    fit_result.RMSE, ...
    fit_result.exitflag};

%% 5.10 Stampa dei risultati della serie

fprintf('\nRISULTATI SERIE %d - %s\n', k, upper(test_direction));
fprintf('Punti sonici utilizzati      = %d\n', sum(is_choked));
fprintf('Punti subsonici utilizzati     = %d\n', sum(is_subsonic));
fprintf('C                                = %.6f L/(s bar) ANR\n', ...
    C_L_s_bar);
fprintf('CV dei punti sonici              = %.3f %%\n', ...
    C_choked_cv_percent);
fprintf('b grezzo                        = %.5f\n', fit_result.b_raw);
fprintf('m grezzo                        = %.5f\n', fit_result.m_raw);

if fit_result.m_fixed_to_half
    fprintf('m corretto secondo la norma    = 0.50000\n');
    fprintf('b ricalcolato con m = 0.5      = %.5f\n', b_value);
else
    fprintf('b finale                        = %.5f\n', b_value);
    fprintf('m finale                        = %.5f\n', m_value);
end

fprintf('R^2 del fit normalizzato        = %.5f\n', fit_result.R2);
fprintf('RMSE del fit normalizzato       = %.5f\n', fit_result.RMSE);
end

%% 7. TABELLA RIASSUNTIVA DELLE SERIE

summary = cell2table(summary_rows, ...
    'VariableNames', { ...
        'series_id', ...
        'source_file', ...
        'test_direction', ...
        'n_valid', ...

```

```

        'n_choked', ...
        'n_subsonic', ...
        'C_m3_s_Pa_ANR', ...
        'C_L_s_bar_ANR', ...
        'C_choked_CV_percent', ...
        'b_raw', ...
        'm_raw', ...
        'b', ...
        'm', ...
        'm_fixed_to_0_5', ...
        'R2_normalized_fit', ...
        'RMSE_normalized_fit', ...
        'fit_exitflag'}));

processed_all = vertcat(processed_parts{:});

%% 8. FIT COMBINATO E CONFRONTO CRESCENTE/DECRESCENTE

combined_fit_available = false;
combined_fit = struct();

all_subsonic = processed_all.flow_region == "subsonico";

if sum(all_subsonic) >= 5
    combined_fit = fit_b_m_iso6358( ...
        processed_all.pressure_ratio_recalculated(all_subsonic), ...
        processed_all.conductance_ratio(all_subsonic), ...
        processed_all.p_valve_up_abs_Pa(all_subsonic), ...
        delta_pc_Pa, ...
        fix_m_to_half_when_allowed, ...
        b_lower, ...
        m_lower, ...
        m_upper);

    combined_fit_available = true;
end

final_results = build_final_results(summary, combined_fit, ...
    combined_fit_available);

%% 9. GRAFICI

fig = figure( ...
    'Color', 'w', ...
    'Position', [80 80 1350 820]);

layout = tiledlayout(fig, 2, 2, ...
    'TileSpacing', 'compact', ...
    'Padding', 'compact');

unique_series = unique(processed_all.series_id, 'stable');

% Grafico 1: qN in funzione del rapporto di pressione
ax1 = nexttile(layout, 1);
hold(ax1, 'on');

for i = 1:numel(unique_series)
    sid = unique_series(i);
    mask = processed_all.series_id == sid;
    direction_label = char(processed_all.test_direction(find(mask, 1, 'first')));

```

