

Dipartimento di Ingegneria industriale

Corso di Laurea in
INGEGNERIA AEROSPAZIALE

PROGETTAZIONE E CARATTERIZZAZIONE DI UNA PRE-CAMERA DI CALMA PER UNA GALLERIA DEL VENTO

Tesi di Laurea in
Fluidodinamica ING-IND/06

Relatore

Prof. Gabriele Bellani

Correlatore

Dott. Alex Ravaioli

Studente

Gianluca D'Agostino

Indice

Elenco delle figure	4
Elenco delle tabelle	5
Acronimi	6
Introduzione	8
1 Gallerie del vento	10
1.1 Tipologie	10
1.2 Parametri di similitudine	12
1.3 Qualità del flusso e dispositivi di riordino	13
1.4 Applicazioni non convenzionali	13
2 Dimensionamento	14
2.1 Specifiche di progetto e condizioni operative	14
2.2 Dimensionamento della pre-camera di calma	15
2.3 Calcolo delle perdite di carico	16
2.4 Analisi comparativa delle configurazioni	18
2.5 Considerazioni conclusive sul dimensionamento	19
3 Progettazione	20
3.1 Pre-camera di calma	20
3.2 Innesti	22
3.3 Diffusore e collegamento alla camera di calma	23
3.4 Assieme completo	26
3.5 Tavole quotate: assieme della galleria con pre-camera	27
3.6 Realizzazione, stampa 3D e montaggio	29
4 Misure e analisi sperimentali	31
4.1 Setup sperimentale	31
4.2 Trattamento del segnale e filtraggio	31
4.3 Elaborazione dati	35
4.3.1 Risultati spettrali e lettura fisica	36
4.3.2 Analisi degli spettri premoltiplicati	40
4.3.3 Analisi dimensionale	44
4.3.4 Confronto grafico tra galleria originale e galleria modificata	46
4.3.5 Implicazioni sperimentali	47

5 Conclusioni	48
A Codici MATLAB	50

Elenco delle figure

1.1	Schema funzionale: galleria a circuito aperto. [1]	10
1.2	Schema funzionale: galleria a circuito chiuso. [2]	11
1.3	Layout tipico di un Blower Tunnel. [3]	11
2.1	Galleria del vento originale.	15
3.1	Vista isometrica del modello CAD della pre-camera di calma.	20
3.2	Vista laterale della pre-camera di calma.	21
3.3	Coperchio superiore della pre-camera.	21
3.4	Vista superiore del coperchio con i fori di fissaggio.	22
3.5	Innesto per la configurazione ad aria compressa.	22
3.6	Innesto tra ventola e pre-camera nella configurazione <i>blower</i> .	23
3.7	Vista laterale dell'innesto conico per la configurazione <i>blower</i> .	23
3.8	Innesto al diffusore: collegamento tra la pre-camera e il diffusore.	24
3.9	Vista laterale dell'innesto al diffusore.	24
3.10	Diffusore per adattamento della sezione alla camera di calma.	25
3.11	Vista laterale del diffusore.	25
3.12	Assieme completo del sistema di ingresso della galleria del vento.	26
3.13	Vista laterale dell'assieme.	26
3.14	Vista laterale della galleria.	27
3.15	Vista frontale e posteriore della galleria.	28
3.16	Vista superiore della galleria.	28
3.17	Preparazione dello slicing dei moduli su IdeaMaker.	29
3.18	Componenti stampati in 3D: innesti e diffusore.	30
3.19	Pre-camera di calma stampata in 3D.	30
4.1	Apparato sperimentale utilizzato per le misure anemometriche sulla pre-camera.	32
4.2	Schema: setup sperimentale pre-camera.	32
4.3	Apparato sperimentale utilizzato per le misure anemometriche sulla galleria modificata.	33
4.4	Schema: setup sperimentale galleria modificata.	33
4.5	Schema: setup sperimentale galleria originale.	34
4.6	Confronto spettrale adimensionale delle configurazioni della pre-camera a diverse velocità (Re_1 – Re_4).	37
4.7	Confronto spettrale adimensionale tra gallerie a parità di velocità: originale, modificata, modificata con rete.	38

4.8	Analisi adimensionalizzata delle configurazioni di pre-camera, a diverse velocità.	39
4.9	Analisi adimensionalizzata delle gallerie, a diverse velocità.	40
4.10	Spettri premoltiplicati: configurazioni della pre-camera a diverse velocità.	42
4.11	Spettri premoltiplicati: configurazioni della galleria a diverse velocità.	43
4.12	Analisi dimensionale: gallerie a diverse velocità.	45
4.13	Rapporto tra galleria modificata e galleria originale.	46
4.14	Rapporto tra galleria modificata e galleria originale (basse e alte frequenze)	46

Elenco delle tabelle

2.1	Confronto tra configurazione originale e modificata.	18
2.2	Contributi percentuali dei moduli alle perdite totali.	19
4.1	Confronto dell'intensità di turbolenza per le configurazioni di pre- camera.	36
4.2	Confronto dell'intensità di turbolenza per le configurazioni di galleria.	36

Acronimi

L	Lunghezza [m]
W	Larghezza [m]
H	Altezza [m]
D	Diametro [m]
M	Numero di maglia [m]
t	Spessore [m]
Q	Portata volumetrica [$\frac{m^3}{s}$]
ρ	densità [$\frac{kg}{m^3}$]
μ	viscosità dinamica [$Pa * s$]
A	Area di sezione [m^2]
U	Velocità [$\frac{m}{s}$]
K	Coefficiente di perdita di carico concentrata
Δp	Caduta di pressione [Pa]
f	Coefficiente di attrito / frequenza
Re	Numero di Reynolds
P	Potenza [W]
σ_u	Deviazione standard
TI	Intensità di turbolenza
St	Numero di Strouhal

Introduzione

Le gallerie del vento costituiscono uno strumento sperimentale fondamentale nello studio dei fenomeni fluidodinamici. Tradizionalmente impiegate in ambito aeronautico per la caratterizzazione delle prestazioni aerodinamiche di velivoli e profili alari, negli ultimi anni hanno trovato applicazioni sempre più diversificate, tra cui il settore biomedicale. In particolare, la possibilità di riprodurre condizioni di flusso controllate consente di investigare i meccanismi di trasporto e diffusione dei fluidi all'interno delle vie respiratorie, con ricadute rilevanti nello sviluppo di terapie farmacologiche.

Il presente lavoro di tesi si colloca nel contesto della collaborazione tra il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Bologna e Chiesi Farmaceutici S.p.A., e nasce con l'obiettivo di ottimizzare una galleria del vento destinata all'alimentazione di un modello tridimensionale delle vie respiratorie profonde (cast polmonare). Tale dispositivo sperimentale è impiegato per lo studio dei fenomeni fluidodinamici all'interno delle vie respiratorie, ambito di particolare interesse per la ricerca e lo sviluppo di terapie inalatorie. Per assicurare la ripetibilità e l'affidabilità delle misure, il sistema richiede un flusso d'aria regolare, stabile e ben caratterizzato.

La galleria oggetto di studio era già stata precedentemente dimensionata e realizzata per tale scopo generale; tuttavia, presentava alcuni margini di miglioramento legati alla stabilità e uniformità del flusso nella sezione di prova. Tra le criticità, in particolare si aveva la difficoltà di regolare con precisione la portata alle basse velocità, a causa dell'instabilità del comportamento della ventola centrifuga a basse tensioni, e la presenza di vibrazioni e fluttuazioni del flusso a causa del fan stesso. Il presente lavoro si propone quindi di ottimizzare la configurazione esistente, introducendo modifiche mirate a migliorare la qualità del flusso e la modularità del sistema.

In una fase iniziale è stata considerata la possibilità di sostituire l'attuale alimentazione a ventilatore con un sistema pneumatico basato su aria compressa, accoppiato a una pre-camera di calma, analogamente a quanto avviene nelle gallerie supersoniche e in alcuni dispositivi pneumatici biomedicali. Tuttavia, il lavoro si è concentrato su una fase preliminare di analisi e progettazione, volta a verificare gli effetti dell'introduzione di una pre-camera di calma all'interno della galleria esistente, mantenendo la ventola come sorgente di alimentazione.

L'obiettivo principale è stato quindi quello di valutare la fattibilità e i benefici di tale modifica, osservando se la pre-camera potesse contribuire a rendere il flusso più stabile e uniforme, riducendo le fluttuazioni di pressione e le componenti

turbolente generate dal ventilatore. In questo senso, la pre-camera rappresenta un elemento chiave anche in vista di una futura possibile adozione di un sistema ad aria compressa, poiché svolge un ruolo cruciale nel dissipare le turbolenze residue e nel garantire un profilo di velocità più regolare a valle.

Il lavoro di tesi ha compreso:

- lo sviluppo di un modello di calcolo delle perdite di carico nei vari moduli della galleria, implementato in ambiente Matlab;
- la progettazione CAD dettagliata della pre-camera di calma, con criteri di uniformità del flusso e modularità costruttiva;
- un confronto tra la configurazione originale e quella modificata, in termini di efficienza, stabilità e qualità del flusso in uscita.

In questo senso, il presente lavoro rappresenta un primo passo verso la valutazione della fattibilità tecnica di un sistema pneumatico a bassa velocità, analizzandone gli effetti preliminari attraverso la progettazione e lo studio fluidodinamico della pre-camera di calma. L'elaborato si articola a partire da un inquadramento teorico e bibliografico, per poi presentare le attività di analisi e progettazione svolte, fino alla discussione critica dei risultati e alle prospettive di sviluppo futuro.

Capitolo 1

Gallerie del vento

Le gallerie del vento a bassa velocità rappresentano, da oltre un secolo, uno strumento imprescindibile per lo studio sperimentale dei fenomeni aerodinamici. Le prime strutture di questo tipo risalgono alla fine del XIX secolo, quando pionieri come Gustave Eiffel e Ludwig Prandtl iniziarono a impiegare condotti di prova per comprendere e misurare le forze aerodinamiche su modelli in scala. Con il tempo, l'evoluzione della strumentazione di misura e la maggiore comprensione dei fenomeni turbolenti hanno reso le gallerie del vento strumenti sempre più precisi e versatili.

Nonostante i notevoli progressi della fluidodinamica computazionale (CFD), la sperimentazione in galleria rimane tutt'oggi indispensabile. La complessità dei flussi turbolenti, le incertezze legate ai modelli di turbolenza e la difficoltà nel riprodurre con esattezza le condizioni al contorno reali rendono infatti necessario il confronto con dati sperimentali. Le prove in galleria consentono di validare i modelli numerici, calibrare i codici di calcolo e acquisire una comprensione diretta dei fenomeni che si manifestano intorno ai corpi immersi nel flusso.

1.1 Tipologie

Le gallerie del vento si classificano principalmente in due categorie: a circuito aperto (*open circuit*) e a circuito chiuso (*closed circuit*).

Nelle gallerie a circuito aperto, l'aria viene aspirata o spinta attraverso il condotto di prova e successivamente scaricata all'esterno. Si tratta di strutture più semplici e meno costose, spesso impiegate per studi su modelli di piccole dimensioni o per scopi didattici. Tuttavia, questa configurazione risente fortemente delle condizioni ambientali, è più rumorosa e presenta minore efficienza energetica.

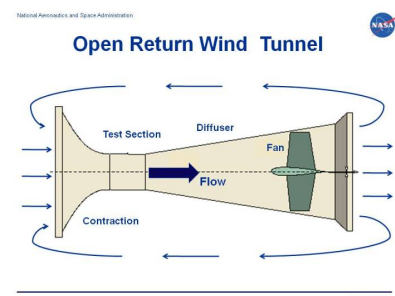


Figura 1.1: Schema funzionale: galleria a circuito aperto. [1]

Le gallerie a circuito chiuso, invece, ricircolano la massa d'aria in un anello chiuso, permettendo di ridurre le perdite di energia e di mantenere costanti le condizioni termiche e ambientali. Questa tipologia, adottata nei grandi centri di ricerca e nei laboratori industriali, garantisce un migliore controllo della qualità del flusso e una significativa riduzione del rumore, a fronte di una maggiore complessità e costo costruttivo.

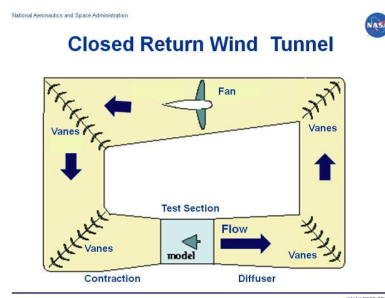


Figura 1.2: Schema funzionale: galleria a circuito chiuso. [2]

All'interno di entrambe le categorie si distinguono due ulteriori configurazioni, determinate dalla posizione del gruppo motore: blower type e suction type.

Nelle gallerie blower, il ventilatore è collocato a monte della test section, e spinge l'aria attraverso la camera di prova. Questa disposizione semplifica la costruzione e riduce il rischio di accumulo di contaminanti nel ventilatore, ma presenta alcuni svantaggi: le non uniformità e le turbolenze generate dalle pale del fan si propagano a valle, rendendo necessario l'uso di una camera di calma ben dimensionata e di dispositivi di riordino efficaci per garantire un flusso uniforme. Inoltre, la regolazione della portata alle basse velocità può risultare instabile a causa del comportamento non lineare del motore elettrico alle basse tensioni di alimentazione.

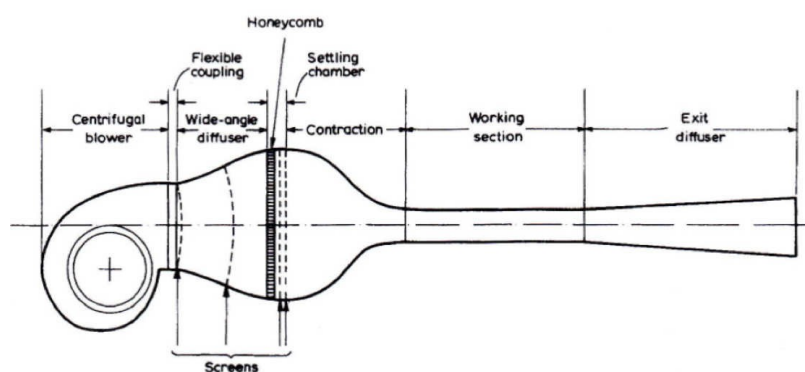


Figura 1.3: Layout tipico di un Blower Tunnel. [3]

Nelle gallerie suction, invece, il ventilatore è posto a valle della test section, e aspira l'aria attraverso di essa. In questo modo, il flusso che investe il modello risulta generalmente più pulito e stabile, poiché il ventilatore si trova dopo la zona di misura e non ne influenza direttamente le condizioni di ingresso. Tuttavia, questa configurazione comporta svantaggi in termini di sicurezza (depressioni elevate nella camera di prova), maggiore rumorosità e potenziale contaminazione del ventilatore nel caso di test con particelle o aerosol.

La scelta tra configurazione blower e suction dipende dal tipo di applicazione

e dalle condizioni operative desiderate. Le gallerie blower open-circuit, come quella oggetto del presente studio, offrono un buon compromesso tra semplicità, costo e flessibilità, risultando particolarmente adatte alle applicazioni a bassa velocità e ai contesti sperimentali biomedicali, dove è richiesta la possibilità di intervenire facilmente sulla sorgente di alimentazione e sulla composizione del flusso.

In entrambe le configurazioni, la *test-section* (o sezione di prova) può essere del tipo a getto libero (*open jet*, o Eiffel) oppure a getto confinato (*closed jet*, o NPL). Le gallerie a getto libero offrono maggiore versatilità geometrica e minori effetti di parete, ma introducono distorsioni dovute alla diffusione del getto e al richiamo d'aria dai bordi liberi. Quelle a getto confinato, al contrario, assicurano condizioni di prova più stabili e ripetibili, ma possono generare effetti di blocco e interferenza con le pareti della sezione di prova.

Una galleria del vento tipica, indipendentemente dalla configurazione, è composta da una serie di moduli funzionali: ventilatore o sistema di alimentazione, diffusore, camera di calma, convergente, sezione di prova e, nel caso di circuito chiuso, una serie di condotti di ritorno. L'interazione tra questi componenti definisce la qualità del flusso e l'efficienza complessiva del sistema. [4]

1.2 Parametri di similitudine

Perché i risultati di un test in galleria siano rappresentativi del comportamento reale, è necessario rispettare i criteri di similitudine fluidodinamica. Ciò implica che il modello e il sistema reale abbiano la stessa relazione tra le forze dominanti, una volta ridotti in forma adimensionale.

La similitudine geometrica si ottiene mantenendo invariati i rapporti tra le dimensioni caratteristiche del modello e dell'oggetto reale. La similitudine dinamica, invece, richiede che i principali numeri adimensionali—che esprimono i rapporti tra le forze in gioco—siano uguali nei due casi.

Tra questi, i più importanti sono:

- **Numero di Reynolds**, che rappresenta il rapporto tra forze inerziali e viscosi e determina il regime del flusso (laminare o turbolento).
- **Numero di Mach**, che misura l'importanza degli effetti di comprimibilità e diventa significativo per velocità superiori a circa 0,3 volte quella del suono.
- **Numero di Froude**, rilevante in presenza di forze gravitazionali o di superficie libera.

Nelle gallerie del vento a bassa velocità, come quella considerata nel presente studio, gli effetti di comprimibilità sono trascurabili, mentre la dinamica del flusso è dominata dal numero di Reynolds. Ciò significa che l'accuratezza dei risultati dipende principalmente dal corretto mantenimento di questo parametro, che condiziona la transizione laminare-turbolenta e la distribuzione delle perdite viscosi. [4]

1.3 Qualità del flusso e dispositivi di riordino

La qualità del flusso nella sezione di prova è un fattore determinante per la validità e la ripetibilità delle misure sperimentali. Essa è valutata principalmente in termini di uniformità del campo di velocità e di intensità turbolenta residua.

Dopo l'azione del ventilatore o del diffusore, il flusso risulta generalmente irregolare, con componenti turbolente trasversali e gradienti di velocità indesiderati. Per ridurre tali effetti vengono introdotti diversi dispositivi di riordino, posizionati all'interno della camera di calma.

Il primo elemento è l'*honeycomb*, una struttura alveolare formata da celle di piccola lunghezza e sezione esagonale o circolare, che allinea le linee di corrente riducendo le componenti laterali della velocità. A valle dell'*honeycomb* vengono installate una o più reti metalliche, che agiscono dissipando parte dell'energia turbolenta residua e migliorando l'uniformità del profilo di velocità.

Infine, il convergente (o *convergent nozzle*) accelera il flusso riducendo ulteriormente l'intensità turbolenta, grazie al principio di conservazione della portata e alla progressiva riduzione della sezione. Il rapporto di contrazione, tipicamente compreso tra 4:1 e 9:1 nelle gallerie a bassa velocità, rappresenta un parametro critico di progetto, poiché influenza direttamente la qualità del flusso e le perdite di carico complessive. [4]

1.4 Applicazioni non convenzionali

Negli ultimi decenni, l'impiego delle gallerie del vento si è esteso ben oltre il settore aeronautico. In architettura e ingegneria civile esse vengono utilizzate per studiare gli effetti del vento su edifici alti, ponti sospesi e strutture leggere, consentendo di prevedere le vibrazioni e le sollecitazioni indotte dalle raffiche. In automobilistica, le gallerie a bassa velocità sono impiegate per l'ottimizzazione aerodinamica dei veicoli e la riduzione della resistenza al moto. [4]

Un ambito di applicazione più recente e in rapida crescita è quello biomedico, dove le gallerie del vento vengono utilizzate per analizzare i fenomeni di trasporto e diffusione di aerosol e particelle all'interno delle vie respiratorie. La possibilità di riprodurre condizioni di flusso controllate e ripetibili permette di studiare la deposizione di farmaci inalatori o l'efficienza di dispositivi medici come gli inalatori e i nebulizzatori.

In questo contesto, la qualità del flusso assume un'importanza ancora maggiore: anche piccole variazioni di velocità o turbolenza possono modificare significativamente la traiettoria e la distribuzione delle particelle. Ciò rende di grande interesse l'esplorazione di soluzioni alternative rispetto alla tradizionale alimentazione a ventilatore, come l'impiego di aria compressa accoppiata a una camera di calma, in grado di garantire una maggiore stabilità e controllabilità del flusso.

Capitolo 2

Dimensionamento

2.1 Specifiche di progetto e condizioni operative

Il punto di partenza del lavoro è rappresentato dalla galleria del vento preesistente, già funzionante e dimensionata per generare un flusso adatto all'applicazione richiesta. (fig. 2.1)

La portata richiesta per l'alimentazione del modello polmonare è pari a 360 L/min, corrispondenti a una velocità media di circa 2.1 m/s nella sezione di prova di diametro 60 mm. Questa condizione rappresenta il punto di riferimento per la valutazione delle perdite e per il confronto tra la configurazione originale e quella modificata.

La galleria originale era composta dai seguenti moduli principali:

- **Innesto divergente:** lunghezza $L_i = 100$ mm, sezione di ingresso rettangolare 58×33 mm, sezione di uscita circolare di diametro $D_{o,i} = 70$ mm;
- **Diffusore:** diametro di ingresso $D_{i,d} = 70$ mm, diametro di uscita $D_{o,d} = 120$ mm, lunghezza $L_d = 200$ mm;
- **Camera di calma:** diametro $D_c = 120$ mm, lunghezza $L_c = 200$ mm;
- **Honeycomb:** numero di maglia $M = 6$ mm, spessore delle pareti $t = 0.8$ mm, lunghezza $L_h = 36$ mm;
- **Convergente:** diametro di ingresso $D_{i,cv} = 120$ mm, diametro di uscita $D_{o,cv} = 16.77$ mm, lunghezza $L_{cv} = 150$ mm;
- **Ugello terminale:** diametro $D_u = 16.77$ mm, lunghezza $L_u = 15.16$ mm.

