

**ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITA' DI BOLOGNA**

SCUOLA DI INGEGNERIA
- Sede di Forlì -
CORSO DI LAUREA
IN INGEGNERIA AEROSPAZIALE
Classe L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA
In: Aerodinamica degli Aeromobili

**Realizzazione di un sistema di controllo del flusso mediante
eccitazione acustica**

CANDIDATO
Lorenzo Bascucci

RELATORE
Prof. Alessandro Talamelli

Anno Accademico 2023-2024

Sommario

Il presente lavoro di tesi si articola sostanzialmente in tre parti:

1. Realizzazione di un sistema di controllo del flusso di un getto piano mediante l'utilizzo di eccitazione acustica;
2. Esame dei risultati dell'esperimento compiuto al fine di verificare l'efficacia dell'apparato costruito e di ricercare una frequenza di risonanza del sistema;
3. Rilievo dei problemi verificatisi durante l'esperimento ed esposizione delle possibili soluzioni da applicare in future prove.

INDICE

Introduzione	1
Concetti teorici	3
1.1 Getto piano	3
1.2 Onda.....	5
1.3 Strumenti utilizzati.....	7
1.3.1 <i>Anemometro a filo caldo</i>	7
1.3.2 <i>Tubo di Pitot</i>	9
1.3.3 <i>Altoparlante</i>	10
1.3.4 <i>Generatore d'onda e oscilloscopio</i>	11
1.4 Eccitazione acustica	12
Setup sperimentale	13
2.1 Galleria del vento piana (PAT)	13
2.2 Calibrazione dell'anemometro a filo caldo	13
2.3 Produzione dell'eccitazione acustica	15
2.4 Elaborazione dati	15
Risultati e discussioni	16
3.1 Risultati.....	16
3.2 Discussioni	32
Conclusioni	33
Elenco delle figure	34
Bibliografia	36

Introduzione

In fisica, per getto si intende un flusso di fluido che fuoriesce da un'apertura, come un ugello o un orifizio, passando da una zona di maggiore pressione ad una zona di pressione inferiore.

In ambito industriale le applicazioni dei getti sono molteplici e svariate: essi, per esempio, sono utilizzati all'interno di iniettori e di carburatori nonché all'interno delle camere di combustione di turbine e boiler, costituiscono lo scarico dei motori a reazione, formano le nuvole di fumo uscenti dalle ciminiere per lo smaltimento dei rifiuti. Studiarne le caratteristiche ed essere quindi in grado di controllarli al meglio, permette di ottimizzare tutti i processi in cui vengono impiegati; si possono in tale modo migliorare le prestazioni di motori e di razzi, ottenere una ottimale miscelazione tra aria e carburante all'interno della camera di combustione o del carburatore, etc.

La semplice geometria del getto consente, inoltre, di studiarne in maniera relativamente semplice e approfondita vari fenomeni quali l'instabilità, il mescolamento o la turbolenza: riuscire, pertanto, a capire la fisica e, quindi, il meccanismo da cui originano siffatti fenomeni, permette di neutralizzare o, comunque, limitare "i disagi" che essi possono provocare, come, ad esempio, il rumore generato dall'instabilità e dalla turbolenza del flusso.

Per agire sui meccanismi che provocano questi fenomeni vengono implementati alcuni sistemi di controllo i quali vengono suddivisi in sistemi passivi, vale a dire quelli che non richiedono il consumo di energia, e sistemi attivi, che, al contrario, comportano un dispendio energetico. Nonostante la dissipazione di energia, i sistemi più utilizzati sono quelli attivi perché permettono maggiore flessibilità e maggiori gradi di libertà sui parametri di controllo così da consentire di agire in modo mirato sul fenomeno di interesse.

Uno dei metodi attivi più studiato e utilizzato è rappresentato dall'eccitazione acustica. Nonostante la sua relativa facilità di realizzare, essa è particolarmente efficace in quanto interagisce direttamente con le instabilità presenti nel flusso e ne cambia le caratteristiche. La particolare efficacia è data anche dal fatto che il getto si comporta come un amplificatore di rumore, soprattutto a specifiche frequenze. La difficoltà di impiego, tuttavia, consiste nella ricerca ed individuazione dei corretti parametri dell'onda eccitante affinché questa riesca ad interagire con il flusso nel modo più proficuo possibile.

L'eccitazione acustica può essere introdotta sia internamente, nel caso in cui la sorgente dell'onda eccitante sia posizionata dentro il getto, oppure esternamente, se invece è posizionata al di fuori del flusso.