```

[x_plot, idx_plot] = sort( ...
    processed_all.pressure_ratio_recalculated(mask));

q_data = processed_all.qN_ANR_L_min(mask);
q_fit = processed_all.qN_fit_L_min(mask);

scatter(ax1, x_plot, q_data(idx_plot), 45, 'filled', ...
    'DisplayName', sprintf('Dati serie %d - %s', sid, direction_label));

plot(ax1, x_plot, q_fit(idx_plot), '-', ...
    'LineWidth', 1.5, ...
    'DisplayName', sprintf('Fit serie %d - %s', sid, direction_label));
end

xlabel(ax1, 'Rapporto di pressione assoluto p_2/p_1 [-]');
ylabel(ax1, 'Portata q_N [L/min ANR]');
title(ax1, 'Portata normalizzata della valvola');
grid(ax1, 'on');
box(ax1, 'on');
C_display = final_results.C_mean_L_s_bar_ANR(1);

if exist('combined_fit_available', 'var') && ...
    combined_fit_available && ...
    isfinite(final_results.b_combined_fit(1))

    b_display = final_results.b_combined_fit(1);

else

    b_display = final_results.b_mean(1);

end

parameter_text = sprintf( ...
    'C = %.4f L/(s\cdotbar) ANR\nb = %.4f', ...
    C_display, ...
    b_display);

text(ax1, 0.04, 0.08, parameter_text, ...
    'Units', 'normalized', ...
    'Interpreter', 'tex', ...
    'FontName', 'Times New Roman', ...
    'FontSize', 11, ...
    'VerticalAlignment', 'bottom', ...
    'HorizontalAlignment', 'left', ...
    'BackgroundColor', 'white', ...
    'EdgeColor', [0.4 0.4 0.4], ...
    'Margin', 6);
legend(ax1, 'Location', 'best');

% Grafico 2: Ce/C in funzione del rapporto di pressione
ax2 = nexttile(layout, 2);
hold(ax2, 'on');

for i = 1:numel(unique_series)
    sid = unique_series(i);
    mask = processed_all.series_id == sid;
    direction_label = char(processed_all.test_direction(find(mask, 1, 'first')));

```

```

scatter(ax2, ...
        processed_all.pressure_ratio_recalculated(mask), ...
        processed_all.conductance_ratio(mask), ...
        45, 'filled', ...
        'DisplayName', sprintf('Serie %d - %s', sid, direction_label));
end

if combined_fit_available
    ratio_curve = linspace(0, 1, 500)';
    p1_ref = mean(processed_all.p_valve_up_abs_Pa, 'omitnan');
    a_curve = ones(size(ratio_curve)) .* ...
        (1 - delta_pc_Pa/p1_ref);

    y_curve = iso6358_shape( ...
        ratio_curve, ...
        a_curve, ...
        combined_fit.b, ...
        combined_fit.m);

    plot(ax2, ratio_curve, y_curve, 'k-', ...
        'LineWidth', 1.8, ...
        'DisplayName', 'Fit combinato ISO 6358');

    xline(ax2, combined_fit.b, '--', ...
        'LineWidth', 1.3, ...
        'DisplayName', 'b combinato');
end

xlabel(ax2, 'Rapporto di pressione assoluto p2/p1 [-]');
ylabel(ax2, 'Rapporto di conduttanza Ce/C [-]');
title(ax2, 'Identificazione di b e m');
xlim(ax2, [0 1]);
ylim(ax2, [0 1.10]);
grid(ax2, 'on');
box(ax2, 'on');
if exist('combined_fit_available', 'var') && ...
    combined_fit_available && ...
    isfinite(final_results.b_combined_fit(1))

    b_display = final_results.b_combined_fit(1);
    m_display = final_results.m_combined_fit(1);

else

    b_display = final_results.b_mean(1);
    m_display = final_results.m_mean(1);

end

fit_parameter_text = sprintf( ...
    'b = %.4f\nm = %.4f', ...
    b_display, ...
    m_display);

text(ax2, 0.04, 0.08, fit_parameter_text, ...
    'Units', 'normalized', ...
    'FontName', 'Times New Roman', ...
    'FontSize', 11, ...
    'VerticalAlignment', 'bottom', ...
    'HorizontalAlignment', 'left', ...

```

```

    'BackgroundColor', 'white', ...
    'EdgeColor', [0.4 0.4 0.4], ...
    'Margin', 6);
legend(ax2, 'Location', 'best');