Il sistema, sebbene funzionante e coerente con le esigenze di base, mostrava una certa variabilità del flusso nella zona a valle del ventilatore, dovuta alle turbolenze generate dalle pale e alla mancanza di un volume di smorzamento efficace prima della camera di calma.

Per questo motivo, la modifica progettuale proposta consiste nell'introduzione di una pre-camera [5] di calma posta tra il ventilatore e la camera di calma esistente, con lo scopo di:

- stabilizzare il campo di pressione a monte;
- ridurre la componente turbolenta longitudinale;
- migliorare l'uniformità del flusso in ingresso al sistema di riordino (honeycomb e reti).

Lo scopo del dimensionamento non è la definizione di una pressione di alimentazione precisa, che potrà essere regolata in futuro mediante un apposito regolatore di pressione nel prototipo, ma piuttosto la valutazione quantitativa delle perdite di carico introdotte dai vari moduli e la stima della pressione minima necessaria per garantire le condizioni di flusso desiderate.

La fase di dimensionamento e confronto consentirà quindi di individuare i vantaggi e le eventuali criticità legate all'inserimento della pre-camera, fornendo una base tecnica per le successive ottimizzazioni sperimentali.

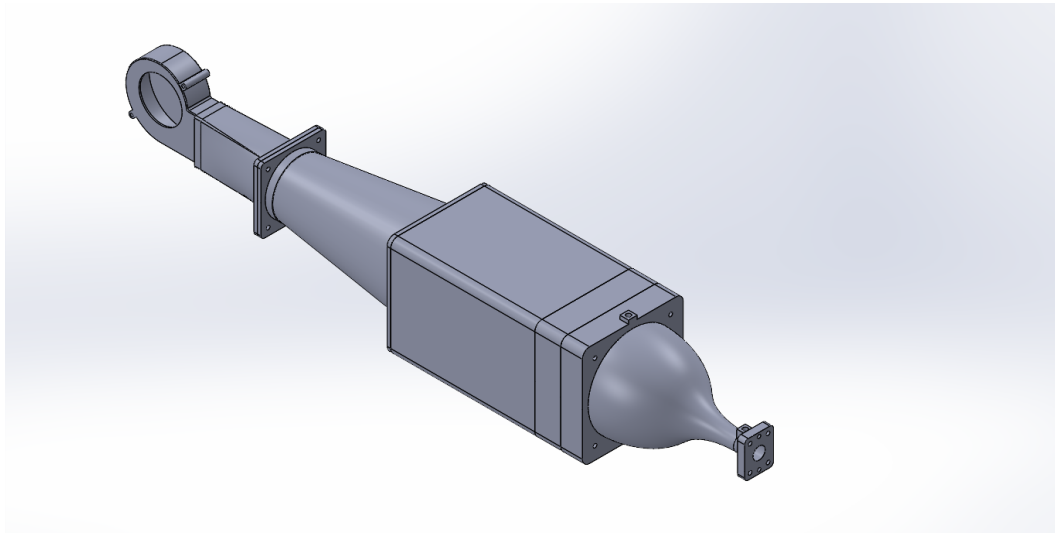


Figura 2.1: Galleria del vento originale.

2.2 Dimensionamento della pre-camera di calma

Il dimensionamento è stato guidato principalmente da vincoli di *compattezza* e *fabbricabilità*, più che da ottimizzazioni fluidodinamiche fini, con le seguenti linee guida pratiche:

1. ingombro compatibile con lo spazio di lavoro e con il banco prova;
2. pezzo stampabile in un'unica fase di stampa 3D, per evitare giunzioni, perdite e disallineamenti (limite sul volume utile della stampante);
3. passaggi fluidici e flange standardizzate per l'accoppiamento ai moduli esistenti.

La pre-camera opera come plenum: un'espansione da condotto a volume ampio in cui il getto si *rilassa* prima di incontrare i dispositivi di riordino. In tale transizione, la letteratura [6] [7] adotta tipicamente una perdita concentrata dell'ordine

$$K_{\text{plenum}} \simeq 1,$$

sufficiente a modellare il salto di pressione associato all'espansione a getto libero. La perdita distribuita interna, a causa delle basse velocità medie nel plenum, è di entità secondaria ma viene comunque considerata ai fini di completezza nel capitolo delle perdite.

Per semplificare l'integrazione con la galleria esistente e minimizzare le perdite parassite:

- l'ingresso è raccordato tramite un innesto rettangolare/quadrato stampato solidale con la scatola, con raccordi interni a raggio ≥ 5 mm per ridurre separazioni locali;
- l'uscita verso la camera di calma è flangiata, con sede per guarnizione piana e centraggio meccanico;
- spessori nominali delle pareti compresi tra 4 e 6 mm per garantire rigidità, tolleranze di stampa e filettature/inserti prigionieri se necessari;
- predisposizione di fori ciechi per sensori di pressione/temperatura a parete (opzionali) con tappi filettati.

La perdita distribuita interna è modellata, nel paragrafo che segue, come condotto equivalente a sezione rettangolare $W \times H$ e lunghezza L , con diametro idraulico $D_h = 4WH/(2(W + H))$ e coefficiente d'attrito $f(Re)$ calcolato in funzione del regime:

$$\Delta p_{\text{dist}} = f \frac{L}{D_h} \frac{\rho U^2}{2}, \quad U = \frac{Q}{WH}.$$

Data l'ampia sezione del plenum, U risulta piccolo e il contributo distribuito è atteso modesto rispetto alla perdita concentrata; la sua inclusione ha finalità di completezza e di tracciabilità del budget di pressione.

2.3 Calcolo delle perdite di carico

Il calcolo delle perdite di carico è stato condotto con l'obiettivo di stimare la distribuzione delle pressioni lungo i vari moduli della galleria e di valutare l'impatto dell'introduzione della pre-camera di calma sulla perdita totale del sistema. A tale scopo è stato sviluppato uno *script* in ambiente **Matlab**, che implementa le formulazioni classiche della meccanica dei fluidi per le perdite distribuite e localizzate.

Le perdite distribuite sono state calcolate mediante l'equazione di Darcy-Weisbach [8]:

$$\Delta p_d = f \frac{L}{D_h} \frac{\rho V^2}{2} \tag{2.1}$$

dove:

- f è il coefficiente d'attrito, stimato mediante la correlazione di Blasius per flussi turbolenti in condotti lisci:

$$f = 0.3164 Re^{-0.25}$$

- L è la lunghezza del tratto considerato;
- D_h è il diametro idraulico;
- ρ è la densità del fluido;
- V è la velocità media del flusso.

Le perdite localizzate sono state invece modellate attraverso i coefficienti empirici K_i , secondo la relazione:

$$\Delta p_l = K_i \frac{\rho V^2}{2} \quad (2.2)$$

dove ciascun coefficiente K_i rappresenta la perdita dovuta a variazioni di sezione, curve, griglie o transizioni geometriche presenti nel circuito. I valori adottati derivano da correlazioni consolidate in letteratura [4] e sono stati adattati alle caratteristiche specifiche dei moduli della galleria.

La perdita di carico totale del sistema si ottiene quindi come somma di tutte le perdite distribuite e localizzate:

$$\Delta p_{tot} = \sum \Delta p_d + \sum \Delta p_l \quad (2.3)$$

L'analisi numerica è stata condotta per le due configurazioni:

1. galleria originale, con alimentazione a ventilatore e collegamento diretto alla camera di calma;
2. galleria modificata, con l'inserimento della pre-camera di calma a monte della camera di calma esistente + gli altri moduli modificati per la nuova configurazione.

Il confronto tra le due configurazioni ha permesso di stimare il contributo aggiuntivo in termini di perdita di carico introdotto dalla nuova sezione e di valutarne l'efficacia nel migliorare la qualità del flusso. Sebbene le perdite aggiuntive comportino un incremento della pressione necessaria a monte, esse risultano accettabili rispetto ai benefici attesi in termini di stabilità e uniformità del flusso.

Infine, le informazioni ricavate dal modello hanno consentito di ottenere un ordine di grandezza della pressione minima richiesta all'alimentazione, utile per la regolazione del sistema nel prototipo finale. Poiché il banco sarà dotato di un regolatore di pressione, tale valore dovrà essere considerato indicativo, in attesa della validazione sperimentale.

I codici Matlab sono in appendice A: A.1, A.2.

2.4 Analisi comparativa delle configurazioni

In questa sezione si confrontano i risultati analitici ottenuti per le due configurazioni della galleria del vento: la versione originale e quella modificata, dotata di pre-camera di calma e di nuovi innesti.

La Tabella 2.1 riassume i principali indicatori fluidodinamici calcolati tramite gli script Matlab.

	K_{tot}	Δp [Pa]	P_d [W]
Configurazione originale	1.0446	475.9	2.86
Configurazione modificata	1.0721	488.4	2.93

Tabella 2.1: Confronto tra configurazione originale e modificata.

L'introduzione della pre-camera di calma e dei nuovi innesti non ha modificato in modo significativo il comportamento fluidodinamico complessivo della galleria. Il coefficiente di perdita totale aumenta soltanto del 2.6% rispetto alla configurazione originale, con un incremento di caduta di pressione di circa 12.5 Pa e una potenza fluidodinamica richiesta superiore di appena 0.07 W. Si tratta di variazioni minime, che rientrano nell'incertezza delle stime e confermano l'efficacia del nuovo assetto dal punto di vista energetico.

Questo risultato evidenzia che la pre-camera di calma è stata progettata con una geometria tale da non introdurre perdite apprezzabili, pur garantendo una migliore regolarizzazione del flusso e una maggiore uniformità a valle. L'ottimo bilanciamento tra compattezza, efficienza e funzionalità fluidodinamica indica che l'integrazione del nuovo modulo ha preservato quasi integralmente il rendimento globale della galleria, offrendo in cambio una qualità di flusso superiore e condizioni più favorevoli per le misure sperimentali.

La Tabella 2.2 mostra la distribuzione dei coefficienti di perdita K_i e le percentuali relative per ciascun modulo. Nella configurazione originale, il contributo dominante resta quello dello sbocco in ambiente, responsabile di circa il 96% delle perdite totali. Tutti gli altri componenti incidono per pochi punti percentuali. Nel sistema modificato, l'aggiunta della pre-camera e degli innesti non altera in modo significativo tale quadro: le nuove perdite introdotte sono inferiori all'1% del totale e possono essere considerate trascurabili rispetto ai benefici fluidodinamici ottenuti. Questo risultato evidenzia come la pre-camera, pur introducendo un volume aggiuntivo nel circuito, sia stata progettata in modo efficiente dal punto di vista energetico, mantenendo un comportamento idraulico assimilabile a quello di un'espansione ben raccordata.

Il lieve aumento complessivo di K_{tot} è imputabile soprattutto all'adattamento geometrico e ai raccordi tra i moduli, che rappresentano il prezzo necessario per integrare nuovi componenti in un sistema compatto. Nel complesso, la configurazione modificata conserva un'elevata efficienza fluidodinamica, con una distribuzione delle perdite bilanciata e priva di punti critici.

Modulo	Originale [%]	Modificata [%]
Sbocco in ambiente	95.7	93.3
Pre-camera di calma	–	0.005
Tratto post-convergente	2.00	4.5
Ugello	2.00	1.95
Innesto ventola → pre-camera	–	0.14
Innesto (orig.) ventola → diffusore	0.15	–
Diffusore	0.03	0.015
Convergente	0.03	0.026
Honeycomb	0.06	0.059
Camera di calma	0.002	0.003
Altri tratti costanti	≈ 0	≈ 0

Tabella 2.2: Contributi percentuali dei moduli alle perdite totali.

2.5 Considerazioni conclusive sul dimensionamento

Il confronto tra le due configurazioni mostra che l'introduzione della pre-camera di calma ha comportato un incremento trascurabile del coefficiente di perdita totale, passato da $K_{\text{tot}} = 1.04$ a $K_{\text{tot}} = 1.07$, a parità di portata (360 L/min) e numero di Reynolds allo sbocco (3.1×10^4). La corrispondente caduta di pressione cresce di soli 12 Pa circa, mentre la potenza fluidodinamica richiesta aumenta di meno di 0.1 W. Si tratta di differenze minime, che confermano come la modifica non alteri in modo significativo le prestazioni energetiche della galleria.

Dal punto di vista progettuale, la pre-camera di calma si è rivelata un componente ben dimensionato e bilanciato: la geometria adottata, studiata per rispettare vincoli di spazio e stampa 3D, consente di migliorare la qualità del flusso a valle senza introdurre penalizzazioni apprezzabili in termini di perdite di carico. L'incidenza energetica complessiva del nuovo modulo è inferiore al 3%, un risultato che ne attesta l'efficienza e la corretta integrazione nel sistema.

Le piccole variazioni riscontrate nel coefficiente di perdita totale sono principalmente riconducibili ai raccordi e ai tratti post-convergenti, dove l'adattamento geometrico ha introdotto espansioni e contrazioni locali. Queste zone rappresentano le uniche aree in cui eventuali ottimizzazioni future — ad esempio mediante raccordi a profilo più dolce o analisi CFD dedicate — potrebbero produrre ulteriori benefici.

Nel complesso, la configurazione modificata si dimostra un'evoluzione efficace e a basso impatto della galleria del vento. L'intervento ha mantenuto pressoché invariata l'efficienza fluidodinamica globale, offrendo al contempo un flusso più regolare e controllato nella camera di prova. Il progetto della pre-camera costituisce quindi un passo avanti concreto verso una maggiore stabilità del sistema, fornendo una base solida per successive fasi di sperimentazione e per l'eventuale impiego della galleria con alimentazione pneumatica a portata variabile.

Capitolo 3

Progettazione

La fase di progettazione è stata realizzata interamente mediante il software SolidWorks, mentre la produzione dei pezzi è avvenuta tramite stampa 3D, utilizzando il programma di slicing IdeaMaker e materiale PLA. In questo capitolo inizialmente si descrivono le scelte di disegno e di concezione dei componenti, successivamente si illustrano le fasi di stampa e montaggio.

3.1 Pre-camera di calma

Il primo elemento progettato è stato la pre-camera di calma, dal cui dimensionamento — discusso nel capitolo precedente — sono poi derivate le geometrie e gli accoppiamenti degli altri moduli della galleria. Si è già detto che lo scopo principale della pre-camera è quello di fungere da plenum, ossia una camera di espansione per la stabilizzazione del flusso d'aria in ingresso al diffusore. Per questo motivo le bocche di ingresso e di uscita sono state realizzate in piano, così da ridurre gli ingombri complessivi, ma dislocate per garantire una migliore uniformità di distribuzione del flusso.

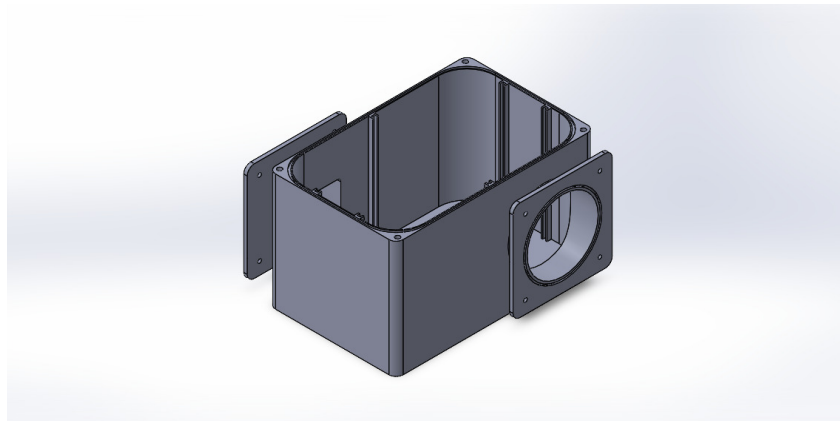


Figura 3.1: Vista isometrica del modello CAD della pre-camera di calma.

Come per tutti i moduli della galleria, anche il corpo della pre-camera è stato concepito in modo modulare e flangiato, così da permettere la sostituzione o la

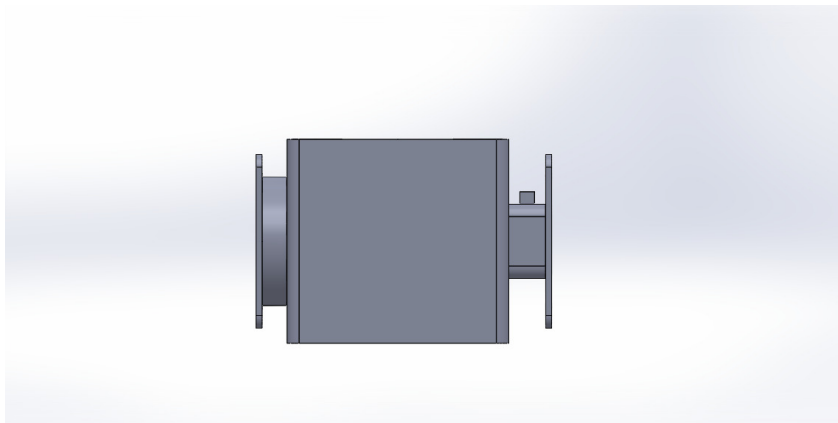


Figura 3.2: Vista laterale della pre-camera di calma.

riconfigurazione dei pezzi a seconda dell'applicazione. All'interno del volume principale sono state inserite delle guide longitudinali, pensate per l'alloggiamento di raddrizzatori di flusso (reti o honeycomb), in previsione delle osservazioni sperimentali da eseguire successivamente. Per permettere l'inserimento e la sostituzione di tali elementi, la pre-camera non è stata progettata come un corpo chiuso, ma dotata di un coperchio removibile fissato mediante viti.

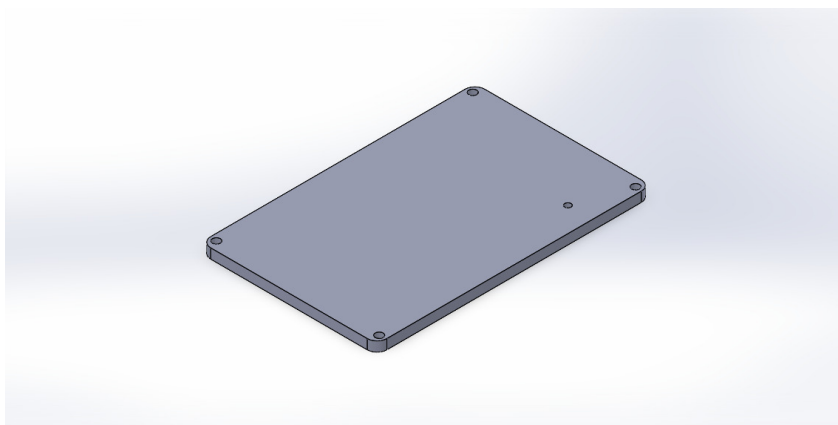


Figura 3.3: Coperchio superiore della pre-camera.

Sulle bocche di ingresso e di uscita, nonché sulla testa della pre-camera, sono state disegnate delle scanalature nel materiale per l'inserimento di guarnizioni in gomma, al fine di migliorare l'ermeticità dell'assemblaggio e prevenire perdite d'aria in fase di montaggio.

Un'ulteriore accortezza riguarda la predisposizione di porte di misura. Sono state previste due aperture: una all'ingresso e una sul coperchio, per consentire l'inserimento di sonde o anemometri destinati alla misura di velocità, pressione o temperatura. Tale accorgimento permetterà in futuro di eseguire test anche in configurazione con aria compressa, mantenendo la compatibilità con la strumentazione di laboratorio.

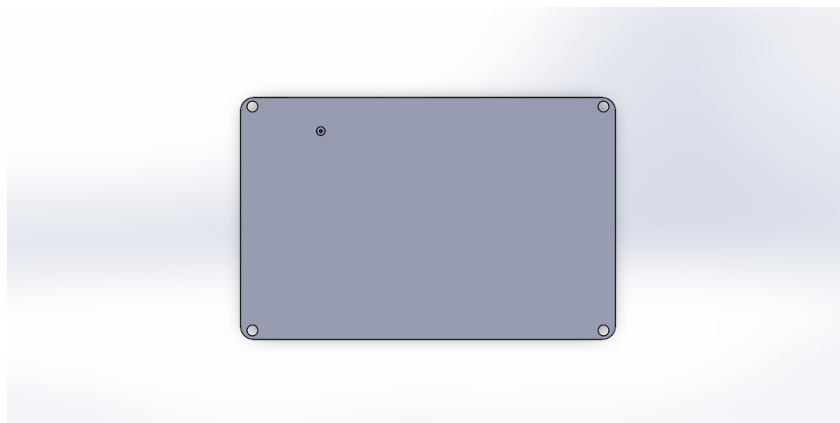


Figura 3.4: Vista superiore del coperchio con i fori di fissaggio.