L'obiettivo della presente tesi consiste, pertanto, nella realizzazione di un sistema di controllo del flusso mediante eccitazione acustica e nella sua successiva applicazione su un getto piano: in particolare, si è inteso verificare se il getto risenta di un'eccitazione acustica interna. A tale scopo, è stato utilizzato un anemometro a filo caldo per misurare la velocità del flusso in uscita dall'ugello e constatare, tramite uno spettro del segnale dello strumento, se si verifica un picco di energia del flusso in corrispondenza della frequenza eccitante così da potere validare l'ipotesi che il getto risenta dell'eccitazione acustica se perturbato ad opportune frequenze.

Nel primo capitolo verranno introdotti i principi fisici del getto ed i funzionamenti dei vari strumenti utilizzati; la preparazione dell'esperimento, sia dal punto di vista teorico che da quello delle apparecchiature utilizzate saranno, poi, descritti nel secondo capitolo; nel terzo capitolo, verranno riportati i risultati degli esperimenti; infine, nel quarto capitolo saranno discussi i risultati ottenuti e saranno avanzate proposte per futuri esperimenti.

Capitolo 1

Concetti teorici

1.1 Getto piano

Come già riportato nell'introduzione, per "getto" si intende un flusso di fluido che fuoriesce da un'apertura ad una precisa velocità. I getti si dividono in due tipologie: i getti assialsimmetrici ed i getti piani. Nella prima tipologia, la sezione di uscita del getto è circolare e ciò provoca una diffusione del flusso in tutte le direzioni. Nel secondo gruppo, invece, la sezione d'uscita è rettangolare in quanto presenta una grandezza caratteristica in una direzione molto maggiore rispetto all'altra. In entrambi i casi, la componente di velocità preponderante si sviluppa lungo la direzione del moto. La diffusione nelle altre direzioni è, per contro, dovuta ai fenomeni di turbolenza.

Il profilo di velocità del getto in ambo i casi durante la sua propagazione cambia significativamente a causa dell'interazione del flusso con l'ambiente esterno.

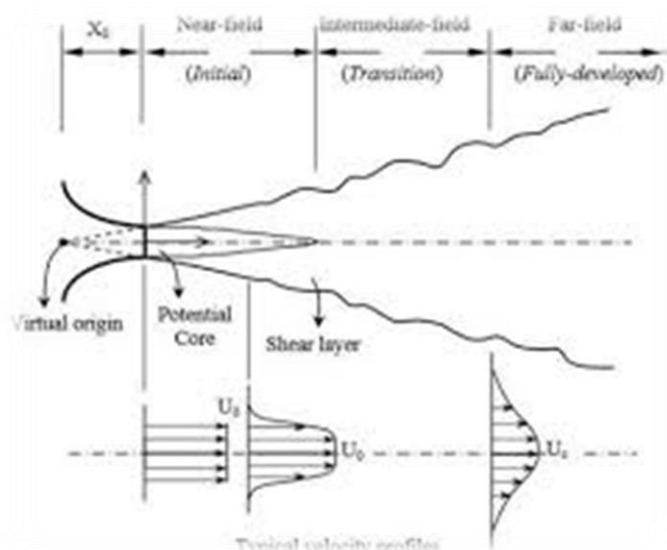


Figura 1.1 Topologia del getto

All'uscita dall'ugello vi è una regione con una velocità media costante, chiamata "core potenziale", in cui il flusso è laminare. Al contempo, a causa della differenza di velocità tra il core potenziale e l'ambiente esterno, si crea, ai bordi del getto, un sottile strato limite nel quale si sviluppano delle forze di taglio che portano alla creazione della cosiddetta "Kelvin-Helmoltz instability". Tale instabilità è composta da perturbazioni che accrescono progressivamente di intensità, sottraendo energia al flusso e creando vortici.

La turbolenza così creata favorisce il fenomeno denominato "entrainment", ossia un processo che genera l'inglobamento dell'aria dall'esterno del getto verso l'interno: da ciò consegue un inspessimento dello strato limite mentre diminuisce la grandezza del core potenziale.

Nel complesso il getto si espande verso l'esterno e la velocità del flusso diminuisce. Lo strato limite continua ad espandersi finché non raggiunge il centro del getto: in tal caso il core potenziale scompare ed il flusso diventa completamente turbolento. In seguito, il processo di inglobamento e di mescolanza del getto con l'ambiente esterno prosegue e quindi la velocità continua a diminuire fino a che non raggiunge una certa stabilità e rimane costante: in tale evenienza, si afferma che il flusso è completamente sviluppato.

Durante l'evoluzione del getto possono essere individuate tre distinte zone: iniziale, di transizione e di terminazione.

La zona iniziale si individua subito dopo l'ugello: in questa regione si osserva una velocità media del flusso costante ed il profilo di velocità assume la forma di un cuneo.