% Grafico 3: qN in funzione della pressione di valle
ax3 = nexttile(layout, 3);
hold(ax3, 'on');

for i = 1:numel(unique_series)
    sid = unique_series(i);
    mask = processed_all.series_id == sid;
    direction_label = char(processed_all.test_direction(find(mask, 1, 'first')));

    p2_bar = processed_all.p_valve_down_abs_Pa(mask) ./ 1e5;
    q_data = processed_all.qN_ANR_L_min(mask);

    [p2_plot, idx_plot] = sort(p2_bar);

    plot(ax3, p2_plot, q_data(idx_plot), '-o', ...
        'LineWidth', 1.2, ...
        'MarkerSize', 5, ...
        'DisplayName', sprintf('Serie %d - %s', sid, direction_label));
end

xlabel(ax3, 'Pressione assoluta di valle p_2 [bar abs]');
ylabel(ax3, 'Portata q_N [L/min ANR]');
title(ax3, 'Portata in funzione della pressione di valle');
grid(ax3, 'on');
box(ax3, 'on');
legend(ax3, 'Location', 'best');

% Grafico 4: residui normalizzati del fit
ax4 = nexttile(layout, 4);
hold(ax4, 'on');

for i = 1:numel(unique_series)
    sid = unique_series(i);
    mask = processed_all.series_id == sid & ...
        processed_all.flow_region == "subsonico";
    series_mask = processed_all.series_id == sid;
    direction_label = char(processed_all.test_direction( ...
        find(series_mask, 1, 'first')));

    residual_normalized = ...
        processed_all.conductance_ratio(mask) - ...
        processed_all.conductance_ratio_fit(mask);

    scatter(ax4, ...
        processed_all.pressure_ratio_recalculated(mask), ...
        residual_normalized, ...
        45, 'filled', ...
        'DisplayName', sprintf('Serie %d - %s', sid, direction_label));
end

yline(ax4, 0, 'k--', 'HandleVisibility', 'off');
xlabel(ax4, 'Rapporto di pressione assoluto p_2/p_1 [-]');
ylabel(ax4, 'Residuo (C_e/C)_{mis}-(C_e/C)_{fit} [-]');
title(ax4, 'Residui del modello subsonico');
grid(ax4, 'on');

```

```

box(ax4, 'on');
legend(ax4, 'Location', 'best');

set([ax1 ax2 ax3 ax4], ...
    'FontName', 'Times New Roman', ...
    'FontSize', 11);

sgtitle(layout, 'Caratterizzazione della valvola secondo ISO 6358-1', ...
    'FontName', 'Times New Roman', ...
    'FontSize', 14);

%% 10. SALVATAGGIO

output_folder = fullfile(folder, 'Dati_elaborati');

if ~isfolder(output_folder)
    mkdir(output_folder);
end

timestamp = char(datetime('now', 'Format', 'yyyyMMdd_HH:mm:ss'));

processed_output = fullfile( ...
    output_folder, ...
    ['dati_elaborati_ISO6358_' timestamp '.csv']);

summary_output = fullfile( ...
    output_folder, ...
    ['parametri_serie_ISO6358_' timestamp '.csv']);

final_output = fullfile( ...
    output_folder, ...
    ['parametri_finali_ISO6358_' timestamp '.csv']);

image_output = fullfile( ...
    output_folder, ...
    ['curva_ISO6358_' timestamp '.png']);

writetable(processed_all, processed_output);
writetable(summary, summary_output);
writetable(final_results, final_output);
exportgraphics(fig, image_output, 'Resolution', 300);

%% 11. RISULTATI FINALI NEL COMMAND WINDOW

fprintf('\n===== RISULTATI FINALI =====\n');
disp(summary);

disp(final_results);

fprintf('\nFile creati:\n');
fprintf('%s\n', processed_output);
fprintf('%s\n', summary_output);
fprintf('%s\n', final_output);
fprintf('%s\n', image_output);

%% FUNZIONI LOCALI

function mask = to_logical_mask(values)
% Converte in modo robusto una colonna CSV in un vettore logico.

```