Infine, grande attenzione è stata riservata all'economia di spazio e di materiale. Gli spessori sono stati ridotti al minimo compatibile con la resistenza meccanica e la rigidità necessaria, mentre gli spigoli interni sono stati smussati per evitare discontinuità nel flusso e ridurre la formazione di zone di ricircolo. La geometria finale rappresenta un compromesso tra stabilità fluidodinamica, compattezza, semplicità di stampa e rapidità di assemblaggio, mantenendo al contempo un consumo di materiale contenuto e tempi di produzione ottimizzati.

3.2 Innesti

Una parte fondamentale della progettazione ha riguardato la realizzazione degli innesti, ossia i componenti di connessione tra la pre-camera e gli elementi esterni di alimentazione del flusso. In particolare, sono state previste due configurazioni principali: una per l'alimentazione mediante aria compressa e una per la configurazione *blower*, cioè con ventilatore centrifugo.

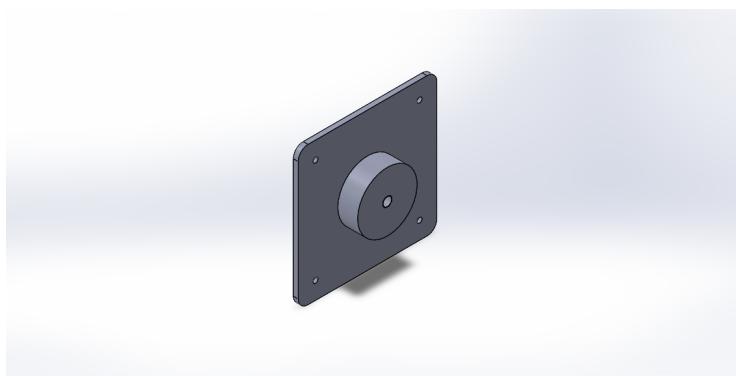


Figura 3.5: Innesto per la configurazione ad aria compressa.

Il primo elemento sviluppato è stato l'innesto per la configurazione ad aria compressa. Come visibile in figura, la bocca di ingresso è progettata per ospitare tubi standard per aria compressa con diametro esterno pari a 8 mm. L'interfaccia è

stata pensata per garantire un collegamento rapido e sicuro con i raccordi pneumatici commerciali, assicurando al contempo un flusso centrato e simmetrico all'ingresso della pre-camera.

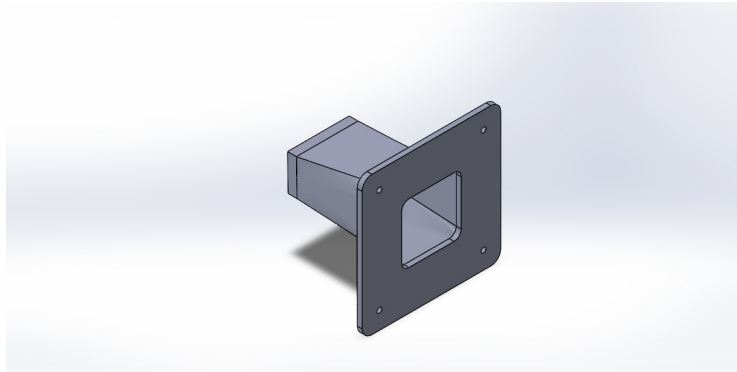


Figura 3.6: Innesto tra ventola e pre-camera nella configurazione *blower*.

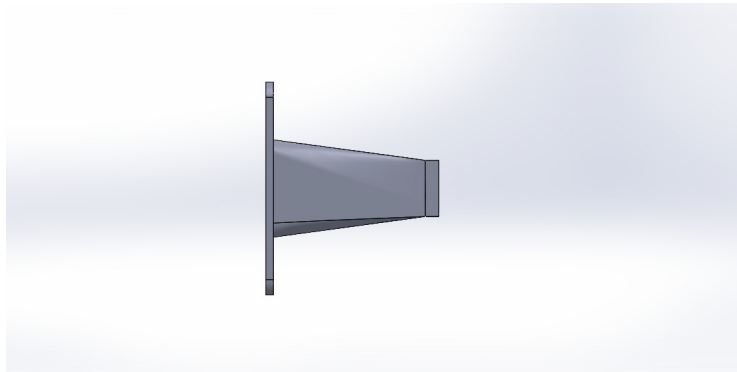


Figura 3.7: Vista laterale dell'innesto conico per la configurazione *blower*.

Successivamente è stato disegnato e realizzato l'innesto per la connessione tra la pre-camera e la ventola, destinato alla configurazione *blower*. Questo componente ha una forma divergente con angolo conico di circa 7° , valore scelto per garantire l'assenza di distacchi di vena e un'espansione del flusso regolare.

3.3 Diffusore e collegamento alla camera di calma

Il collegamento tra la pre-camera di calma e il resto della galleria del vento è stato realizzato mediante un sistema modulare composto da due elementi principali: un *innesto al diffusore*, di forma cilindrica, e un *diffusore conico* che adatta la sezione al diametro della camera di calma.

L'innesto al diffusore è un condotto a sezione circolare, lungo 50 mm, progettato per unire in modo compatto la pre-camera al diffusore vero e proprio. Il collegamento tra i due avviene per semplice incastro: il diffusore presenta un diametro interno di circa 5 mm superiore, in modo da poter accogliere l'innesto senza necessità di giunzioni aggiuntive. Questa soluzione, pur non essendo l'unica possibile, è stata

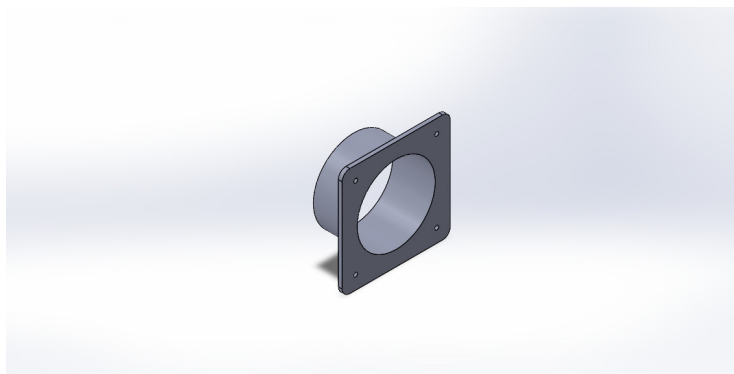


Figura 3.8: Innesto al diffusore: collegamento tra la pre-camera e il diffusore.

scelta per motivi di compattezza e semplicità costruttiva. In fase di progettazione si era infatti considerata la possibilità di collegare la pre-camera e la camera di calma tramite tubazioni flessibili, ma tale configurazione, pur più versatile, avrebbe reso la struttura meno rigida e più ingombrante. L'innesto rigido, invece, garantisce un accoppiamento preciso, facilmente ripetibile e compatibile con il sistema modulare flangiato adottato per l'intero progetto.

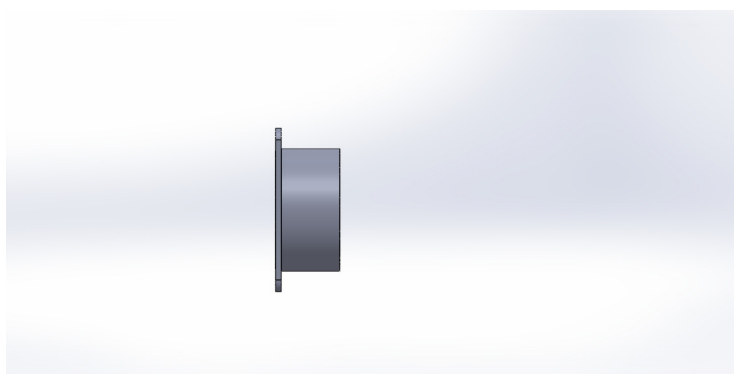


Figura 3.9: Vista laterale dell'innesto al diffusore.

Il diffusore, mostrato in figura, è stato progettato principalmente con lo scopo di adattare gradualmente la sezione del flusso al diametro della camera di calma. La scelta di realizzarlo come componente dedicato è stata dettata da considerazioni pratiche: in commercio è difficile reperire tubi flessibili con diametri di 120 mm compatibili con il progetto. In una prima fase è stato testato un tubo flessibile in acciaio con diametro di 100 mm, ma questa soluzione è stata successivamente scartata a favore del diffusore stampato in 3D, che garantisce maggiore compattezza, precisione geometrica e migliore continuità di flusso.

Nel complesso, il sistema diffusore–innesto consente di mantenere un allineamento preciso tra i moduli, garantendo al contempo la possibilità di modificare in futuro la configurazione, ad esempio integrando tubazioni o ulteriori elementi di raccordo per l'adattamento a spazi di lavoro differenti.

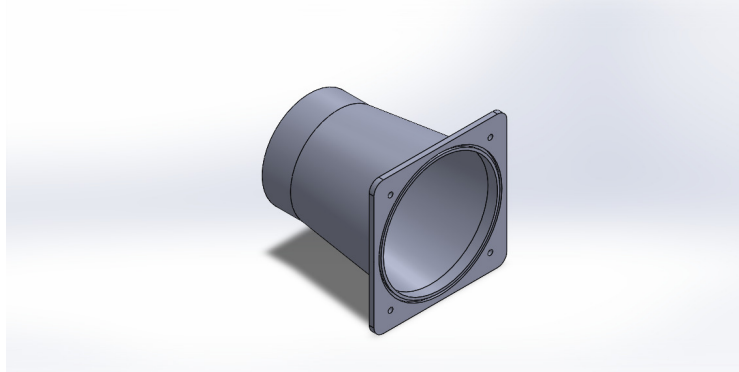


Figura 3.10: Diffusore per adattamento della sezione alla camera di calma.

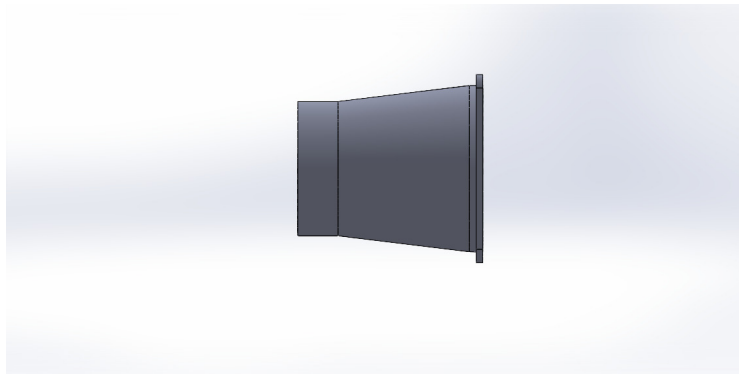


Figura 3.11: Vista laterale del diffusore.

3.4 Assieme completo

Nelle figure seguenti è mostrato l'assieme completo della parte iniziale della galleria del vento, comprendente i moduli di ingresso, la pre-camera, il diffusore e gli innesti di collegamento.

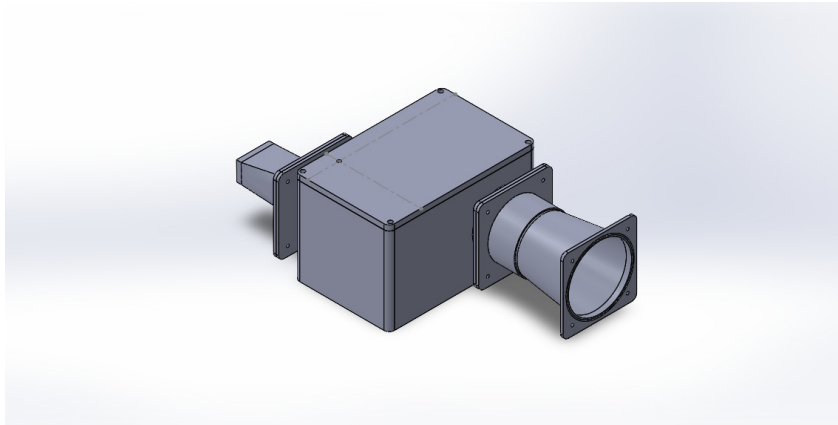


Figura 3.12: Assieme completo del sistema di ingresso della galleria del vento.

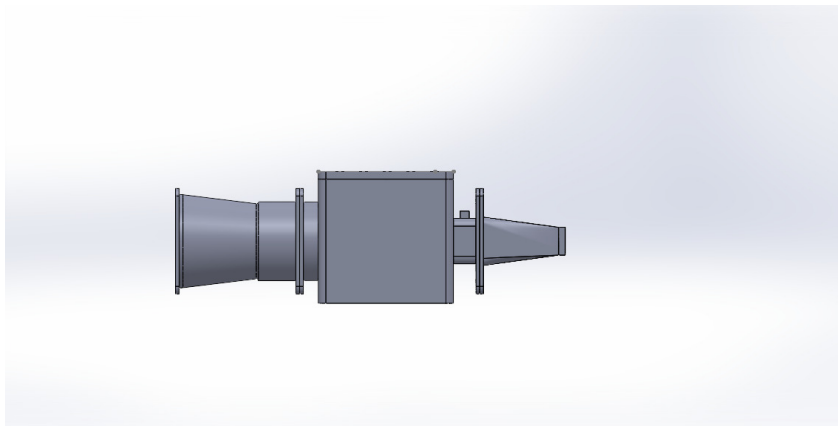


Figura 3.13: Vista laterale dell'assieme.

Ogni modulo è collegato al successivo tramite flange piane con fori passanti agli angoli, fissate mediante viti e dadi. Questa soluzione, oltre a semplificare il montaggio, assicura un allineamento preciso degli assi e riduce le perdite di carico dovute a discontinuità geometriche tra i vari elementi.

Il percorso del flusso inizia dall'innesto di ingresso (che può essere collegato a un tubo per aria compressa o alla ventola centrifuga, a seconda della configurazione scelta), attraversa la pre-camera di calma e prosegue nel diffusore, che adatta gradualmente la sezione fino a quella della camera di calma. L'intero tratto garantisce così una transizione regolare della corrente d'aria, minimizzando i distacchi di vena e favorendo la stabilizzazione del flusso prima del suo ingresso nella sezione di prova.

Grazie alla struttura modulare e compatta, l'assieme può essere facilmente trasportato, montato e adattato a differenti banchi prova o ambienti di lavoro, mantenendo allo stesso tempo un'elevata precisione geometrica e affidabilità fluidodinamica.

3.5 Tavole quotate: assieme della galleria con pre-camera

Per un riferimento visivo, in questo paragrafo si presentano le viste del progetto completo (pre-camera inserita nel circuito della galleria originale) con le relative quote dei componenti citati nei paragrafi precedenti.

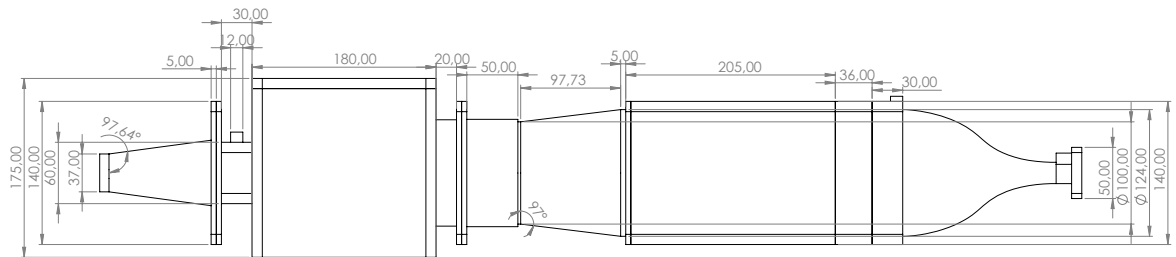


Figura 3.14: Vista laterale della galleria.

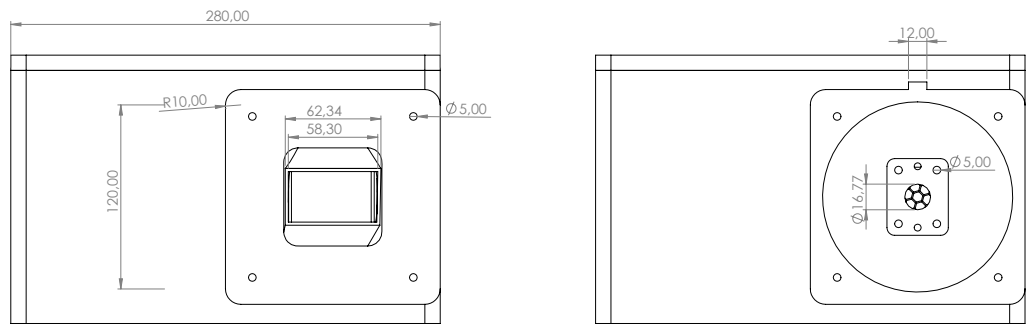


Figura 3.15: Vista frontale e posteriore della galleria.

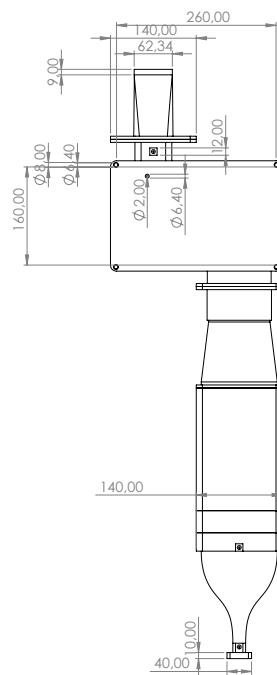


Figura 3.16: Vista superiore della galleria.

3.6 Realizzazione, stampa 3D e montaggio

La realizzazione fisica dei componenti è stata effettuata tramite stampa 3D, utilizzando tecnologia FDM (Fused Deposition Modeling). Gli slicing sono stati programmati con il software IdeaMaker, curando attentamente i parametri di qualità, la percentuale di riempimento, la disposizione dei pezzi sul piano di stampa e la generazione dei supporti, con l'obiettivo di ottimizzare il compromesso tra tempo di lavorazione, robustezza e finitura superficiale.

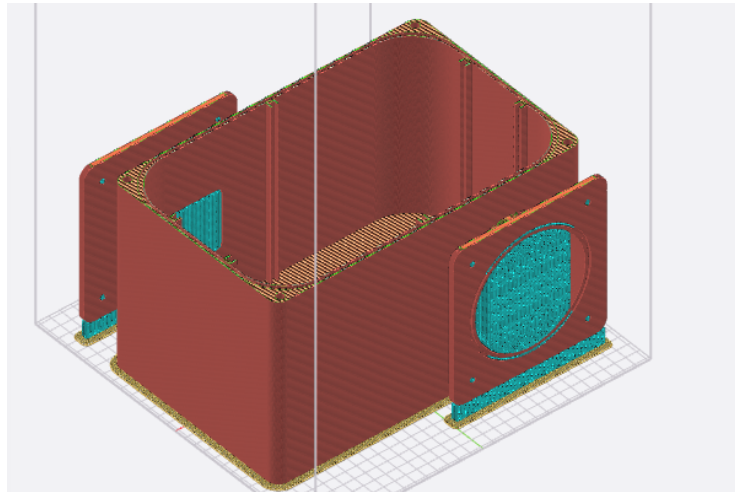


Figura 3.17: Preparazione dello slicing dei moduli su IdeaMaker.

Una volta stampati i singoli componenti, si è proceduto al montaggio. Le guarnizioni sono state tagliate su misura e incollate nelle apposite guide per garantire la tenuta d'aria tra i moduli. Per l'inserimento delle prese di misura e degli inserti filettati per le viti di fissaggio del coperchio, è stata adottata una tecnica basata sull'inserimento a caldo di elementi metallici. Il procedimento prevede il riscaldamento degli inserti con un saldatore elettrico a punta fine (comunemente utilizzato in microelettronica o per la saldatura di piccoli componenti), che consente di affondare il metallo nella plastica stampata. Una volta raffreddato il materiale, l'insero resta solidamente ancorato, permettendo l'avvitamento senza rischio di danneggiare la struttura.

Dopo l'assemblaggio dei singoli moduli, si è proceduto all'integrazione con il resto della galleria del vento, sostituendo i moduli originali con quelli della nuova configurazione. Particolare attenzione è stata posta all'allineamento e alla planarità dell'intera struttura, compensando eventuali dislivelli mediante l'aggiunta di piccoli rialzi o spessori sotto la base di appoggio, così da garantire il corretto flusso assiale e ridurre la formazione di turbolenze indesiderate.



Figura 3.18: Componenti stampati in 3D: innesti e diffusore.

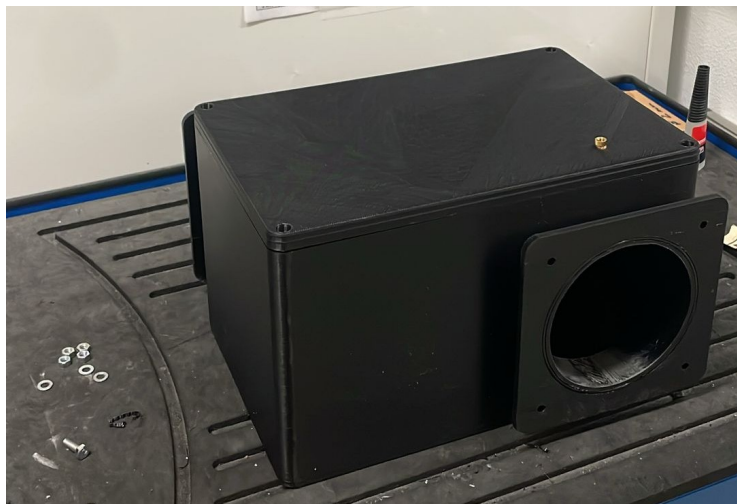


Figura 3.19: Pre-camera di calma stampata in 3D.