```

if islogical(values)
    mask = values(:);
elseif isnumeric(values)
    mask = values(:) ~= 0;
else
    text_values = lower(strtrim(string(values(:))));
    mask = ismember(text_values, ...
        ["1", "true", "vero", "yes", "si", "s"]);
end
end

function direction = ask_test_direction()
% Chiede la direzione della singola serie.

while true
    answer = lower(strtrim(input( ...
        ['Direzione della serie [D = portata decrescente, ' ...
        'C = portata crescente]: ', 's'))));

    if any(strcmp(answer, {'d', 'decrescente'}))
        direction = "decrescente";
        return;
    elseif any(strcmp(answer, {'c', 'crescente'}))
        direction = "crescente";
        return;
    else
        fprintf('Inserire D oppure C.\n');
    end
end
end

function rows = ask_rows(prompt_text, default_rows, n_rows)
% Legge un vettore di indici locali. INVIO accetta il suggerimento.

while true
    answer = input(sprintf('%s\nSuggerimento: %s\nRighe: ', ...
        prompt_text, mat2str(default_rows)), 's');

    if isempty(strtrim(answer))
        rows = default_rows(:);
    else
        clean_answer = regexp(answer, '[\[\],;]', ' ');
        rows = sscanf(clean_answer, '%f');
        rows = unique(round(rows), 'stable');
    end

    if isempty(rows)
        fprintf('Selezione vuota. Riprovare.\n');
        continue;
    end

    if any(rows < 1) || any(rows > n_rows) || any(~isfinite(rows))
        fprintf('Le righe devono essere interi compresi tra 1 e %d.\n', ...
            n_rows);
        continue;
    end

    return;
end
end
end

```

```

function result = fit_b_m_iso6358( ...
    x, y, p1_Pa, delta_pc_Pa, fix_m_to_half, ...
    b_lower, m_lower, m_upper)
% Fit ai minimi quadrati di b e m secondo la relazione ISO 6358:
%
%  $C_e/C = [1 - ((p_2/p_1 - b)/(1 - \Delta_{pc}/p_1 - b))^2]^m$ 

    x = x(:);
    y = y(:);
    p1_Pa = p1_Pa(:);

    a = 1 - delta_pc_Pa ./ p1_Pa;

    b_upper = min([x; a]) - 1e-6;

    if b_upper <= b_lower
        error('Impossibile definire un intervallo fisico per b.');
```

end

```

    b0 = min(0.40, b_upper - 0.05*(b_upper - b_lower));
    b0 = max(b0, b_lower + 0.05*(b_upper - b_lower));
    m0 = 0.50;

    theta0 = [ ...
        inverse_logistic_map(b0, b_lower, b_upper), ...
        inverse_logistic_map(m0, m_lower, m_upper)];

    objective = @(theta) objective_b_m( ...
        theta, x, y, a, b_lower, b_upper, m_lower, m_upper);

    options = optimset( ...
        'Display', 'off', ...
        'MaxFunEvals', 20000, ...
        'MaxIter', 10000, ...
        'TolX', 1e-10, ...
        'TolFun', 1e-12);

    [theta_fit, ~, exitflag] = fminsearch( ...
        objective, theta0, options);

    b_raw = logistic_map(theta_fit(1), b_lower, b_upper);
    m_raw = logistic_map(theta_fit(2), m_lower, m_upper);

    b_final = b_raw;
    m_final = m_raw;
    m_fixed_to_half = false;

    if fix_m_to_half && m_raw >= 0.48 && m_raw <= 0.52
        m_final = 0.5;
        m_fixed_to_half = true;

        theta_b0 = inverse_logistic_map(b_raw, b_lower, b_upper);
        objective_b = @(theta_b) objective_b_fixed_m( ...
            theta_b, x, y, a, b_lower, b_upper, m_final);

        [theta_b_fit, ~, exitflag_b] = fminsearch( ...
            objective_b, theta_b0, options);

        b_final = logistic_map(theta_b_fit, b_lower, b_upper);

```

```

        exitflag = min(exitflag, exitflag_b);
    end

    y_fit = iso6358_shape(x, a, b_final, m_final);
    residuals = y - y_fit;