Capitolo 4

Misure e analisi sperimentali

4.1 Setup sperimentale

Le misure sperimentali sono state effettuate mediante un anemometro a filo caldo, strumento estremamente sensibile che consente di misurare la velocità di un flusso d'aria in base al raffreddamento di un sottilissimo filo metallico, dell'ordine dei micron. Data la delicatezza del sensore, è stato necessario prestare particolare attenzione alle condizioni di montaggio e di allineamento. L'anemometro è stato posizionato in corrispondenza del centro della sezione di uscita del flusso, posizione scelta per minimizzare gli effetti di non uniformità e ottenere una misura rappresentativa della velocità media. Prima delle acquisizioni definitive, lo strumento è stato calibrato in un calibratore commerciale (Dantec), assicurandosi che la risposta del sensore fosse stabile e coerente con le condizioni operative previste.

Le acquisizioni sono state condotte con una frequenza di campionamento pari a 30 kHz, sufficiente a catturare le fluttuazioni di velocità caratteristiche del flusso turbolento. È stato inoltre impiegato un filtro passa-basso con frequenza di taglio a 10 kHz, per ridurre il rumore ad alta frequenza e prevenire fenomeni di aliasing. Ogni acquisizione ha avuto una durata di circa 10 secondi, preceduta da un periodo di attesa necessario affinché la ventola raggiungesse il regime stazionario. La corretta centratura e l'allineamento dell'anemometro si sono rivelati fondamentali per garantire l'affidabilità dei dati raccolti, poiché anche piccoli disallineamenti possono introdurre errori significativi nella misura della velocità locale.

I dati raccolti sono stati successivamente elaborati in ambiente MATLAB, con l'obiettivo di filtrare il segnale, calcolare i parametri caratteristici del flusso (velocità media, deviazione standard, energia spettrale) e confrontare le prestazioni rispetto al modello teorico.

4.2 Trattamento del segnale e filtraggio

Durante le acquisizioni anemometriche è stata osservata la presenza di un fenomeno di drift nel segnale di velocità, ovvero una deriva lenta del valore misurato nel tempo. Tale variazione non è attribuibile a fenomeni fisici legati al flusso, ma a fattori esterni

come la variazione di temperatura ambiente o il regime transitorio della ventola. Il drift si manifesta a basse frequenze, quindi è stato necessario attenuarlo tramite un filtro passa-alto, che consente di eliminare le componenti lente e conservare solo le fluttuazioni fisicamente significative del flusso.

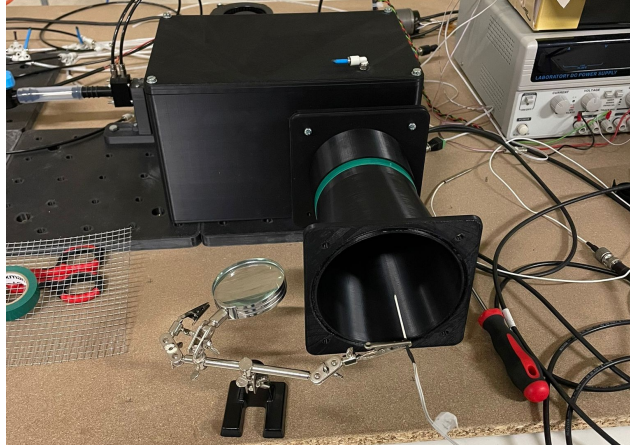


Figura 4.1: Apparato sperimentale utilizzato per le misure anemometriche sulla pre-camera.

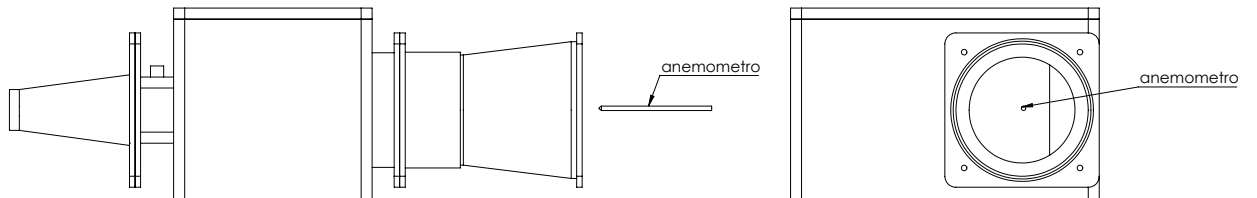


Figura 4.2: Schema: setup sperimentale pre-camera.

Le basse frequenze sono infatti associate a fenomeni di grande scala (come vortici o variazioni lente), mentre le alte frequenze corrispondono a strutture turbolente più piccole e rapide. La distinzione tra queste due fasce di frequenza è evidente nello

spettro di potenza del segnale, ottenuto mediante la Trasformata di Fourier veloce (FFT) [9], che permette di analizzare il contenuto energetico del segnale in funzione della frequenza.

Un segnale caratterizzato da numerose fluttuazioni rapide presenterà uno spettro ampio e con un'alta densità di energia alle frequenze più elevate. L'applicazione del filtro passa-alto permette quindi di studiare con maggiore chiarezza le componenti turbolente del flusso, eliminando le variazioni spurie dovute a cause esterne.

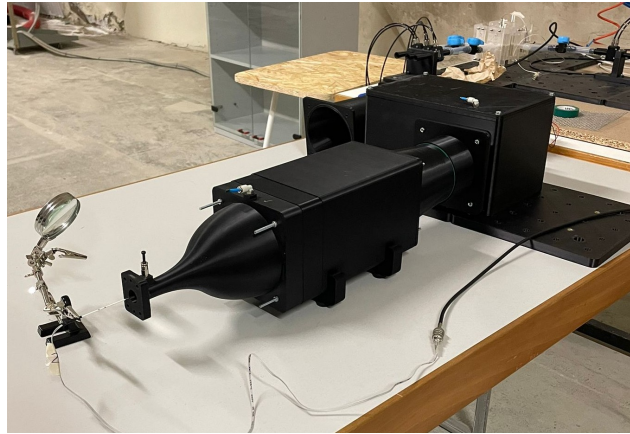


Figura 4.3: Apparato sperimentale utilizzato per le misure anemometriche sulla galleria modificata.

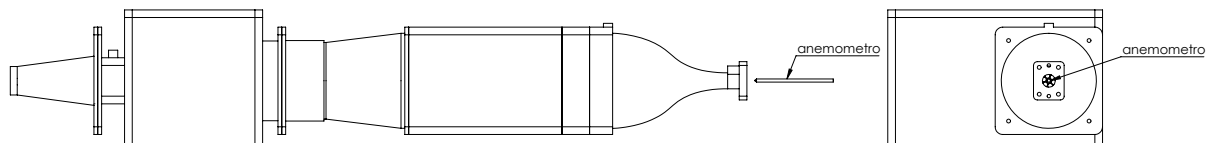


Figura 4.4: Schema: setup sperimentale galleria modificata.

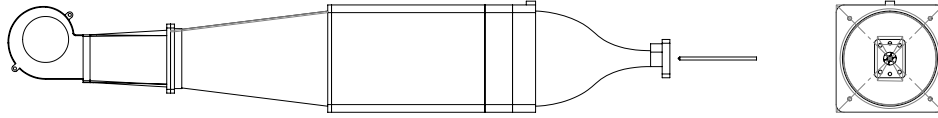


Figura 4.5: Schema: setup sperimentale galleria originale.

In fase di calibrazione dell’anemometro, cioè nella catena di misura prima dell’ADC, è stato impiegato un filtro passa-basso, con lo scopo di attenuare il rumore ad alta frequenza e ridurre l’effetto dell’aliasing, migliorando la stabilità della misura.

Successivamente l’array delle misurazioni filtrate è stato caricato su MATLAB, per poi implementare anche il filtro passa-alto nel codice, come già detto sopra, tramite le funzioni dedicate al progetto di filtri digitali, come la `butter()` per la definizione di un filtro Butterworth. Poiché l’applicazione del filtro può generare artefatti nei primi secondi di acquisizione (caratterizzati da ampiezze elevate), questi segmenti iniziali sono stati rimossi dal segnale prima dell’elaborazione finale.

Un aspetto importante da considerare è che il filtraggio modifica anche il valore medio della velocità (\bar{U}). Per questo motivo, la velocità media è stata calcolata sui dati grezzi (non filtrati), mentre la deviazione standard (σ_U) è stata calcolata sul segnale filtrato. In caso di *drift* evidente, è possibile migliorare la stima di \bar{U} scartando i primi secondi di misura o attendendo che la ventola raggiunga il regime stazionario prima di acquisire i dati.

Per lo studio del contenuto energetico delle fluttuazioni di velocità è stata utilizzata la funzione `pwelch()` di MATLAB, che consente di ottenere una stima più stabile e “pulita” dello spettro rispetto alla semplice FFT. Questa funzione divide il segnale in finestre temporali parzialmente sovrapposte, calcola lo spettro di ciascuna finestra e ne effettua la media, riducendo così la varianza dovuta al rumore.

Gli spettri sono stati rappresentati in forma adimensionale, normalizzando la frequenza e l’energia. L’adimensionalizzazione consente di confrontare i risultati tra diverse condizioni operative: segnali che presentano caratteristiche simili mostrano picchi spettrali in corrispondenza delle stesse frequenze adimensionali. Questo approccio è particolarmente utile per evidenziare la presenza di strutture turbolente coerenti nel flusso.

4.3 Elaborazione dati

Si fa riferimento al codice Matlab in appendice A.3 per questa sezione. La sequenza operativa dell'analisi svolta è riassunta di seguito:

1. rimozione del drift a bassa frequenza tramite filtro passa-alto di tipo Butterworth, ordine 1, con frequenza di taglio $f_c = 5$ Hz;
2. scarto dei primi 10 s di segnale filtrato per evitare gli artefatti dovuti alle condizioni iniziali del filtro;
3. stima spettrale con il metodo di Welch: risoluzione $\Delta f = 0.5$ Hz, finestre di lunghezza $N = f_s/\Delta f$ con sovrapposizione del 50%, trasformata FFT su N punti;
4. calcolo della media di velocità \bar{U} sul segnale non filtrato e della deviazione standard σ_U sul segnale filtrato; la turbulence intensity è definita come

$$\text{TI} = 100 \frac{\sigma_U}{\bar{U}} [\%];$$

5. adimensionalizzazione delle curve spettrali tramite numero di Strouhal

$$St = \frac{fD}{\bar{U}},$$

con $D = D_c = 100$ mm per la pre-camera e $D = D_g = 16.77$ mm per la sezione di prova, ed energia normalizzata $E/(U_b)^2 = S_{uu}(f)/\bar{U}^2$.

Per la stima spettrale è stata impiegata la trasformata veloce di Fourier (FFT); la densità spettrale $S_{uu}(f)$ è coerente con la varianza del segnale, nel senso che $\int_0^\infty S_{uu}(f) df = \sigma_U^2$.

4.3.1 Risultati spettrali e lettura fisica

Le quattro configurazioni di pre-camera mostrano valori di intensità di turbolenza compresi tra il 14% e il 30%. Le differenze tra configurazioni sono modeste su tutto l'intervallo di Reynolds considerato, a conferma che il plenum funziona già come filtro spaziale efficace. L'aggiunta della rete introduce un'attenuazione parziale alle alte frequenze, mentre il diffusore esercita un effetto più geometrico-impiantistico che fluidodinamico: dal punto di vista energetico l'impatto resta secondario e, alle velocità maggiori, la presenza del diffusore tende anzi ad amplificare leggermente la turbolenza.

	Pre-camera	Pre-camera + rete	Pre-camera + diff.	Pre-camera + diff. + rete
Re1 (≈ 3300)	15.5	17.0	15.9	14.0
Re2 (≈ 8000)	24.2	23.8	23.5	22.8
Re3 (≈ 12500)	25.7	25.7	28.3	28.4
Re4 (≈ 16000)	26.4	26.8	30.3	29.9
TI medio [%]	24.0	23.8	24.5	23.8

Tabella 4.1: Confronto dell'intensità di turbolenza per le configurazioni di pre-camera.

Per quanto riguarda le gallerie, il confronto spettrale mette in evidenza che la configurazione modificata presenta sistematicamente livelli energetici inferiori rispetto alla galleria originale su un'ampia banda di frequenze. L'inserimento di una rete aggiuntiva ($M = 5\text{mm}$, sezione quadrata) nella versione modificata non porta un beneficio chiaro: alle basse frequenze le differenze sono trascurabili, mentre alle frequenze medio-alte la rete può introdurre fluttuazioni supplementari e comportare un leggero aumento dell'intensità turbolenta.

	Galleria originale	Galleria modificata	Galleria mod. + rete
Re1 (≈ 6000)	0.42	0.27	0.40
Re2 (≈ 12000)	0.57	0.31	0.41
Re3 (≈ 17000)	0.62	0.37	0.39
Re4 (≈ 22000)	0.61	0.38	0.34
TI medio [%]	0.55	0.33	0.39

Tabella 4.2: Confronto dell'intensità di turbolenza per le configurazioni di galleria.

Confronto tra configurazioni di pre-camera a parità di velocità (figura 4.6) Le curve mostrano differenze modeste: il plenum agisce già come filtro spaziale efficace. L'aggiunta della rete introduce un'ulteriore attenuazione alle alte frequenze; il diffusore ha impatto secondario dal punto di vista spettrale, ma resta utile per l'integrazione geometrica dei moduli.

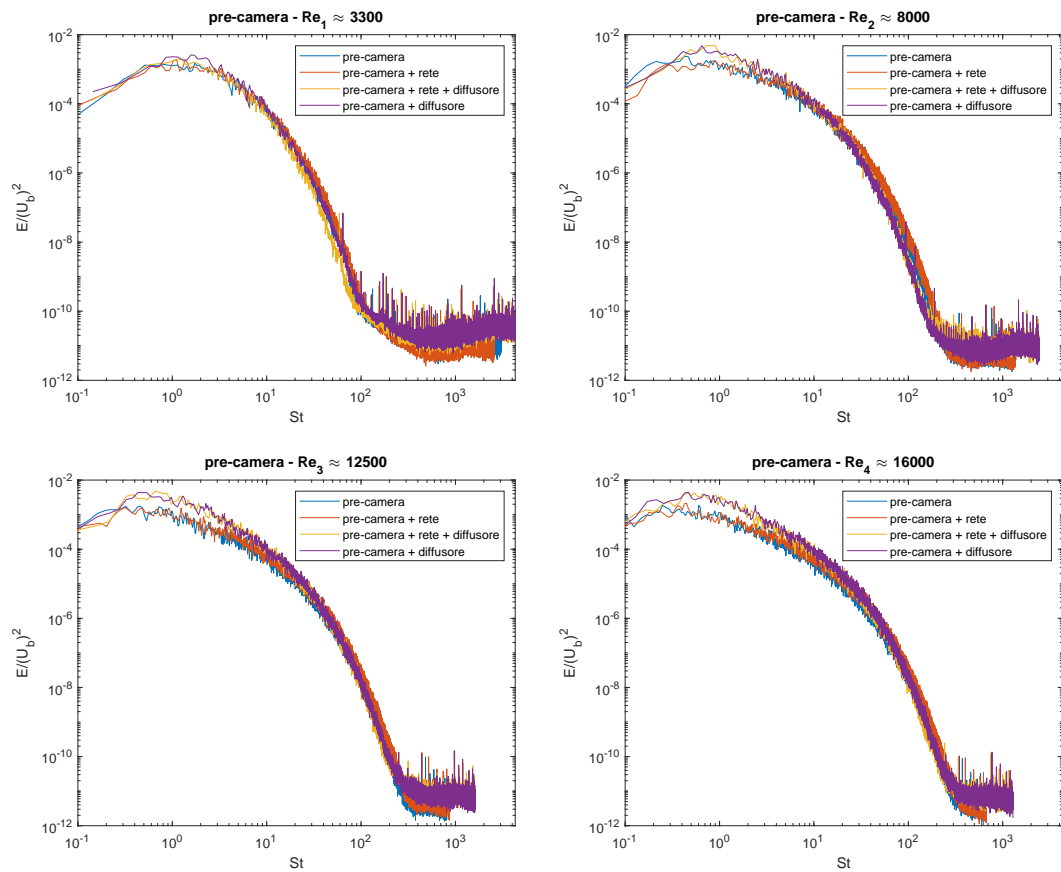


Figura 4.6: Confronto spettrale adimensionale delle configurazioni della pre-camera a diverse velocità (Re_1 – Re_4).

Confronto tra gallerie a parità di velocità (figura 4.7) A parità di U , la configurazione modificata + rete mostra sistematicamente energia inferiore su un'ampia banda di St rispetto all'originale, ma è quella modificata senza rete a risultare ottimale al variare di Re .

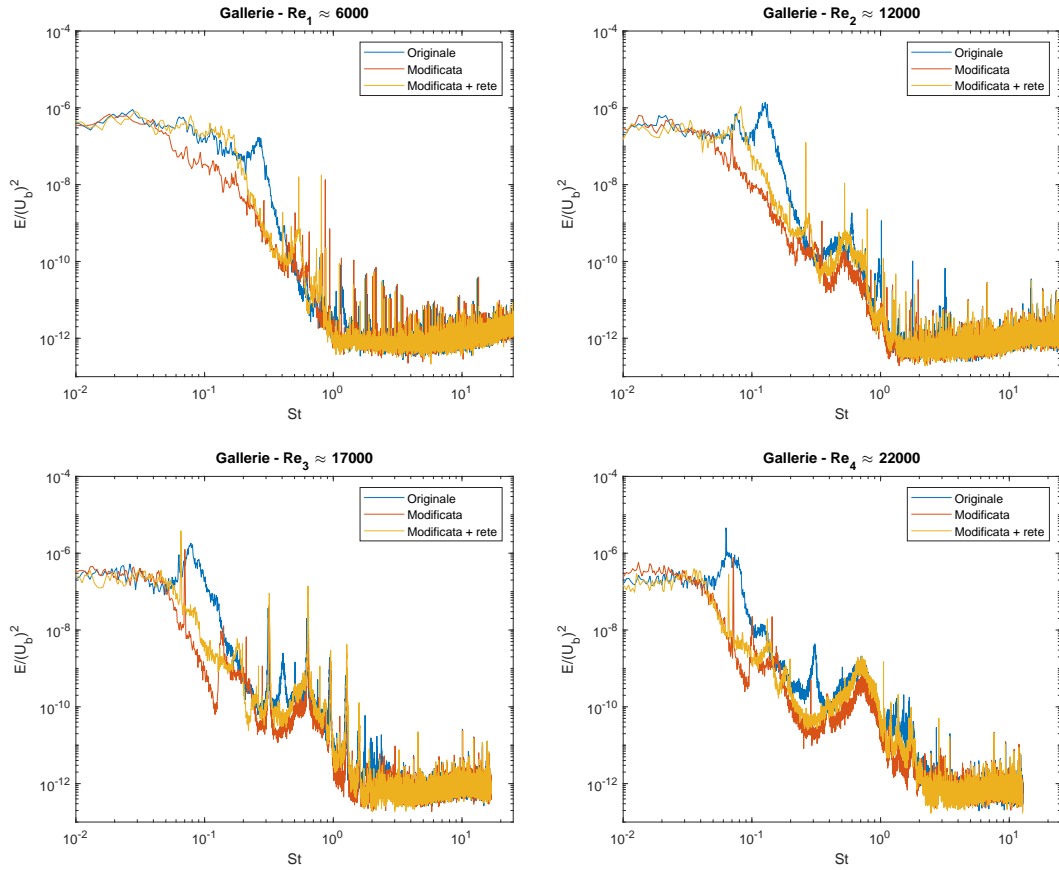


Figura 4.7: Confronto spettrale adimensionale tra gallerie a parità di velocità: originale, modificata, modificata con rete.

Analisi adimensionalizzata delle configurazioni di pre-camera, a diverse velocità (figura 4.8) In coordinate di Strouhal le curve collassano in modo soddisfacente: picchi e ginocchia si allineano entro scarti contenuti. Ciò conferma la correttezza della scalatura con D e \bar{U} adottata per pre-camera e sezione di prova. Si nota dai grafici che il diffusore crea dei picchi di energia ad alta frequenza, soprattutto a bassi Re, probabilmente dovuti a separazione del flusso, ma che comunque non aumentano il livello di turbolenza.

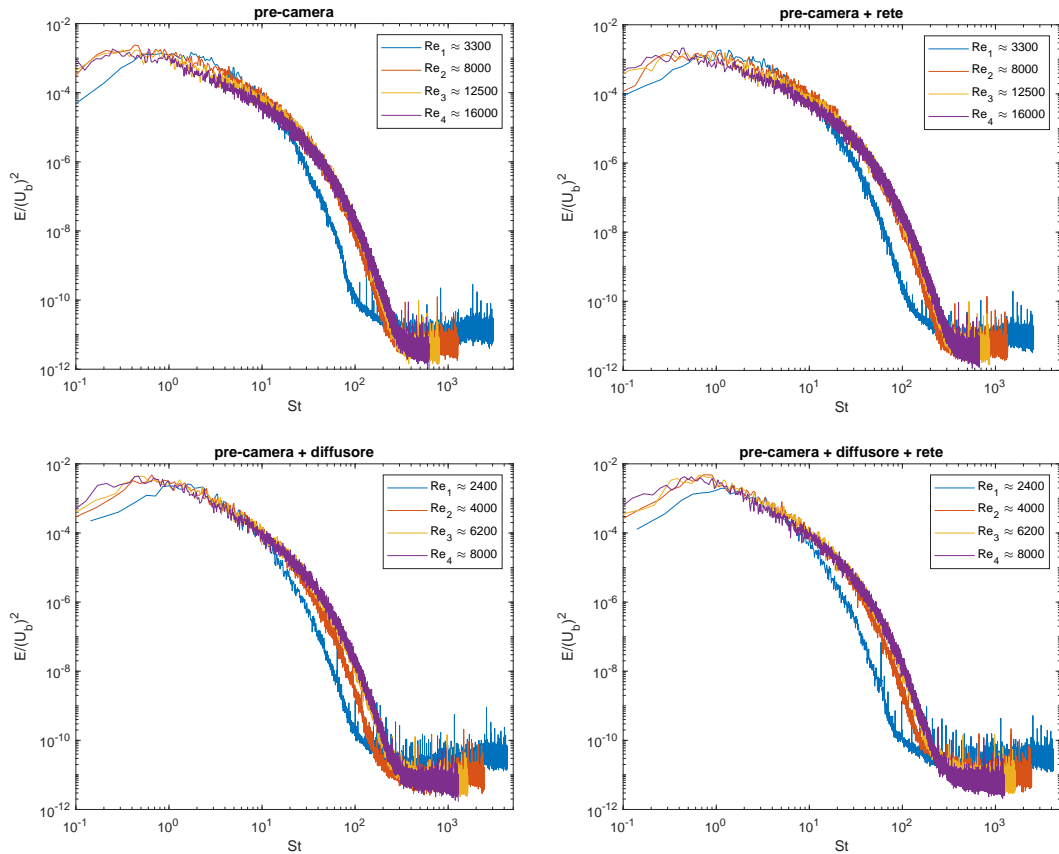


Figura 4.8: Analisi adimensionalizzata delle configurazioni di pre-camera, a diverse velocità.

Analisi delle gallerie, a diverse velocità (figura 4.9) All'aumentare di \bar{U} i contenuti spettrali si traslano verso frequenze maggiori, coerentemente con l'aumentare della separazione delle scale temporali caratteristiche del flusso.

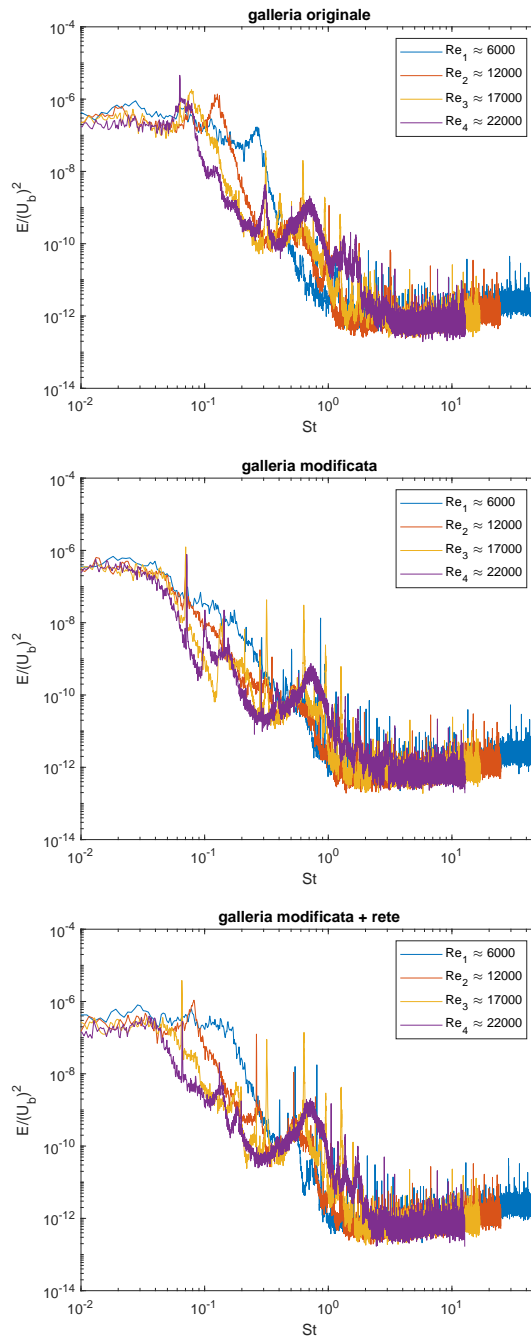


Figura 4.9: Analisi adimensionalizzata delle gallerie, a diverse velocità.

4.3.2 Analisi degli spettri premoltiplicati

Il termine "spettri premoltiplicati" (o premultiplied spectra) si riferisce a una tecnica di visualizzazione e analisi dello spettro di potenza (di un segnale, turbolenza, o

vibrazione) in cui la densità spettrale di potenza (PSD) viene moltiplicata per la frequenza (o numero d'onda) stessa.

A differenza della classica Densità Spettrale di Potenza (PSD), che rappresenta l'energia per unità di frequenza $E(f)$ (come fatto nel paragrafo precedente), lo spettro premoltiplicato moltiplica la PSD per la frequenza stessa $f * E(f)$. Mentre la PSD mostra dove è concentrata la potenza per unità di frequenza, lo spettro premoltiplicato mostra dove è distribuita la maggior parte della potenza totale.

Questo metodo ha lo scopo di facilitare l'identificazione delle frequenze (o scale spaziali/turbolente) che contribuiscono maggiormente all'energia totale del segnale, siccome si ha il vantaggio di visualizzare aree uguali sotto la curva del grafico premoltiplicato che rappresentano una quantità di energia uguale. Questo permette di "appiattire" lo spettro, rendendo evidenti i picchi di energia sia alle basse che alle alte frequenze, che altrimenti verrebbero schiacciati in una normale rappresentazione log-log.

Sono utilizzati per evidenziare le strutture turbolente coerenti e le scale energetiche principali, in particolare quando si analizzano spettri di velocità (come nel caso in esame) o di stress di Reynolds. [10]

Dunque, questo tipo di analisi è stato effettuato per studiare meglio i picchi energetici delle varie configurazioni di pre-camera (fig. 4.10) e galleria (fig. 4.11), al variare della velocità.

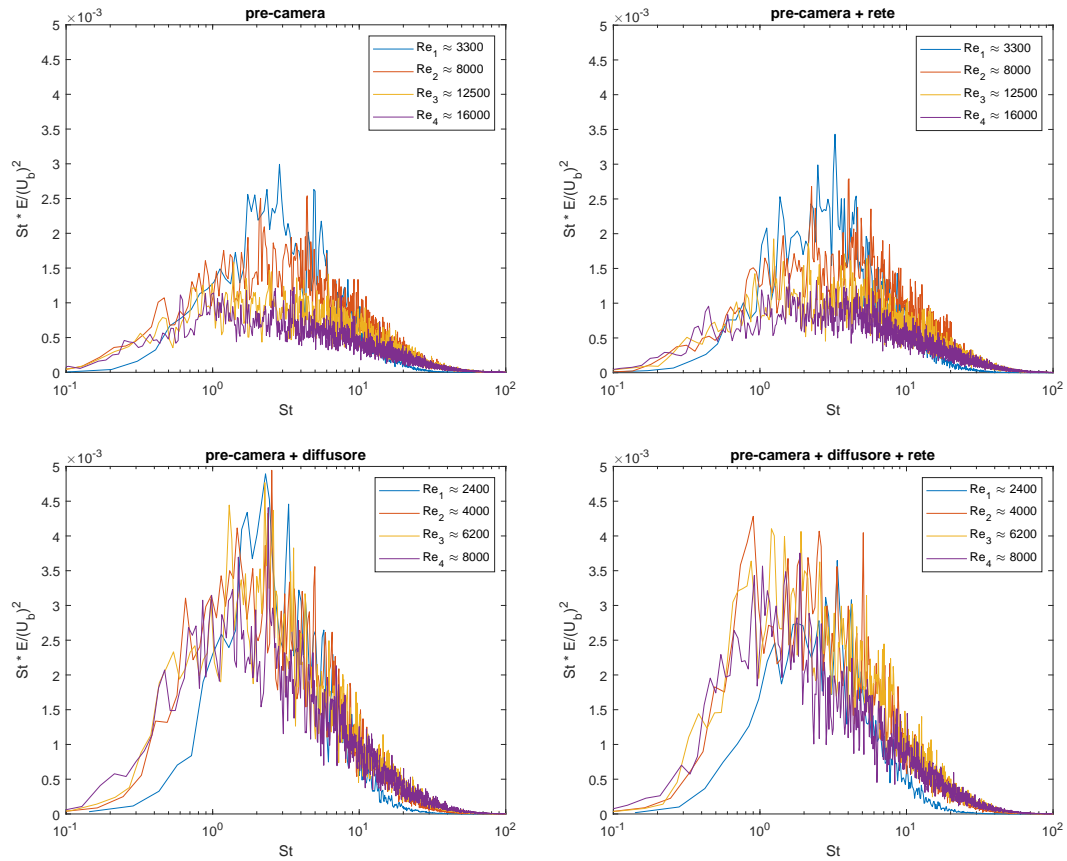


Figura 4.10: Spettri premoltiplicati: configurazioni della pre-camera a diverse velocità.

Si osserva che ad alti numeri di Re la pre-camera, in generale, lavora meglio. Aggiungere rete e diffusore causa un aumento energetico, il che era previsto per il diffusore, ma inaspettato per la rete. I presenti grafici mostrano risultati già osservati precedentemente, ma, come detto, facilitano l'analisi.

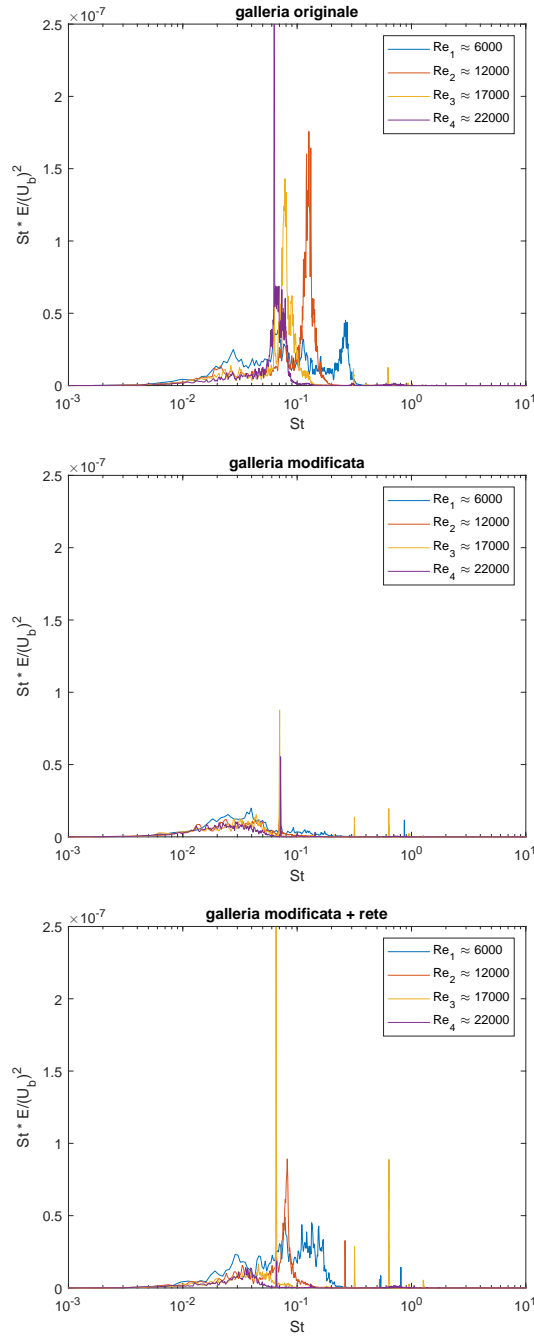


Figura 4.11: Spettri premoltiplicati: configurazioni della galleria a diverse velocità.

Si osserva chiaramente che la galleria modificata ha un comportamento energetico migliore. Con questi grafici, però, si può anche apprezzare meglio lo "shift" dei picchi energetici nella galleria originale che sembra dipendere dal numero di Re , avvenendo prima all'aumentare di Re . Anche in questo caso, l'apporto della rete sembra peggiorare la fluidodinamica del flusso.

4.3.3 Analisi dimensionale

Osservando i grafici adimensionalizzati si possono notare dei picchi energetici nelle varie configurazioni, alcuni sovrapposti, altri sfasati. L'adimensionalizzazione, però, ha avuto esattamente lo scopo di "sovrapporre" i picchi per facilitarne il confronto. Ma è interessante anche effettuare un'analisi dimensionale per comprendere la causa di tali fenomeni: sono dovuti alla geometria della galleria o alla velocità del flusso? Capire le cause è utile per sapere come agire a seconda di esse, per esempio nel caso di dipendenza dalla velocità del flusso, si agisce regolando il numero di giri della ventola.

In particolare, è interessante effettuare l'analisi anche perché la presenza della pre-camera sembra far sorgere nuovi picchi che nella galleria originale non erano presenti: vedasi fig. 4.9 e confrontare "galleria originale" con "galleria modificata". Alle alte frequenze sembrano sorgere nuovi effetti energetici.

Dai grafici dimensionali (fig. 4.12) risulta che:

- Galleria originale: al variare di Re il fenomeno di picco energetico avviene alle stesse frequenze (in particolare ≈ 100 Hz e ≈ 400 Hz). Nel grafico adimensionale, invece, i picchi sono sfasati, potrebbero quindi essere dei fenomeni dovuti semplicemente alla geometria originale.
- Galleria modificata: il fenomeno di picco energetico è dipendente dal valore di Re , trasla di frequenza al variare della velocità del flusso. In fig. 4.9 i picchi si sovrappongono a $St \approx 0.1$, quindi la dipendenza dalla velocità veniva "schermata" dall'adimensionalizzazione. Bisogna però considerare anche un'ulteriore possibile "schermatura", legata all'ordine di grandezza dell'energia. Fenomeni presenti sia nella galleria originale che in quella modificata possono infatti coesistere, ma risultare occultati nei grafici qualora avvengano a livelli energetici significativamente diversi.

Sommariamente: il comportamento delle gallerie alle basse frequenze è caratterizzato da bassi valori energetici. All'aumentare della frequenza si presentano dei picchi, in alcuni casi dovuti alla geometria, in altri alla velocità (l'analisi fatta ci ha permesso di associare i casi specifici).

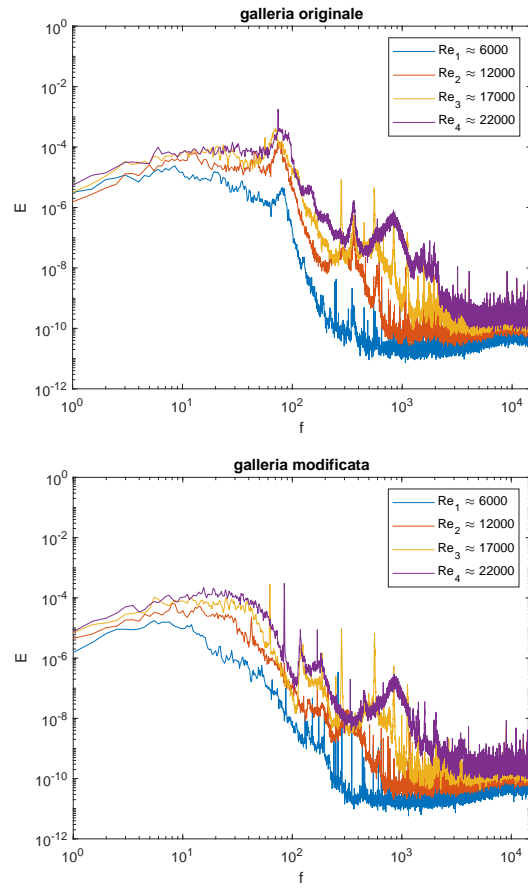


Figura 4.12: Analisi dimensionale: gallerie a diverse velocità.

4.3.4 Confronto grafico tra galleria originale e galleria modificata

Per un confronto visivo, è stato realizzato un grafico che mostra le differenze energetiche tra le due configurazioni di galleria del vento (fig. 4.13), per osservare le conseguenze delle modifiche apportate (Appendice A.3). Il grafico mostra, in percentuale, i valori energetici della galleria modificata rispetto a quella originale. Si nota che alle basse frequenze la galleria modificata tende ad energie inferiori, mentre alle alte frequenze il comportamento è molto simile. Ad alti numeri di Re il comportamento è migliore.

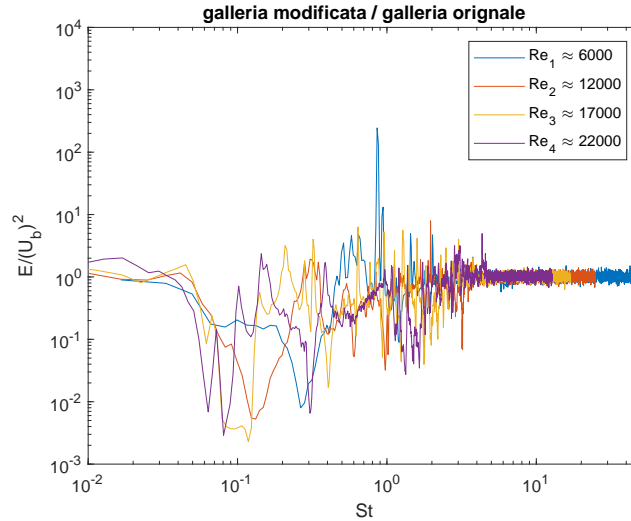


Figura 4.13: Rapporto tra galleria modificata e galleria originale.

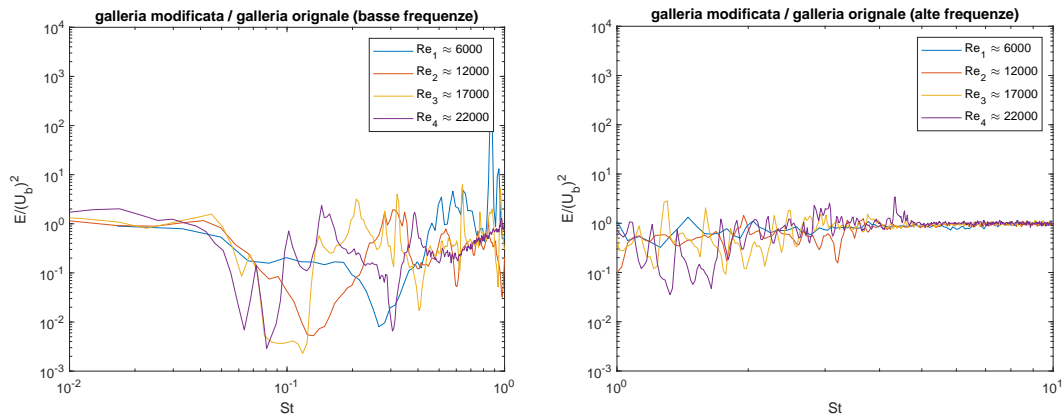


Figura 4.14: Rapporto tra galleria modificata e galleria originale (basse e alte frequenze)

4.3.5 Implicazioni sperimentali

- Le precamere generano un'intensità di turbolenza elevata (24%), con variazioni modeste tra le configurazioni. L'inserimento di una rete o di un diffusore non modifica in modo sostanziale i valori medi e, anzi, alle alte velocità il diffusore tende ad amplificare (necessariamente) la turbolenza.
- Le gallerie mostrano ottimi valori di intensità di turbolenza: la turbolenza scende sotto l'1% in tutte le configurazioni. La versione modificata è nettamente la migliore (TI medio 0.33%, rispetto allo 0.55% della versione originale). L'inserimento della rete all'interno della galleria modificata non porta benefici e in alcuni casi peggiora leggermente i livelli di TI (mediamente 0.39%).
- Il diffusore tra pre-camera e camera di calma ha ruolo soprattutto geometrico-impiantistico; dal punto di vista spettrale produce effetti secondari.

Capitolo 5

Conclusioni

Il lavoro svolto ha avuto come obiettivo principale l'ottimizzazione della galleria del vento didattica, con particolare attenzione alla pre-camera e ai moduli di connessione che precedono la camera di calma. L'intero processo è stato guidato da criteri di semplicità costruttiva, adattabilità e miglioramento della qualità del flusso nella sezione di prova.

La progettazione e la realizzazione dei nuovi moduli, eseguite con tecniche di modellazione 3D e stampa additiva, hanno permesso di sviluppare un sistema modulare e compatto, capace di integrare facilmente diversi elementi (diffusore, rete e plenum). Questa scelta si è dimostrata utile sia per la praticità di assemblaggio sia per la possibilità di configurare la galleria in vari assetti sperimentali, a seconda delle esigenze future di misura e ricerca.

Dal punto di vista sperimentale, le prove condotte hanno mostrato risultati coerenti e significativi. La pre-camera si è rivelata efficace nel regolarizzare il flusso già a monte della camera di calma, attenuando in modo sensibile le fluttuazioni ad alta frequenza. Il diffusore, pur avendo un'influenza minore sul contenuto spettrale, ha svolto un ruolo importante nel raccordo geometrico e nella riduzione delle perdite localizzate.