    SS_res = sum(residuals.^2);
    SS_tot = sum((y - mean(y)).^2);

    if SS_tot > 0
        R2 = 1 - SS_res/SS_tot;
    else
        R2 = NaN;
    end

    RMSE = sqrt(mean(residuals.^2));

    result = struct();
    result.b_raw = b_raw;
    result.m_raw = m_raw;
    result.b = b_final;
    result.m = m_final;
    result.m_fixed_to_half = m_fixed_to_half;
    result.R2 = R2;
    result.RMSE = RMSE;
    result.exitflag = exitflag;
    result.y_fit = y_fit;
end

function value = objective_b_m( ...
    theta, x, y, a, b_lower, b_upper, m_lower, m_upper)

    b = logistic_map(theta(1), b_lower, b_upper);
    m = logistic_map(theta(2), m_lower, m_upper);

    y_model = iso6358_shape(x, a, b, m);

    if any(~isfinite(y_model))
        value = realmax;
        return;
    end

    residuals = y - y_model;
    value = sum(residuals.^2);
end

function value = objective_b_fixed_m( ...
    theta_b, x, y, a, b_lower, b_upper, m_fixed)

    b = logistic_map(theta_b, b_lower, b_upper);
    y_model = iso6358_shape(x, a, b, m_fixed);

    if any(~isfinite(y_model))
        value = realmax;
        return;
    end

    residuals = y - y_model;
    value = sum(residuals.^2);
end

```

```

function shape = iso6358_shape(x, a, b, m)
% Funzione caratteristica completa, espressa come Ce/C.

    x = x(:);
    a = a(:);

    if isscalar(a)
        a = repmat(a, size(x));
    end

    shape = zeros(size(x));

    choked = x <= b;
    subsonic = x > b & x <= a;
    no_flow = x > a;

    shape(choked) = 1;

    base = 1 - ((x(subsonic) - b) ./ ...
        (a(subsonic) - b)).^2;

    base = max(base, 0);
    shape(subsonic) = base.^m;
    shape(no_flow) = 0;
end

function value = logistic_map(theta, lower_bound, upper_bound)
% Trasforma un parametro reale in un intervallo finito.

    value = lower_bound + ...
        (upper_bound - lower_bound) ./ (1 + exp(-theta));
end

function theta = inverse_logistic_map(value, lower_bound, upper_bound)
% Trasformazione inversa della funzione logistic_map.

    fraction = (value - lower_bound) ./ ...
        (upper_bound - lower_bound);

    fraction = min(max(fraction, 1e-9), 1 - 1e-9);
    theta = log(fraction ./ (1 - fraction));
end

function final_results = build_final_results( ...
    summary, combined_fit, combined_fit_available)
% Confronta le direzioni e costruisce la tabella finale.

    directions = string(summary.test_direction);

    dec_mask = directions == "decrescente";
    inc_mask = directions == "crescente";

    C_dec = mean(summary.C_L_s_bar_ANR(dec_mask), 'omitnan');
    C_inc = mean(summary.C_L_s_bar_ANR(inc_mask), 'omitnan');
    b_dec = mean(summary.b(dec_mask), 'omitnan');
    b_inc = mean(summary.b(inc_mask), 'omitnan');
    m_dec = mean(summary.m(dec_mask), 'omitnan');
    m_inc = mean(summary.m(inc_mask), 'omitnan');

```

```

has_dec = any(dec_mask);
has_inc = any(inc_mask);

C_difference_percent = NaN;
b_difference = NaN;
m_difference = NaN;
report_separate_C = false;
report_separate_bm = false;

if has_dec && has_inc
    C_difference_percent = ...
        100 * abs(C_inc - C_dec) / C_dec;
    b_difference = abs(b_inc - b_dec);
    m_difference = abs(m_inc - m_dec);

    report_separate_C = C_difference_percent > 5;
    report_separate_bm = ...
        b_difference >= 0.1 || m_difference >= 0.1;