L'analisi spettrale, basata su trasformata di Fourier e stima di Welch, ha consentito di quantificare in modo chiaro la distribuzione energetica delle fluttuazioni e di evidenziare le differenze tra le varie configurazioni. Le curve adimensionalizzate in numero di Strouhal hanno mostrato un buon collasso, confermando la corretta scelta delle grandezze di scala e la coerenza fisica del fenomeno analizzato. Ciò ha permesso di interpretare i risultati in modo generalizzabile, indipendentemente dalla velocità assoluta del flusso.

Dal punto di vista metodologico, l'uso combinato di filtraggio numerico, analisi in frequenza e strumenti di post-processing in Matlab ha permesso di distinguere con chiarezza le componenti fisiche del segnale (turbolenza, deriva termica, rumore strumentale), garantendo un'elaborazione dati solida e ripetibile. L'adozione di una procedura standardizzata per la calibrazione e la gestione dei filtri ha inoltre migliorato l'affidabilità complessiva delle misure.

Dal punto di vista quantitativo, l’inserimento della pre-camera di calma non ha comportato una penalizzazione energetica significativa, a fronte di un miglioramento misurabile della qualità del flusso. In condizioni di progetto (portata $Q = 360$ L/min), il coefficiente di perdita totale passa da $K_{\text{tot}} = 1.0446$ (configurazione originale) a $K_{\text{tot}} = 1.0721$ (configurazione modificata), corrispondente a un incremento del 2.6%; coerentemente, la caduta di pressione aumenta da $\Delta p = 475.9$ Pa a $\Delta p = 488.4$ Pa (+12.5 Pa) e la potenza fluidodinamica richiesta cresce da $P_d = 2.86$ W a $P_d = 2.93$ W (+0.07 W), confermando che l’impatto energetico della modifica è trascurabile. Al contrario, i risultati anemometrici mostrano un netto beneficio sulla turbolenza in sezione di prova: l’intensità di turbolenza media scende da 0.55% (galleria originale) a 0.33% (galleria modificata), con una riduzione assoluta di 0.22 punti percentuali (circa -40% in termini relativi). L’eventuale inserimento di una rete aggiuntiva nella configurazione modificata non migliora ulteriormente il risultato, portando un valore medio di 0.39%, e risulta quindi meno efficace della soluzione “modificata senza rete”. Nel complesso, i dati confermano che la pre-camera produce un miglioramento sostanziale della qualità del flusso a fronte di un costo energetico minimo, rendendo la configurazione modificata la scelta ottimale tra quelle analizzate.

In conclusione, la nuova configurazione della galleria del vento ha raggiunto pienamente gli obiettivi prefissati: migliorare la qualità del flusso, semplificare l’assemblaggio e aumentare la versatilità dell’impianto. I risultati ottenuti forniscono una base sperimentale robusta per future implementazioni, come l’integrazione di sensori aggiuntivi, l’alimentazione pneumatica o la caratterizzazione di modelli aerodinamici a piccola scala. Il lavoro rappresenta quindi un passo concreto verso una galleria più efficiente, flessibile e scientificamente affidabile, capace di supportare sia attività didattiche che studi sperimentali di livello più avanzato.

Appendice A

Codici MATLAB

Listing A.1: Script MATLAB utilizzato per il calcolo delle perdite nella galleria del vento originale

```
1 clc
2 clear
3 close all
4
5 %% PARAMETRI GENERALI:
6 rho = 1.225; % [kg/m^3]
7 mu = 1.81e-5; % [Pa*s]
8
9 % parametri all'uscita (sezione di prova)
10 A0 = 0.00022; % [m^2]
11 Q = 0.006; % [m^3/s]
12 U0 = Q/A0;
13
14 %% INNESTO VENTOLA (rettangolare -> circolare, tipo "divergente")
15 l = 0.058; h = 0.033; % [m]
16 A1 = l*h; % [m^2]
17 D2 = 0.070; % [m]
18 A2 = pi*(D2/2)^2; % [m^2]
19 R_h = (l*h)/(l+h); % raggio idraulico [m]
20 Dh_innesto = 2*R_h; % diametro idraulico ingresso
21 L_i = 0.100; % lunghezza innesto [m]
22 r_eq = sqrt(A1/pi);
23 theta_i = asind(((D2/2) - r_eq)/L_i); % angolo conico equivalente [
    deg]
24
25 AR = A2/A1;
26 U1 = Q/A1;
27 Re_i = rho*U1*Dh_innesto/mu;
28
29 % coefficiente d'attrito (iterazione Colebrook semplificata)
30 fi = 1; for n=1:10, fi = (2*log10(Re_i*sqrt(fi))-0.8)^-2; end
```

```

31
32 % perdite di forma
33 Ki_f = (1 - 1/(AR^2))*fi/(8*sind(theta_i)); % attrito "conico" (
    forma)
34 Ki_e = -0.09661 + 0.04672*theta_i; % espansione diffusa
35
36 % perdita distribuita esplicita nell'innesto
37 Ai_med = 0.5*(A1 + A2);
38 % uso Dh medio tra Dh_innesto e D2 per non sovrastimare:
39 Dh_i_med = 0.5*(Dh_innesto + D2);
40 Ki_dist = fi * (L_i / Dh_i_med);
41
42 % normalizzazione alla test-section
43 K(1) = (Ki_f + Ki_e + Ki_dist) * (A0/Ai_med)^2;
44
45 %% DIVERGENTE (diffusore assiale conico)
46 Din = 0.070; Ain = pi*(Din/2)^2;
47 Dout = 0.120; Aout = pi*(Dout/2)^2;
48
49 AR = Aout/Ain;
50 Ud = Q/Ain;
51 Re_d = rho*Ud*Din/mu;
52 theta_d = 7; % [deg]
53 % lunghezza del diffusore (nota o ricavata dallangolo):
54 L_d = 0.200; % se vuoi: L_d = (Dout - Din)/(2*tand(theta_d));
55
56 fd = 1; for n=1:10, fd = (2*log10(Re_d*sqrt(fd))-0.8)^-2; end
57 Kd_f = (1 - 1/(AR^2))*fd/(8*sind(theta_d)); % forma (conico)
58 Kd_e = -0.09661 + 0.04672*theta_d; % espansione
59
60 % NUOVO: perdita distribuita esplicita nel diffusore
61 Ad_med = 0.5*(Ain + Aout);
62 Dh_dmed = 0.5*(Din + Dout);
63 Kd_dist = fd * (L_d / Dh_dmed);
64
65 K(2) = (Kd_f + Kd_e + Kd_dist) * (A0/Ad_med)^2;
66
67 %% CAMERA DI CALMA (condotto a D costante)
68 L_c = 0.200;
69 D_c = Dout;
70 A_c = Aout;
71
72 U_c = Q/A_c;
73 Re_c = rho*U_c*D_c/mu;
74
75 f_c = 1; for n=1:10, f_c = (2*log10(Re_c*sqrt(f_c))-0.8)^-2; end
76 Kc_dist = f_c * (L_c/D_c);

```

```

77 K(3) = Kc_dist * (A0/A_c)^2;
78
79 %% HONEYCOMB
80 L_hc = 0.036; % [m]
81 D_hc = 0.006; % diam. idraulico cella [m]
82 t_hc = 0.0008; % spessore parete [m]
83 U_hc = U_c; % stessa sezione della camera di calma
84 Re_hc = rho*U_hc*D_hc/mu;
85 M = 0.006; % passo maglia
86 beta_hc = (1-(t_hc/M))^2;
87
88 if Re_hc < 275
89     lam_hc = 0.375*(t_hc/D_hc)^0.4*Re_hc^-0.1;
90 else
91     lam_hc = 0.214*(t_hc/D_hc)^0.4;
92 end
93
94 Khc = lam_hc*(L_hc/D_hc + 3)*(1/beta_hc)^2 + (1/beta_hc - 1)^2;
95 K(4) = Khc * (A0/A_c)^2;
96
97 %% CONVERGENTE
98 Lconv = 0.150;
99 Aconv_in = A_c;
100 Dconv_in = D_c;
101 Aconv_out = A0;
102 Dconv_out = 2*sqrt(Aconv_out/pi);
103 Aconv_med = 0.5*(Aconv_in + Aconv_out);
104 Uconv_med = Q/Aconv_med;
105 Dh_convmed = 0.5*(Dconv_in + Dconv_out);
106
107 Re_conv = rho*Uconv_med*Dh_convmed/mu;
108 fconv = 1; for n=1:10, fconv = (2*log10(Re_conv*sqrt(fconv))-0.8)^-2;
109     end
110
111 % forma (Wattendorf)
112 D_ts = sqrt(4*A0/pi);
113 K_form_conv = 0.32 * (fconv * Lconv / D_ts);
114
115 % perdita distribuita esplicita nel convergente
116 Kconv_dist = fconv * (Lconv / Dh_convmed);
117
118 K(5) = (K_form_conv + Kconv_dist) * (A0/Aconv_med)^2;
119
120 %% SEZIONI COSTANTI (pre- e post-convergente)
121 L1 = 0.030; % pre-conv (D = D_c)
122 D1 = D_c; A1c = A_c; U1c = U_c;

```

```

123 D2 = 0.01677; % post-conv (ugello)
124 A2 = pi*(D2/2)^2;
125 U2 = Q/A2;
126
127 Re1 = rho*U1c*D1/mu;
128 Re2 = rho*U2*D2/mu;
129
130 % attrito pre-conv = f_c ; post-conv: f2
131 f2 = 1; for n=1:10, f2 = (2*log10(Re2*sqrt(f2))-0.8)^-2; end
132
133 K1 = f_c * (L1/D1); K(6) = K1 * (A0/A1c)^2;
134
135 L2 = 0.01516;
136 K2 = f2 * (L2/D2); K(7) = K2 * (A0/A2)^2;
137
138 %% UGELLO (perdita distribuita + perdita di sbocco)
139 Lu = 0.01516; Du = D2; Au = A2; % ugello terminale reale
140 Ku_dist = f2 * (Lu/Du);
141 K(8) = Ku_dist * (A0/Au)^2;
142
143 % perdita di sbocco
144 K(9) = 1; % uscita libera
145
146 %% TOTALE
147 fprintf('Il coefficiente di perdita totale :\n');
148 K_tot = sum(K);
149 disp(K_tot);
150
151 fprintf('Caduta di pressione [Pa]:\n');
152 delta_p = K_tot * 0.5*rho*U0^2;
153 disp(delta_p);
154
155 fprintf('Potenza fluidodinamica [W]:\n');
156 Pd = Q*delta_p;
157 disp(Pd);

```

Listing A.2: Script MATLAB per il calcolo delle perdite di carico – configurazione modificata

```

1  clc
2  clear
3  close all
4
5  %% PARAMETRI GENERALI
6  rho = 1.225; % [kg/m^3]
7  mu = 1.81e-5; % [Pa*s]
8
9  % sezione di prova (test-section)
10 A0 = 0.00022; % [m^2]
11 Q = 0.006; % [m^3/s]
12 U0 = Q/A0;
13
14 K = []; labels = {};
15
16 %% 1) INNESTO: ventola -> pre-camera
17 % rettangolare 57.7x33 mm --> quadrato 64x64 mm, L = 109 mm
18 a_in = 57.7e-3; b_in = 33e-3; % [m]
19 A_in = a_in*b_in; % [m^2]
20 P_in = 2*(a_in + b_in);
21 Dh_in = 4*A_in/P_in; % diametro idraulico ingresso [m]
22
23 s_out = 64e-3; % lato quadrato [m]
24 A_out = s_out^2;
25 P_out = 4*s_out;
26 Dh_out = 4*A_out/P_out; % = lato per sezione quadrata
27
28 L_i = 109e-3; % [m]
29 AR_i = A_out/A_in; % area ratio
30 U_in = Q/A_in;
31 Re_in = rho*U_in*Dh_in/mu;
32
33 % coefficiente d'attrito (iterazione stile Colebrook)
34 fi = 1; for n=1:10, fi = (2*log10(Re_in*sqrt(fi))-0.8)^-2; end
35
36 % stima angolo equivalente (da raggio equivalente circolare)
37 r_eq_in = sqrt(A_in/pi);
38 r_eq_out = sqrt(A_out/pi);
39 theta_i = asind( (r_eq_out - r_eq_in) / L_i ); % [deg], pu risultare
    <5
40
41 % perdite "di forma"
42 Ki_f = (1 - 1/(AR_i^2))*fi/( max(8*sind(max(theta_i,0.1)), 1e-3) );
43 % espansione diffusa (valida per theta > ~5)
44 Ki_e = -0.09661 + 0.04672*max(theta_i,0);

```

```

45
46 % perdita distribuita esplicita nell'innesto (con Dh medio)
47 Ai_med = 0.5*(A_in + A_out);
48 Dh_i_med = 0.5*(Dh_in + Dh_out);
49 Ki_dist = fi * (L_i / Dh_i_med);
50
51 K1 = (Ki_f + Ki_e + Ki_dist) * (A0/Ai_med)^2;
52 K(end+1) = K1; labels{end+1} = 'Innesto ventola->pre-camera (forma+
    esp+dist)';
53
54 %% 2) PRE-CAMERA DI CALMA (plenum)
55 % Dimensioni interne: L=280 mm, W=180 mm, H=175 mm
56 Lc_pc = 280e-3; W_pc = 180e-3; H_pc = 175e-3;
57 A_pc = W_pc * H_pc; % sezione caratteristica [m^2]
58 P_pc = 2*(W_pc + H_pc);
59 Dh_pc = 4*A_pc / P_pc;
60
61 U_pc = Q/A_pc; % velocit media molto bassa
62 Re_pc = rho*U_pc*Dh_pc/mu;
63
64 % perdita concentrata tipica da plenum
65 K_pc_conc = 1.0;
66
67 % perdita distribuita equivalente nel plenum
68 f_pc = 1; for n=1:10, f_pc = (2*log10(max(Re_pc,1)*sqrt(f_pc))-0.8)
    ^-2; end
69 K_pc_dist = f_pc * (Lc_pc / Dh_pc);
70
71 K2 = (K_pc_dist) * (A0/A_pc)^2 + K_pc_conc;
72 K(end+1) = K2; labels{end+1} = 'Pre-camera (Kplenum + dist
    equivalente)';
73
74 %% 3) INNESTO AL DIFFUSORE (tratto cilindrico D=105 mm, L=50 mm)
75 D_id = 105e-3; L_id = 50e-3;
76 A_id = pi*(D_id/2)^2;
77 U_id = Q/A_id;
78 Re_id = rho*U_id*D_id/mu;
79 f_id = 1; for n=1:10, f_id = (2*log10(Re_id*sqrt(f_id))-0.8)^-2; end
80 K3 = (f_id * L_id / D_id) * (A0/A_id)^2;
81 K(end+1) = K3; labels{end+1} = 'Innesto al diffusore D105 (dist)';
82
83 %% 3b) CONTRAZIONE rapida 105 mm -> 100 mm (prima del diffusore)
84 D_cx_in = 105e-3; A_cx_in = pi*(D_cx_in/2)^2;
85 D_cx_out = 100e-3; A_cx_out = pi*(D_cx_out/2)^2;
86 sigma_c = A_cx_out / A_cx_in; % < 1
87 % perdita per contrazione "sharp" (stima semplice):
88 K_contr = (1/sigma_c - 1)^2 * 0.5; % coeff. moderato

```

```

89 K4 = K_contr * (A0/A_cx_out)^2;
90 K(end+1) = K4; labels{end+1} = 'Contrazione 105->100 (sudden, sempl.)
    ';
91
92 %% 4) DIFFUSORE aggiornato (Din=100 mm, Dout=120 mm, L=138 mm, theta
    =7)
93 Din = 100e-3; Ain = pi*(Din/2)^2;
94 Dout = 120e-3; Aout = pi*(Dout/2)^2;
95 L_d = 138e-3; theta_d = 7; % [deg]
96 AR_d = Aout/Ain;
97 Ud = Q/Ain;
98 Re_d = rho*Ud*Din/mu;
99
100 fd = 1; for n=1:10, fd = (2*log10(Re_d*sqrt(fd))-0.8)^-2; end
101 Kd_f = (1 - 1/(AR_d^2))*fd/(8*sind(theta_d)); % forma conico
102 Kd_e = -0.09661 + 0.04672*theta_d; % espansione
103 Ad_med = 0.5*(Ain + Aout);
104 Dh_dmed = 0.5*(Din + Dout);
105 Kd_dist = fd * (L_d / Dh_dmed);
106
107 K5 = (Kd_f + Kd_e + Kd_dist) * (A0/Ad_med)^2;
108 K(end+1) = K5; labels{end+1} = 'Diffusore 100->120 (forma+esp+dist)';
109
110 %% 5) CAMERA DI CALMA (D = 120 mm, L = 200 mm)
111 L_c = 0.200; D_c = 0.120; A_c = pi*(D_c/2)^2;
112 U_c = Q/A_c; Re_c = rho*U_c*D_c/mu;
113 f_c = 1; for n=1:10, f_c = (2*log10(Re_c*sqrt(f_c))-0.8)^-2; end
114 K6 = (f_c * L_c/D_c) * (A0/A_c)^2;
115 K(end+1) = K6; labels{end+1} = 'Camera di calma (dist)';
116
117 %% 6) HONEYCOMB (come da tuo modello)
118 L_hc = 0.036; % [m]
119 D_hc = 0.006; % diam. idraulico cella [m]
120 t_hc = 0.0008; % spessore parete [m]
121 U_hc = U_c; % usa la sezione della camera di calma
122 Re_hc = rho*U_hc*D_hc/mu;
123 M = 0.006; % passo maglia
124 beta_hc = (1-(t_hc/M))^2;
125
126 if Re_hc < 275
127     lam_hc = 0.375*(t_hc/D_hc)^0.4*Re_hc^-0.1;
128 else
129     lam_hc = 0.214*(t_hc/D_hc)^0.4;
130 end
131
132 Khc = lam_hc*(L_hc/D_hc + 3)*(1/beta_hc)^2 + (1/beta_hc - 1)^2;

```

```

133 K7 = Khc * (A0/A_c)^2;
134 K(end+1) = K7; labels{end+1} = 'Honeycomb';
135
136 %% 7) CONVERGENTE (D_in = 120 mm -> D_out da A0), L = 150 mm
137 Lconv = 0.150;
138 Aconv_in = A_c; Dconv_in = D_c;
139 Aconv_out = A0; Dconv_out = 2*sqrt(Aconv_out/pi);
140 Aconv_med = 0.5*(Aconv_in + Aconv_out);
141 Uconv_med = Q/Aconv_med;
142 Dh_convmed = 0.5*(Dconv_in + Dconv_out);
143
144 Re_conv = rho*Uconv_med*Dh_convmed/mu;
145 fconv = 1; for n=1:10, fconv = (2*log10(Re_conv*sqrt(fconv))-0.8)^-2;
    end
146
147 % forma (Wattendorf) + distribuita
148 D_ts = sqrt(4*A0/pi);
149 K_form_conv = 0.32 * (fconv * Lconv / D_ts);
150 Kconv_dist = fconv * (Lconv / Dh_convmed);
151
152 K8 = (K_form_conv + Kconv_dist) * (A0/Aconv_med)^2;
153 K(end+1) = K8; labels{end+1} = 'Convergente (forma+dist)';
154
155 %% 8) SEZIONI COSTANTI (pre- e post-convergente)
156 % pre-conv (dopo honeycomb prima del conv)
157 L_pre = 0.030; D_pre = D_c; A_pre = A_c; U_pre = U_c;
158 K9 = (f_c * L_pre/D_pre) * (A0/A_pre)^2;
159 K(end+1) = K9; labels{end+1} = 'Tratto pre-conv (dist)';
160
161 % post-conv (prima dell'ugello)
162 D_post = 16.77e-3; A_post = pi*(D_post/2)^2;
163 U_post = Q/A_post; Re_post = rho*U_post*D_post/mu;
164 f_post = 1; for n=1:10, f_post = (2*log10(Re_post*sqrt(f_post))-0.8)
    ^-2; end
165 L_post = 0.03516; % eventuale tratto costante
166 K10 = (f_post * L_post/D_post) * (A0/A_post)^2;
167 K(end+1) = K10; labels{end+1} = 'Tratto post-conv (dist)';
168
169 %% 9) UGELLO (tratto costante) + 10) SBOCO
170 Lu = 0.01516; Du = D_post; Au = A_post; % ugello terminale
171 Ku_dist = f_post * (Lu/Du);
172 K11 = Ku_dist * (A0/Au)^2;
173 K(end+1) = K11; labels{end+1} = 'Ugello (dist)';
174
175 K12 = 1; % sbocco in ambiente
176 K(end+1) = K12; labels{end+1} = 'Sbocco (K=1)';
177

```

```

178 %% TOTALE
179 fprintf('Il coefficiente di perdita totale :\n');
180 K_tot = sum(K);
181 disp(K_tot);
182
183 fprintf('Caduta di pressione [Pa]:\n');
184 delta_p = K_tot * 0.5*rho*U0^2;
185 disp(delta_p);
186
187 fprintf('Potenza fluidodinamica [W]:\n');
188 Pd = Q*delta_p;
189 disp(Pd);

```

Listing A.3: Script MATLAB utilizzato per l'elaborazione dei dati e lo sviluppo dei grafici di confronto

```

1  clc, clear, close all
2  load('dati.mat')
3
4  fc = 5; %[Hz]
5  fs = 30000; %[Hz]
6
7  %% PRE-CAMERA DI CALMA
8  [b, a] = butter(1, fc/(fs/2), 'high'); % 'high' specifies a high-
    pass filter
9  Uf_c = filter(b, a, U_c,[],3); % Filter the signal
10 Uf_c = Uf_c(:,:,fs*10:end);
11 deltaf = 0.5; %spectral resolution
12 window = fs/deltaf;
13 overlap = 0.5*window; % Overlap
14 nfft = window; % FFT points
15 [I, J, ~] = size(U_c);
16 for i = 1:I
17     for j = 1:J
18         [pxx_c(i,j,:), f_c(i,j,:)] = pwelch(squeeze(Uf_c(i,j,:)),
            window,overlap,nfft,fs);
19     end
20 end
21
22
23 %% GALLERIE
24
25 [b, a] = butter(1, fc/(fs/2), 'high'); % 'high' specifies a high-
    pass filter
26 Uf_g = filter(b, a, U_g,[],3); % Filter the signal
27 Uf_g = Uf_g(:,:,fs*10:end);
28 deltaf = 0.5; %spectral resolution
29 window = fs/deltaf;

```

```

30 overlap = 0.5*window; % Overlap
31 nfft = window; % FFT points
32 [I, J, ~] = size(U_g);
33 for i = 1:I
34     for j = 1:J
35         [pxx_g(i,j,:), f_g(i,j,:)] = pwelch(squeeze(Uf_g(i,j,:)),
36             window,overlap,nfft,fs);
37     end
38 end
39 %% ELABORAZIONE
40
41 U_mean_c = mean(U_c,3);
42 U_mean_g = mean(U_g,3);
43
44 U_c_std = std(Uf_c,0,3);
45 U_g_std = std(Uf_g,0,3);
46
47 TI_c = 100*U_c_std./U_mean_c;
48 TI_g = 100*U_g_std./U_mean_g;
49
50 D_c = 0.100; % [m]
51 D_g = 0.01677; % [m]
52 rho = 1.225; % [kg/m^3]
53 mu = 1.81e-5; % [Pa*s]
54 Re_c = U_mean_c*D_c*rho/mu;
55 Re_g = U_mean_g*D_g*rho/mu;
56
57 %% CONFRONTO LIVELLI DI TURBOLENZA
58 configs_precamera = size(TI_c, 3); % se ogni config salvata come
59     terza dimensione
60 configs_galleria = size(TI_g, 3);
61
62 for k = 1:configs_precamera
63     T = TI_c(:,:,k);
64     fprintf('PRECAMERA %d: mean=%.3f, max=%.3f, min=%.3f\n', ...
65         k, mean(T(:),'omitnan'), max(T(:)), min(T(:)));
66 end
67
68 for k = 1:configs_galleria
69     T = TI_g(:,:,k);
70     fprintf('GALLERIA %d: mean=%.3f, max=%.3f, min=%.3f\n', ...
71         k, mean(T(:),'omitnan'), max(T(:)), min(T(:)));
72 end
73
74 %% SPETTRI - confronto delle velocit a parit di caso

```

```

75
76 %Pre-camera caso 1
77 figure(1)
78 loglog(squeeze(f_c(1,1,1:end)), squeeze(pxx_c(1,1,1:end)))
79 hold on
80 loglog(squeeze(f_c(2,1,1:end)), squeeze(pxx_c(2,1,1:end)))
81 loglog(squeeze(f_c(3,1,1:end)), squeeze(pxx_c(3,1,1:end)))
82 loglog(squeeze(f_c(4,1,1:end)), squeeze(pxx_c(4,1,1:end)))
83 xlim([1,fs/2])
84 ylim([1e-12 1])
85 ylabel('E');
86 xlabel('f');
87 title('pre-camera')
88 legend('Re_1 \approx 3300', 'Re_2 \approx 8000', 'Re_3 \approx 12500 ',
      'Re_4 \approx 16000', 'Location', 'northeast')
89 f = gcf;
90 exportgraphics(f, 'Precamera_1_f.pdf')
91
92 %Pre-camera caso 2
93 figure(2)
94 loglog(squeeze(f_c(1,2,1:end)), squeeze(pxx_c(1,2,1:end)))
95 hold on
96 loglog(squeeze(f_c(2,2,1:end)), squeeze(pxx_c(2,2,1:end)))
97 loglog(squeeze(f_c(3,2,1:end)), squeeze(pxx_c(3,2,1:end)))
98 loglog(squeeze(f_c(4,2,1:end)), squeeze(pxx_c(4,2,1:end)))
99 xlim([1,fs/2])
100 ylim([1e-12 1])
101 ylabel('E');
102 xlabel('f');
103 title('pre-camera + rete')
104 legend('Re_1 \approx 3300', 'Re_2 \approx 8000', 'Re_3 \approx 12500 ',
      'Re_4 \approx 16000', 'Location', 'northeast')
105 f = gcf;
106 exportgraphics(f, 'Precamera_2_f.pdf')
107
108 %Pre-camera caso 4
109 figure(3)
110 loglog(squeeze(f_c(1,4,1:end)), squeeze(pxx_c(1,4,1:end)))
111 hold on
112 loglog(squeeze(f_c(2,4,1:end)), squeeze(pxx_c(2,4,1:end)))
113 loglog(squeeze(f_c(3,4,1:end)), squeeze(pxx_c(3,4,1:end)))
114 loglog(squeeze(f_c(4,4,1:end)), squeeze(pxx_c(4,4,1:end)))
115 xlim([1,fs/2])
116 ylim([1e-12 1])
117 ylabel('E');
118 xlabel('f');
119 title('pre-camera + diffusore')

```

```

120 legend('Re_1 \approx 2400', 'Re_2 \approx 4000', 'Re_3 \approx 6200 ',
        'Re_4 \approx 8000', 'Location', 'northeast')
121 f = gcf;
122 exportgraphics(f, 'Precamera_4_f.pdf')
123
124 %Pre-camera caso 3
125 figure(4)
126 loglog(squeeze(f_c(1,3,1:end)), squeeze(pxx_c(1,3,1:end)))
127 hold on
128 loglog(squeeze(f_c(2,3,1:end)), squeeze(pxx_c(2,3,1:end)))
129 loglog(squeeze(f_c(3,3,1:end)), squeeze(pxx_c(3,3,1:end)))
130 loglog(squeeze(f_c(4,3,1:end)), squeeze(pxx_c(4,3,1:end)))
131 xlim([1,fs/2])
132 ylim([1e-12 1])
133 ylabel('E');
134 xlabel('f');
135 title('pre-camera + rete + diffusore ')
136 legend('Re_1 \approx 2400', 'Re_2 \approx 4000', 'Re_3 \approx 6200 ',
        'Re_4 \approx 8000', 'Location', 'northeast')
137 f = gcf;
138 exportgraphics(f, 'Precamera_3_f.pdf')
139
140
141 %% Gallerie
142
143 figure(5)
144 loglog(squeeze(f_g(1,1,1:end)), squeeze(pxx_g(1,1,1:end)))
145 hold on
146 loglog(squeeze(f_g(2,1,1:end)), squeeze(pxx_g(2,1,1:end)))
147 loglog(squeeze(f_g(3,1,1:end)), squeeze(pxx_g(3,1,1:end)))
148 loglog(squeeze(f_g(4,1,1:end)), squeeze(pxx_g(4,1,1:end)))
149 xlim([1,fs/2])
150 ylim([1e-12 1])
151 ylabel('E');
152 xlabel('f');
153 title('galleria originale')
154 legend('Re_1 \approx 6000', 'Re_2 \approx 12000', 'Re_3 \approx 17000',
        'Re_4 \approx 22000', 'Location', 'northeast')
155
156 f = gcf;
157 exportgraphics(f, 'Galleria_1_f.pdf')
158
159 figure(6)
160 loglog(squeeze(f_g(1,2,1:end)), squeeze(pxx_g(1,2,1:end)))
161 hold on
162 loglog(squeeze(f_g(2,2,1:end)), squeeze(pxx_g(2,2,1:end)))
163 loglog(squeeze(f_g(3,2,1:end)), squeeze(pxx_g(3,2,1:end)))

```

```

164 loglog(squeeze(f_g(4,2,1:end)), squeeze(pxx_g(4,2,1:end)))
165 xlim([1,fs/2])
166 ylim([1e-12 1])
167 ylabel('E');
168 xlabel('f');
169 title('galleria modificata')
170 legend('Re_1 \approx 6000', 'Re_2 \approx 12000', 'Re_3 \approx 17000',
        'Re_4 \approx 22000', 'Location', 'northeast')
171
172 f = gcf;
173 exportgraphics(f, 'Galleria_2_f.pdf')
174
175 figure(7)
176 loglog(squeeze(f_g(1,3,1:end)), squeeze(pxx_g(1,3,1:end)))
177 hold on
178 loglog(squeeze(f_g(2,3,1:end)), squeeze(pxx_g(2,3,1:end)))
179 loglog(squeeze(f_g(3,3,1:end)), squeeze(pxx_g(3,3,1:end)))
180 loglog(squeeze(f_g(4,3,1:end)), squeeze(pxx_g(4,3,1:end)))
181 xlim([1,fs/2])
182 ylim([1e-12 1])
183 ylabel('E');
184 xlabel('f');
185 title('galleria modificata + rete')
186 legend('Re_1 \approx 6000', 'Re_2 \approx 12000', 'Re_3 \approx 17000',
        'Re_4 \approx 22000', 'Location', 'northeast')
187
188 f = gcf;
189 exportgraphics(f, 'Galleria_3_f.pdf')
190
191 %% SPETTRI - confronto dei casi a parit di velocit
192
193 %Pre-camera
194 figure(8)
195 loglog(squeeze(f_c(1,1,1:end)), squeeze(pxx_c(1,1,1:end)))
196 hold on
197 loglog(squeeze(f_c(1,2,1:end)), squeeze(pxx_c(1,2,1:end)))
198 loglog(squeeze(f_c(1,3,1:end)), squeeze(pxx_c(1,3,1:end)))
199 loglog(squeeze(f_c(1,4,1:end)), squeeze(pxx_c(1,4,1:end)))
200 xlim([1,fs/2])
201 ylim([1e-12 1])
202 ylabel('E');
203 xlabel('f');
204 title('pre-camera - Re_1 \approx 3300')
205 legend('pre-camera', 'pre-camera + rete', 'pre-camera + rete +
        diffusore', 'pre-camera + diffusore', 'Location', 'northeast')
206 f = gcf;
207 exportgraphics(f, 'Precamera_Re_1_f.pdf')

```

```

208
209 figure(9)
210 loglog(squeeze(f_c(2,1,1:end)), squeeze(pxx_c(2,1,1:end)))
211 hold on
212 loglog(squeeze(f_c(2,2,1:end)), squeeze(pxx_c(2,2,1:end)))
213 loglog(squeeze(f_c(2,3,1:end)), squeeze(pxx_c(2,3,1:end)))
214 loglog(squeeze(f_c(2,4,1:end)), squeeze(pxx_c(2,4,1:end)))
215 xlim([1,fs/2])
216 ylim([1e-12 1])
217 ylabel('E');
218 xlabel('f');
219 title('pre-camera - Re_2 \approx 8000')
220 legend('pre-camera', 'pre-camera + rete', 'pre-camera + rete +
        diffusore' , 'pre-camera + diffusore', 'Location', 'northeast')
221 f = gcf;
222 exportgraphics(f, 'Precamera_Re_2_f.pdf')
223
224 figure(10)
225 loglog(squeeze(f_c(3,1,1:end)), squeeze(pxx_c(3,1,1:end)))
226 hold on
227 loglog(squeeze(f_c(3,2,1:end)), squeeze(pxx_c(3,2,1:end)))
228 loglog(squeeze(f_c(3,3,1:end)), squeeze(pxx_c(3,3,1:end)))
229 loglog(squeeze(f_c(3,4,1:end)), squeeze(pxx_c(3,4,1:end)))
230 xlim([1,fs/2])
231 ylim([1e-12 1])
232 ylabel('E');
233 xlabel('f');
234 title('pre-camera - Re_3 \approx 12500')
235 legend('pre-camera', 'pre-camera + rete', 'pre-camera + rete +
        diffusore' , 'pre-camera + diffusore', 'Location', 'northeast')
236 f = gcf;
237 exportgraphics(f, 'Precamera_Re_3_f.pdf')
238
239 figure(11)
240 loglog(squeeze(f_c(4,1,1:end)), squeeze(pxx_c(4,1,1:end)))
241 hold on
242 loglog(squeeze(f_c(4,2,1:end)), squeeze(pxx_c(4,2,1:end)))
243 loglog(squeeze(f_c(4,3,1:end)), squeeze(pxx_c(4,3,1:end)))
244 loglog(squeeze(f_c(4,4,1:end)), squeeze(pxx_c(4,4,1:end)))
245 xlim([1,fs/2])
246 ylim([1e-12 1])
247 ylabel('E');
248 xlabel('f');
249 title('pre-camera - Re_4 \approx 16000')
250 legend('pre-camera', 'pre-camera + rete', 'pre-camera + rete +
        diffusore' , 'pre-camera + diffusore', 'Location', 'northeast')
251 f = gcf;

```

```

252 exportgraphics(f, 'Precamera_Re_4_f.pdf')
253
254 %% Gallerie
255
256 figure(12)
257 loglog(squeeze(f_g(1,1,1:end)), squeeze(pxx_g(1,1,1:end)))
258 hold on
259 loglog(squeeze(f_g(1,2,1:end)), squeeze(pxx_g(1,2,1:end)))
260 loglog(squeeze(f_g(1,3,1:end)), squeeze(pxx_g(1,3,1:end)))
261 xlim([1,fs/2])
262 ylim([1e-12 1])
263 ylabel('E');
264 xlabel('f');
265 title('Gallerie - Re_1 \approx 6000')
266 legend('Originale', 'Modificata', 'Modificata + rete', 'Location', '
        northeast')
267 f = gcf;
268 exportgraphics(f, 'Gallerie_Re_1_f.pdf')
269
270 figure(13)
271 loglog(squeeze(f_g(2,1,1:end)), squeeze(pxx_g(2,1,1:end)))
272 hold on
273 loglog(squeeze(f_g(2,2,1:end)), squeeze(pxx_g(2,2,1:end)))
274 loglog(squeeze(f_g(2,3,1:end)), squeeze(pxx_g(2,3,1:end)))
275 xlim([1,fs/2])
276 ylim([1e-12 1])
277 ylabel('E');
278 xlabel('f');
279 title('Gallerie - Re_2 \approx 12000')
280 legend('Originale', 'Modificata', 'Modificata + rete', 'Location', '
        northeast')
281 f = gcf;
282 exportgraphics(f, 'Gallerie_Re_2_f.pdf')
283
284
285 figure(14)
286 loglog(squeeze(f_g(3,1,1:end)), squeeze(pxx_g(3,1,1:end)))
287 hold on
288 loglog(squeeze(f_g(3,2,1:end)), squeeze(pxx_g(3,2,1:end)))
289 loglog(squeeze(f_g(3,3,1:end)), squeeze(pxx_g(3,3,1:end)))
290 xlim([1,fs/2])
291 ylim([1e-12 1])
292 ylabel('E');
293 xlabel('f');
294 title('Gallerie - Re_3 \approx 17000')
295 legend('Originale', 'Modificata', 'Modificata + rete', 'Location', '
        northeast')

```

```

296 f = gcf;
297 exportgraphics(f, 'Gallerie_Re_3_f.pdf')
298
299 figure(15)
300 loglog(squeeze(f_g(4,1,1:end)), squeeze(pxx_g(4,1,1:end)))
301 hold on
302 loglog(squeeze(f_g(4,2,1:end)), squeeze(pxx_g(4,2,1:end)))
303 loglog(squeeze(f_g(4,3,1:end)), squeeze(pxx_g(4,3,1:end)))
304 xlim([1,fs/2])
305 ylim([1e-12 1])
306 ylabel('E');
307 xlabel('f');
308 title('Gallerie - Re_4 \approx 22000')
309 legend('Originale', 'Modificata', 'Modificata + rete', 'Location', '
    northeast')
310 f = gcf;
311 exportgraphics(f, 'Gallerie_Re_4_f.pdf')
312
313
314
315 %% SPETTRI ADIM. - studio delle configurazioni al variare della
    velocit
316 St_c = f_c * D_c ./ U_mean_c;
317 E_c_adim = pxx_c ./ U_mean_c.^2;
318 St_g = f_g * D_g ./ U_mean_g;
319 E_g_adim = pxx_g ./ U_mean_g.^2;
320
321 %%
322 %pre-camera - adim.
323 figure(16)
324
325 loglog(squeeze(St_c(1,1,1:end)), squeeze(E_c_adim(1,1,1:end)))
326 hold on
327 loglog(squeeze(St_c(2,1,1:end)), squeeze(E_c_adim(2,1,1:end)))
328 loglog(squeeze(St_c(3,1,1:end)), squeeze(E_c_adim(3,1,1:end)))
329 loglog(squeeze(St_c(4,1,1:end)), squeeze(E_c_adim(4,1,1:end)))
330 xlim([.1,5000])
331 ylim([1e-12 1e-2])
332 ylabel('E/(U_b)^2');
333 xlabel('St');
334 title('pre-camera')
335 legend('Re_1 \approx 3300', 'Re_2 \approx 8000', 'Re_3 \approx 12500 ',
    'Re_4 \approx 16000', 'Location', 'northeast')
336 f = gcf;
337 exportgraphics(f, 'Precamera_velocit_1.pdf')
338
339 figure(17)

```

```

340 loglog(squeeze(St_c(1,2,1:end)), squeeze(E_c_adim(1,2,1:end)))
341 hold on
342 loglog(squeeze(St_c(2,2,1:end)), squeeze(E_c_adim(2,2,1:end)))
343 loglog(squeeze(St_c(3,2,1:end)), squeeze(E_c_adim(3,2,1:end)))
344 loglog(squeeze(St_c(4,2,1:end)), squeeze(E_c_adim(4,2,1:end)))
345 xlim([.1,5000])
346 ylim([1e-12 1e-2])
347 ylabel('E/(U_b)^2');
348 xlabel('St');
349 title('pre-camera + rete')
350 legend('Re_1 \approx 3300', 'Re_2 \approx 8000', 'Re_3 \approx 12500 ',
        'Re_4 \approx 16000', 'Location', 'northeast')
351 f = gcf;
352 exportgraphics(f, 'Precamera_velocit_2.pdf')
353
354 figure(18)
355 loglog(squeeze(St_c(1,3,1:end)), squeeze(E_c_adim(1,3,1:end)))
356 hold on
357 loglog(squeeze(St_c(2,3,1:end)), squeeze(E_c_adim(2,3,1:end)))
358 loglog(squeeze(St_c(3,3,1:end)), squeeze(E_c_adim(3,3,1:end)))
359 loglog(squeeze(St_c(4,3,1:end)), squeeze(E_c_adim(4,3,1:end)))
360 xlim([.1,5000])
361 ylim([1e-12 1e-2])
362 ylabel('E/(U_b)^2');
363 xlabel('St');
364 title('pre-camera + diffusore + rete')
365 legend('Re_1 \approx 2400', 'Re_2 \approx 4000', 'Re_3 \approx 6200 ',
        'Re_4 \approx 8000', 'Location', 'northeast')
366 f = gcf;
367 exportgraphics(f, 'Precamera_velocit_3.pdf')
368
369 figure(19)
370 loglog(squeeze(St_c(1,4,1:end)), squeeze(E_c_adim(1,4,1:end)))
371 hold on
372 loglog(squeeze(St_c(2,4,1:end)), squeeze(E_c_adim(2,4,1:end)))
373 loglog(squeeze(St_c(3,4,1:end)), squeeze(E_c_adim(3,4,1:end)))
374 loglog(squeeze(St_c(4,4,1:end)), squeeze(E_c_adim(4,4,1:end)))
375 xlim([.1,5000])
376 ylim([1e-12 1e-2])
377 ylabel('E/(U_b)^2');
378 xlabel('St');
379 title('pre-camera + diffusore')
380 legend('Re_1 \approx 2400', 'Re_2 \approx 4000', 'Re_3 \approx 6200 ',
        'Re_4 \approx 8000', 'Location', 'northeast');
381 f = gcf;
382 exportgraphics(f, 'Precamera_velocit_4.pdf')
383