    C_mean = mean([C_dec, C_inc]);
    b_mean = mean([b_dec, b_inc]);
    m_mean = mean([m_dec, m_inc]);
    result_mode = "media_crescente_decrecente";
elseif has_dec
    C_mean = C_dec;
    b_mean = b_dec;
    m_mean = m_dec;
    result_mode = "solo_decrecente";
elseif has_inc
    C_mean = C_inc;
    b_mean = b_inc;
    m_mean = m_inc;
    result_mode = "solo_crescente";
else
    C_mean = NaN;
    b_mean = NaN;
    m_mean = NaN;
    result_mode = "nessun_risultato";
end

if combined_fit_available
    b_combined_fit = combined_fit.b;
    m_combined_fit = combined_fit.m;
    R2_combined_fit = combined_fit.R2;
else
    b_combined_fit = NaN;
    m_combined_fit = NaN;
    R2_combined_fit = NaN;
end

final_results = table( ...
    result_mode, ...
    C_dec, C_inc, C_mean, ...
    C_difference_percent, report_separate_C, ...
    b_dec, b_inc, b_mean, b_difference, ...
    m_dec, m_inc, m_mean, m_difference, ...
    report_separate_bm, ...
    b_combined_fit, m_combined_fit, R2_combined_fit, ...
    'VariableNames', { ...
        'result_mode', ...

```

```
    'C_decreasing_L_s_bar_ANR', ...  
    'C_increasing_L_s_bar_ANR', ...  
    'C_mean_L_s_bar_ANR', ...  
    'C_difference_percent', ...  
    'report_C_separately', ...  
    'b_decreasing', ...  
    'b_increasing', ...  
    'b_mean', ...  
    'b_difference', ...  
    'm_decreasing', ...  
    'm_increasing', ...  
    'm_mean', ...  
    'm_difference', ...  
    'report_b_m_separately', ...  
    'b_combined_fit', ...  
    'm_combined_fit', ...  
    'R2_combined_fit'}});  
end
```


Bibliografia

- [1] W. Ahmed e I. Ismail, «Innovative techniques for two-phase flow measurements,» *Recent Patents on Electrical Engineering*, vol. 1, pp. 1-13, 2010.
- [2] G. Morrison, D. Terracina, C. Brewer e K. Hall, «Response of a slotted orifice flow meter to an air/water mixture.,» *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 12, n. 3, pp. 175-180, 2001.
- [3] P. M. Azzoni, Strumenti e misure per l'ingegneria meccanica avvio alla comprensione delle moderne tecniche sperimentali, Ulrico Hoepli editore S.p.a., 2010.
- [4] S. C. Q. L. Y. L. C. Z. H. F. Bin Sun, «Review of sewage flow measuring instruments,» *Ain Shams Engineering Journal*, vol. Volume 12, n. 2, 2021.
- [5] Sincerity Group, «Sincerity Group | Coriolis flow meter manufacturers,» 22 09 2022. [Online]. Available: <https://www.bjssae.com/a-news-comparative-analysis-of-coriolis-mass-flowmeters-vs-traditional-flow-meters.html>. [Consultato il giorno 24 04 2026].
- [6] E. O. Doebelin, Strumenti e metodi di misura, McGraw-Hill, 2008.
- [7] T.-W. B., «Numerical Analysis of the Differential Flowmeter: Standard Orifice and Slotted Orifices.,» *Energies.*, 2023.
- [8] I. O. f. Standardization, Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full - Part 2: Orifice plates (ISO 5167-2:2022), 2022.
- [9] J. B. J. A. S. K. C. P. D. S. S. Manish S. Shah, «Analysis of flow through an orifice meter: CFD simulation,» *Chemical Engineering Science*, vol. 71, pp. 300-309, 2012.
- [10] R. C. Baker, Flow Measurement Handbook: Industrial Designs, Cambridge: Cambridge University Press, 2016.
- [11] B. Tomaszewska-Wach, «Numerical Analysis of the Differential Flowmeter: Standard Orifice and Slotted Orifices,» *Energies*, vol. 16, n. 14, 2023.

- [12] M. Reader-Harris, «ISO 5167: Past and Present,» in *Global Flow Measurement Workshop*, 2022.
- [13] B. R. H., *The Mechatronics Handbook*, CRC Press, 2002.
- [14] M. Carello, A. Ivanov e F. Pescarmona, «Flow rate test bench: Automated and compliant to ISO standards.,» *Experimental Techniques*, n. 37(2), pp. 41-49, 2013.
- [15] C. M. G. C. P. T. e. C. L. M. Henry, «Ask the Experts about Fluid Flow Metrology,» in *Webinar sponsorizzato dal UK Department for Science, Innovation and Technology*, 2024.
- [16] C. Lightbody, «TÜV SÜD National Engineering Laboratory,» 2024 11 6. [Online]. Available: <https://www.tuvsud.com/en-gb/resource-centre/blogs/uk/flow/traditional-flow-measurement-technologies-digital-world>. [Consultato il giorno 8 5 2026].
- [17] I. O. f. Standardization, *Pneumatic fluid power — Standard reference atmosphere*, Ginevra, 2003.
- [18] I. O. f. S. (ISO), *Pneumatic fluid power — Determination of flow-rate characteristics of components using compressible fluids — Part 1: General rules and test methods for steady-state flow*, Ginevra, 2013.
- [19] E. I. d. Normazione, *Flange e loro giunzioni - Flange circolari per tubazioni, valvole, raccordi e accessori, designate mediante PN - Parte 1: Flange di acciaio*, Milano, 2018.
- [20] G. S. Administration, *A-A-59326A – COUPLING HALVES, QUICK-DISCONNECT, CAM-LOCKING TYPE*, 2003.
- [21] Anastasia, «What is Modular Programming?,» Ersae Electronics, 20 03 2024. [Online]. Available: https://www.ersaelectronics.com/blog/what-is-modular-programming?srsltid=AfmBOoqZwApBbcdDFkwYiuikOCKqV3Ngx_jstfD2EJ9c8TH_s_6XOQlj. [Consultato il giorno 2026 05 11].
- [22] MATLAB, «Data Acquisition Toolbox,» The MathWorks, [Online]. Available: https://it.mathworks.com/help/daq/index.html?s_tid=CRUX_lftnav. [Consultato il giorno 2026 05 13].

- [23] National Instruments, «NI Product Documentation Center,» [Online]. Available: ni.com/manuals. [Consultato il giorno 13 05 2026].
- [24] MATLAB, «MATLAB Help Center,» The MathWorks, [Online]. Available: https://it.mathworks.com/help/matlab/ref/struct.html?s_tid=srchtitle_site_search_1_struct. [Consultato il giorno 2026 05 13].
- [25] MATLAB, «MATLAB Help Center,» 1994-2026 The MathWorks, Inc., [Online]. Available: https://it.mathworks.com/help/matlab/ref/matlab.io.datastore.read.html?s_tid=srchtitle_support_results_1_read. [Consultato il giorno 14 05 2026].
- [26] J. & H. J. Kelly, «A steady-state detection (SSD) algorithm to detect non-stationary drifts in processes.,» *Journal of Process Control*, vol. 23, 2013.
- [27] Z. a. A. A. a. C. P. a. B. C. M. Jalilibal, «Monitoring the Coefficient of Variation: A Literature Review,» *Computers & Industrial Engineering*, vol. 161, 2021.
- [28] M. J. R.-H. e. J. A. Sattary, «The orifice plate discharge coefficient equation — the equation for ISO 5167-1,» in *14th North Sea Flow Measurement Workshop*, Peebles, Scotland, 1996.
- [29] C. S. M. L. J. S. J.A. Brennan, «Choosing flow conditioners and their location for orifice flow measurement,» *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 2, n. 1, pp. 40-44, 1991.