```

```

384 %% Gallerie - adim.
385
386 figure(20)
387 loglog(squeeze(St_g(1,1,1:end)), squeeze(E_g_adim(1,1,1:end)))
388 hold on
389 loglog(squeeze(St_g(2,1,1:end)), squeeze(E_g_adim(2,1,1:end)))
390 loglog(squeeze(St_g(3,1,1:end)), squeeze(E_g_adim(3,1,1:end)))
391 loglog(squeeze(St_g(4,1,1:end)), squeeze(E_g_adim(4,1,1:end)))
392
393 xlim([.01,50])
394 ylim([1e-14 1e-4])
395 ylabel('E/(U_b)^2');
396 xlabel('St');
397 title('galleria originale')
398 legend('Re_1 \approx 6000', 'Re_2 \approx 12000', 'Re_3 \approx 17000',
        'Re_4 \approx 22000', 'Location', 'northeast')
399
400 f = gcf;
401 exportgraphics(f, 'Gallerie_velocit_1.pdf')
402
403
404 figure(21)
405 loglog(squeeze(St_g(1,2,1:end)), squeeze(E_g_adim(1,2,1:end)))
406 hold on
407 loglog(squeeze(St_g(2,2,1:end)), squeeze(E_g_adim(2,2,1:end)))
408 loglog(squeeze(St_g(3,2,1:end)), squeeze(E_g_adim(3,2,1:end)))
409 loglog(squeeze(St_g(4,2,1:end)), squeeze(E_g_adim(4,2,1:end)))
410
411 xlim([.01,50])
412 ylim([1e-14 1e-4])
413 ylabel('E/(U_b)^2');
414 xlabel('St');
415 title('galleria modificata')
416 legend('Re_1 \approx 6000', 'Re_2 \approx 12000', 'Re_3 \approx 17000',
        'Re_4 \approx 22000', 'Location', 'northeast')
417
418 f = gcf;
419 exportgraphics(f, 'Gallerie_velocit_2.pdf')
420
421
422 figure(22)
423 loglog(squeeze(St_g(1,3,1:end)), squeeze(E_g_adim(1,3,1:end)))
424 hold on
425 loglog(squeeze(St_g(2,3,1:end)), squeeze(E_g_adim(2,3,1:end)))
426 loglog(squeeze(St_g(3,3,1:end)), squeeze(E_g_adim(3,3,1:end)))
427 loglog(squeeze(St_g(4,3,1:end)), squeeze(E_g_adim(4,3,1:end)))
428

```

```

429 xlim([.01,50])
430 ylim([1e-14 1e-4])
431 ylabel('E/(U_b)^2');
432 xlabel('St');
433 title('galleria modificata + rete')
434 legend('Re_1 \approx 6000','Re_2 \approx 12000','Re_3 \approx 17000',
        'Re_4 \approx 22000','Location','northeast')
435
436 f = gcf;
437 exportgraphics(f,'Gallerie_velocit_3.pdf')
438
439
440 %% SPETTRI ADIM. - confronto dei casi a parit di velocit
441
442 % Pre-camera
443 figure(23)
444 loglog(squeeze(St_c(1,1,1:end)), squeeze(E_c_adim(1,1,1:end)))
445 hold on
446 loglog(squeeze(St_c(1,2,1:end)), squeeze(E_c_adim(1,2,1:end)))
447 loglog(squeeze(St_c(1,3,1:end)), squeeze(E_c_adim(1,3,1:end)))
448 loglog(squeeze(St_c(1,4,1:end)), squeeze(E_c_adim(1,4,1:end)))
449 xlim([.1,4300])
450 ylim([1e-12 1e-2])
451 ylabel('E/(U_b)^2');
452 xlabel('St');
453 title('pre-camera - Re_1 \approx 3300')
454 legend('pre-camera','pre-camera + rete','pre-camera + rete +
        diffusore','pre-camera + diffusore','Location','northeast')
455 f = gcf;
456 exportgraphics(f,'Precamera_Re_1.pdf')
457
458 figure(24)
459 loglog(squeeze(St_c(2,1,1:end)), squeeze(E_c_adim(2,1,1:end)))
460 hold on
461 loglog(squeeze(St_c(2,2,1:end)), squeeze(E_c_adim(2,2,1:end)))
462 loglog(squeeze(St_c(2,3,1:end)), squeeze(E_c_adim(2,3,1:end)))
463 loglog(squeeze(St_c(2,4,1:end)), squeeze(E_c_adim(2,4,1:end)))
464 xlim([.1,4300])
465 ylim([1e-12 1e-2])
466 ylabel('E/(U_b)^2');
467 xlabel('St');
468 title('pre-camera - Re_2 \approx 8000')
469 legend('pre-camera','pre-camera + rete','pre-camera + rete +
        diffusore','pre-camera + diffusore','Location','northeast')
470 f = gcf;
471 exportgraphics(f,'Precamera_Re_2.pdf')
472

```

```

473 figure(25)
474 loglog(squeeze(St_c(3,1,1:end)), squeeze(E_c_adim(3,1,1:end)))
475 hold on
476 loglog(squeeze(St_c(3,2,1:end)), squeeze(E_c_adim(3,2,1:end)))
477 loglog(squeeze(St_c(3,3,1:end)), squeeze(E_c_adim(3,3,1:end)))
478 loglog(squeeze(St_c(3,4,1:end)), squeeze(E_c_adim(3,4,1:end)))
479 xlim([.1,4300])
480 ylim([1e-12 1e-2])
481 ylabel('E/(U_b)^2');
482 xlabel('St');
483 title('pre-camera - Re_3 \approx 12500')
484 legend('pre-camera', 'pre-camera + rete', 'pre-camera + rete +
         diffusore', 'pre-camera + diffusore', 'Location', 'northeast')
485 f = gcf;
486 exportgraphics(f, 'Precamera_Re_3.pdf')
487
488 figure(26)
489 loglog(squeeze(St_c(4,1,1:end)), squeeze(E_c_adim(4,1,1:end)))
490 hold on
491 loglog(squeeze(St_c(4,2,1:end)), squeeze(E_c_adim(4,2,1:end)))
492 loglog(squeeze(St_c(4,3,1:end)), squeeze(E_c_adim(4,3,1:end)))
493 loglog(squeeze(St_c(4,4,1:end)), squeeze(E_c_adim(4,4,1:end)))
494 xlim([.1,4300])
495 ylim([1e-12 1e-2])
496 ylabel('E/(U_b)^2');
497 xlabel('St');
498 title('pre-camera - Re_4 \approx 16000')
499 legend('pre-camera', 'pre-camera + rete', 'pre-camera + rete +
         diffusore', 'pre-camera + diffusore', 'Location', 'northeast')
500 f = gcf;
501 exportgraphics(f, 'Precamera_Re_4.pdf')
502
503 %% Gallerie
504 figure(27)
505 loglog(squeeze(St_g(1,1,1:end)), squeeze(E_g_adim(1,1,1:end)))
506 hold on
507 loglog(squeeze(St_g(1,2,1:end)), squeeze(E_g_adim(1,2,1:end)))
508 loglog(squeeze(St_g(1,3,1:end)), squeeze(E_g_adim(1,3,1:end)))
509 xlim([.01,25])
510 ylim([1e-13 1e-4])
511 ylabel('E/(U_b)^2');
512 xlabel('St');
513 title('Gallerie - Re_1 \approx 6000')
514 legend('Originale', 'Modificata', 'Modificata + rete', 'Location', '
         northeast')
515 f = gcf;
516 exportgraphics(f, 'Gallerie_Re_1.pdf')

```

```

517
518 figure(28)
519 loglog(squeeze(St_g(2,1,1:end)), squeeze(E_g_adim(2,1,1:end)))
520 hold on
521 loglog(squeeze(St_g(2,2,1:end)), squeeze(E_g_adim(2,2,1:end)))
522 loglog(squeeze(St_g(2,3,1:end)), squeeze(E_g_adim(2,3,1:end)))
523 xlim([.01,25])
524 ylim([1e-13 1e-4])
525 ylabel('E/(U_b)^2');
526 xlabel('St');
527 title('Gallerie - Re_2 \approx 12000')
528 legend('Originale', 'Modificata', 'Modificata + rete', 'Location', '
    northeast')
529 f = gcf;
530 exportgraphics(f, 'Gallerie_Re_2.pdf')
531
532 figure(29)
533 loglog(squeeze(St_g(3,1,1:end)), squeeze(E_g_adim(3,1,1:end)))
534 hold on
535 loglog(squeeze(St_g(3,2,1:end)), squeeze(E_g_adim(3,2,1:end)))
536 loglog(squeeze(St_g(3,3,1:end)), squeeze(E_g_adim(3,3,1:end)))
537 xlim([.01,25])
538 ylim([1e-13 1e-4])
539 ylabel('E/(U_b)^2');
540 xlabel('St');
541 title('Gallerie - Re_3 \approx 17000')
542 legend('Originale', 'Modificata', 'Modificata + rete', 'Location', '
    northeast')
543 f = gcf;
544 exportgraphics(f, 'Gallerie_Re_3.pdf')
545
546 figure(30)
547 loglog(squeeze(St_g(4,1,1:end)), squeeze(E_g_adim(4,1,1:end)))
548 hold on
549 loglog(squeeze(St_g(4,2,1:end)), squeeze(E_g_adim(4,2,1:end)))
550 loglog(squeeze(St_g(4,3,1:end)), squeeze(E_g_adim(4,3,1:end)))
551 xlim([.01,25])
552 ylim([1e-13 1e-4])
553 ylabel('E/(U_b)^2');
554 xlabel('St');
555 title('Gallerie - Re_4 \approx 22000')
556 legend('Originale', 'Modificata', 'Modificata + rete', 'Location', '
    northeast')
557 f = gcf;
558 exportgraphics(f, 'Gallerie_Re_4.pdf')
559
560 %% SPETTRI ADIM. premoltiplicati - studio delle configurazioni al

```

```

    variare della velocit
561
562 %pre-camera - adim.
563 figure(39)
564
565 semilogx(squeeze(St_c(1,1,1:end)), squeeze(St_c(1,1,1:end)).*squeeze
    (E_c_adim(1,1,1:end)))
566 hold on
567 semilogx(squeeze(St_c(2,1,1:end)), squeeze(St_c(2,1,1:end)).*squeeze
    (E_c_adim(2,1,1:end)))
568 semilogx(squeeze(St_c(3,1,1:end)), squeeze(St_c(3,1,1:end)).*squeeze
    (E_c_adim(3,1,1:end)))
569 semilogx(squeeze(St_c(4,1,1:end)), squeeze(St_c(4,1,1:end)).*squeeze
    (E_c_adim(4,1,1:end)))
570
571 xlim([1e-1 1e2])
572 ylim([0 5e-3])
573 ylabel('St * E/(U_b)^2');
574 xlabel('St');
575 title('pre-camera')
576 legend('Re_1 \approx 3300', 'Re_2 \approx 8000', 'Re_3 \approx 12500 ',
    'Re_4 \approx 16000', 'Location', 'northeast')
577
578 f = gcf;
579 exportgraphics(f, 'Precamera_velocit_1_premolt.pdf')
580
581
582 figure(40)
583
584 semilogx(squeeze(St_c(1,2,1:end)), squeeze(St_c(1,2,1:end)).*squeeze
    (E_c_adim(1,2,1:end)))
585 hold on
586 semilogx(squeeze(St_c(2,2,1:end)), squeeze(St_c(2,2,1:end)).*squeeze
    (E_c_adim(2,2,1:end)))
587 semilogx(squeeze(St_c(3,2,1:end)), squeeze(St_c(3,2,1:end)).*squeeze
    (E_c_adim(3,2,1:end)))
588 semilogx(squeeze(St_c(4,2,1:end)), squeeze(St_c(4,2,1:end)).*squeeze
    (E_c_adim(4,2,1:end)))
589
590 xlim([1e-1 1e2])
591 ylim([0 5e-3])
592 ylabel('St * E/(U_b)^2');
593 xlabel('St');
594 title('pre-camera + rete')
595 legend('Re_1 \approx 3300', 'Re_2 \approx 8000', 'Re_3 \approx 12500 ',
    'Re_4 \approx 16000', 'Location', 'northeast')
596

```

```

597 f = gcf;
598 exportgraphics(f, 'Precamera_velocit_2_premolt.pdf')
599
600
601 figure(41)
602
603 semilogx(squeeze(St_c(1,3,1:end)), squeeze(St_c(1,3,1:end)).*squeeze
        (E_c_adim(1,3,1:end)))
604 hold on
605 semilogx(squeeze(St_c(2,3,1:end)), squeeze(St_c(2,3,1:end)).*squeeze
        (E_c_adim(2,3,1:end)))
606 semilogx(squeeze(St_c(3,3,1:end)), squeeze(St_c(3,3,1:end)).*squeeze
        (E_c_adim(3,3,1:end)))
607 semilogx(squeeze(St_c(4,3,1:end)), squeeze(St_c(4,3,1:end)).*squeeze
        (E_c_adim(4,3,1:end)))
608
609 xlim([1e-1 1e2])
610 ylim([0 5e-3])
611 ylabel('St * E/(U_b)^2');
612 xlabel('St');
613 title('pre-camera + diffusore + rete')
614 legend('Re_1 \approx 2400', 'Re_2 \approx 4000', 'Re_3 \approx 6200 ',
        'Re_4 \approx 8000', 'Location', 'northeast')
615
616 f = gcf;
617 exportgraphics(f, 'Precamera_velocit_3_premolt.pdf')
618
619
620 figure(42)
621
622 semilogx(squeeze(St_c(1,4,1:end)), squeeze(St_c(1,4,1:end)).*squeeze
        (E_c_adim(1,4,1:end)))
623 hold on
624 semilogx(squeeze(St_c(2,4,1:end)), squeeze(St_c(2,4,1:end)).*squeeze
        (E_c_adim(2,4,1:end)))
625 semilogx(squeeze(St_c(3,4,1:end)), squeeze(St_c(3,4,1:end)).*squeeze
        (E_c_adim(3,4,1:end)))
626 semilogx(squeeze(St_c(4,4,1:end)), squeeze(St_c(4,4,1:end)).*squeeze
        (E_c_adim(4,4,1:end)))
627
628 xlim([1e-1 1e2])
629 ylim([0 5e-3])
630 ylabel('St * E/(U_b)^2');
631 xlabel('St');
632 title('pre-camera + diffusore')
633 legend('Re_1 \approx 2400', 'Re_2 \approx 4000', 'Re_3 \approx 6200 ',
        'Re_4 \approx 8000', 'Location', 'northeast');

```

```

634
635 f = gcf;
636 exportgraphics(f, 'Precamera_velocit_4_premolt.pdf')
637
638
639 %% Gallerie premolt.
640
641 figure(43)
642
643 semilogx(squeeze(St_g(1,1,1:end)), squeeze(St_g(1,1,1:end)).*squeeze
        (E_g_adim(1,1,1:end)))
644 hold on
645 semilogx(squeeze(St_g(2,1,1:end)), squeeze(St_g(2,1,1:end)).*squeeze
        (E_g_adim(2,1,1:end)))
646 semilogx(squeeze(St_g(3,1,1:end)), squeeze(St_g(3,1,1:end)).*squeeze
        (E_g_adim(3,1,1:end)))
647 semilogx(squeeze(St_g(4,1,1:end)), squeeze(St_g(4,1,1:end)).*squeeze
        (E_g_adim(4,1,1:end)))
648
649 xlim([1e-3 1e1])
650 ylim([0 2.5e-7])
651 ylabel('St * E/(U_b)^2');
652 xlabel('St');
653 title('galleria originale')
654 legend('Re_1 \approx 6000', 'Re_2 \approx 12000', 'Re_3 \approx 17000',
        'Re_4 \approx 22000', 'Location', 'northeast')
655
656 f = gcf;
657 exportgraphics(f, 'Gallerie_velocit_1_premolt.pdf')
658
659
660 figure(44)
661
662 semilogx(squeeze(St_g(1,2,1:end)), squeeze(St_g(1,2,1:end)).*squeeze
        (E_g_adim(1,2,1:end)))
663 hold on
664 semilogx(squeeze(St_g(2,2,1:end)), squeeze(St_g(2,2,1:end)).*squeeze
        (E_g_adim(2,2,1:end)))
665 semilogx(squeeze(St_g(3,2,1:end)), squeeze(St_g(3,2,1:end)).*squeeze
        (E_g_adim(3,2,1:end)))
666 semilogx(squeeze(St_g(4,2,1:end)), squeeze(St_g(4,2,1:end)).*squeeze
        (E_g_adim(4,2,1:end)))
667 xlim([1e-3 1e1])
668 ylim([0 2.5e-7])
669 ylabel('St * E/(U_b)^2');
670 xlabel('St');
671 title('galleria modificata')

```

```

672 legend('Re_1 \approx 6000', 'Re_2 \approx 12000', 'Re_3 \approx 17000',
        'Re_4 \approx 22000', 'Location', 'northeast')
673
674 f = gcf;
675 exportgraphics(f, 'Gallerie_velocit_2_premolt.pdf')
676
677
678 figure(45)
679
680 semilogx(squeeze(St_g(1,3,1:end)), squeeze(St_g(1,3,1:end)).*squeeze
        (E_g_adim(1,3,1:end)))
681 hold on
682 semilogx(squeeze(St_g(2,3,1:end)), squeeze(St_g(2,3,1:end)).*squeeze
        (E_g_adim(2,3,1:end)))
683 semilogx(squeeze(St_g(3,3,1:end)), squeeze(St_g(3,3,1:end)).*squeeze
        (E_g_adim(3,3,1:end)))
684 semilogx(squeeze(St_g(4,3,1:end)), squeeze(St_g(4,3,1:end)).*squeeze
        (E_g_adim(4,3,1:end)))
685
686 xlim([1e-3 1e1])
687 ylim([0 2.5e-7])
688 ylabel('St * E/(U_b)^2');
689 xlabel('St');
690 title('galleria modificata + rete')
691 legend('Re_1 \approx 6000', 'Re_2 \approx 12000', 'Re_3 \approx 17000',
        'Re_4 \approx 22000', 'Location', 'northeast')
692
693 f = gcf;
694 exportgraphics(f, 'Gallerie_velocit_3_premolt.pdf')
695
696
697 %% Rapporto la galleria modificata con la galleria originale, per
        osservare la variazione energetica in dipendenza della frequenza
698
699 %aumento la finestra del pwelch delle gallerie (modifico deltaf)
700 [b, a] = butter(1, fc/(fs/2), 'high'); % 'high' specifies a high-
        pass filter
701 Uf_g = filter(b, a, U_g, [], 3); % Filter the signal
702 Uf_g = Uf_g(:, :, fs*10:end);
703 deltaf = 5; %spectral resolution
704 window = fs/deltaf;
705 overlap = round(0.5*window); % Overlap
706 nfft = window; % FFT points
707 % lunghezza PSD one-sided
708 K = floor(nfft/2) + 1;
709 [I, J, ~] = size(U_g);
710 pxx_g = zeros(I, J, K);

```

```

711 f_g = zeros(I, J, K);
712 for i = 1:I
713     for j = 1:J
714         [pxx_g(i,j,:), f_g(i,j,:)] = pwelch(squeeze(Uf_g(i,j,:)),
715             window,overlap,nfft,fs);
716     end
717 end
718 St_g = f_g * D_g ./ U_mean_g;
719 E_g_adim = pxx_g ./ U_mean_g.^2;
720
721 figure(46)
722 loglog(squeeze(St_g(1,2,1:end)), squeeze(E_g_adim(1,2,1:end))./
723     squeeze(E_g_adim(1,1,1:end)))
724 hold on
725 loglog(squeeze(St_g(2,2,1:end)), squeeze(E_g_adim(2,2,1:end))./
726     squeeze(E_g_adim(2,1,1:end)))
727 loglog(squeeze(St_g(3,2,1:end)), squeeze(E_g_adim(3,2,1:end))./
728     squeeze(E_g_adim(3,1,1:end)))
729 loglog(squeeze(St_g(4,2,1:end)), squeeze(E_g_adim(4,2,1:end))./
730     squeeze(E_g_adim(4,1,1:end)))
731
732 xlim([.01,50])
733 ylim([1e-3 1e4])
734 ylabel('% E/(U_b)^2');
735 xlabel('St');
736 title('galleria modificata / galleria orignale')
737 legend('Re_1 \approx 6000', 'Re_2 \approx 12000', 'Re_3 \approx 17000',
738     'Re_4 \approx 22000', 'Location', 'northeast')
739
740 f = gcf;
741 exportgraphics(f, 'Rapporto_gallerie.pdf')

```

Bibliografia

- [1] NASA. *Open return wind tunnel*. URL: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunoret.html>.
- [2] NASA. *Closed return wind tunnel*. URL: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tuncret.html>.
- [3] Imperial College London. *1969 - The development of the 'Bradshaw' blower*. URL: <https://www.imperial.ac.uk/aeronautics/about/low-speed-wind-tunnels-at-imperial-college/>.
- [4] Alan Pope Jewel B. Barlow William H. Rae Jr. *Low-speed wind tunnel testing*. 3^a ed. 1966.
- [5] Luca Franceschelli. *Anemometri a filo caldo: studio e progettazione di un sistema di calibrazione*. Rapp. tecn. Alma Mater Studiorum Università di Bologna, 2018.
- [6] Cengel Yunus A.; Cimbala John M.; Cozzo G. (curatore); Santoro C. (curatore). *Meccanica dei fluidi*. McGraw Hill, 2015.
- [7] Ankara University. *Fluid Mechanics*. URL: https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/16645/mod_resource/content/1/WEEK%2013%20OF%20AQS110%20FLUID%20MECHANICS.pdf.
- [8] Wikipedia. *Equazione di Darcy-Weisbach*. URL: https://it.wikipedia.org/wiki/Equazione_di_Darcy-Weisbach.
- [9] Wikipedia. *Trasformata di Fourier veloce*. URL: https://it.wikipedia.org/wiki/Trasformata%5C_di%5C_Fourier%5C_veloce.
- [10] Stack Exchange. *What are pre-multiplied energy spectra?* URL: [https://physics.stackexchange.com/questions/178638/what-are-pre-multiplied-energy-spectra#:~:text=A%20quick%20google%20research%20\(link,the%20Kolmogorov%20constance%2C%20for%20instance..](https://physics.stackexchange.com/questions/178638/what-are-pre-multiplied-energy-spectra#:~:text=A%20quick%20google%20research%20(link,the%20Kolmogorov%20constance%2C%20for%20instance..)