In questa prima fase, inoltre, il getto è quasi interamente composto dal core potenziale, cioè da una parte del flusso a velocità costante, circondato da sottilissimi strati limite. Tale regione si estende fino ad una distanza dall'ugello pari a tre volte la grandezza caratteristica di quest'ultimo, vale a dire, per esempio, tre volte la dimensione del diametro nel caso di ugello circolare.

Successivamente si entra nella zona di transizione: in questa regione la velocità del centro diminuisce così come diminuisce la grandezza del core potenziale e tutto ciò a causa dell'aumento dello strato limite dovuto all'inglobamento dell'aria esterna.

Il parametro più importante che influenza la dimensione di questa regione è il Numero di Reynolds.

Questo è definito come:

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

Dove ρ è la densità del fluido, ν è la velocità del fluido, L è la dimensione caratteristica del fenomeno e μ è la viscosità dinamica del fluido.

Accade che, maggiore è il numero di Reynolds, minore è la dimensione della zona di transizione.

Le due zone sopra descritte vengono definite “zona di sviluppo” poiché vi è un continuo trasferimento di energia tra il getto e l’ambiente esterno.

Al termine della zona di transizione si trova la zona di terminazione: in questa regione la velocità del centro del flusso diminuisce rapidamente per motivi non ancora completamente noti.

In questa zona, inoltre, il flusso è completamente sviluppato, nel senso che esso è diventato interamente turbolento.

1.2 Onda

Come anticipato nell’introduzione, all’interno di questo progetto di tesi è stata utilizzata un’eccitazione acustica.

È, allora, necessario approfondire la struttura di un’onda al fine di capire i parametri che sono stati utilizzati per realizzare il controllo del flusso.

In fisica, per onda si intende una perturbazione che nasce da una sorgente e si propaga attraverso un mezzo trasportando energia, senza implicare uno spostamento di materia. Durante l’esperimento sono state trattate onde acustiche, il cui mezzo di trasporto è rappresentato dall’aria mentre la sorgente è costituita dall’altoparlante.

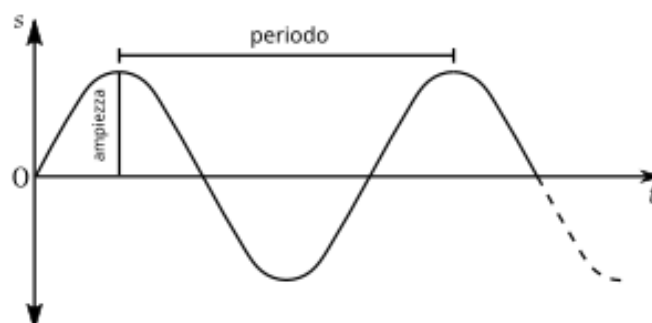


Figura 1.2 Onda sonora

Un'onda sonora può essere rappresentata su un piano cartesiano che indica nelle ascisse il tempo e nelle ordinate lo spostamento della particella che trasmette il suono.

Vengono poi definiti alcuni parametri fondamentali dell'onda:

- Periodo: esso indica la durata di un'oscillazione completa, ovvero il tempo che la particella impiega a tornare nella sua posizione iniziale. L'unità di misura è il secondo [s];
- Ampiezza: con tale termine si indica il massimo spostamento della particella dall'asse delle ascisse. Si può inoltre definire l'ampiezza picco-picco come la massima escursione dell'onda. Nel caso in esame l'ampiezza viene misurata in Volt [V];
- Frequenza: rappresenta dell'inverso del periodo in quanto indica il numero di oscillazioni complete compiute dall'onda in un'unità di tempo. Nel caso l'unità di tempo sia rappresentata da un secondo, allora la frequenza si misura in Hertz [Hz];

Durante la preparazione dell'esperimento sono state prese in esame due tipologie di onde: le onde sinusoidali e le onde quadre.

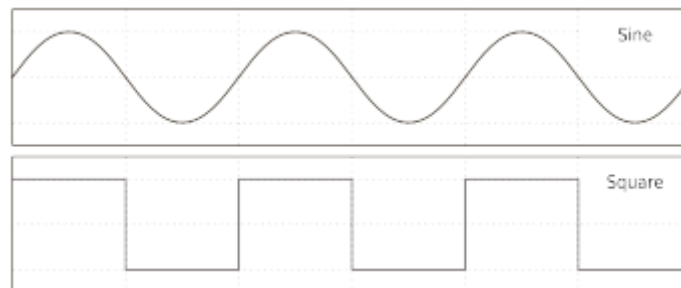


Figura 1.3 Onda sinusoidale (sopra) e onda quadra (sotto)

L'onda sinusoidale è un'onda descritta dalla funzione seno e ha un andamento continuo tra il picco positivo ed il picco negativo.

L'onda quadra ha invece un andamento a scalino nel senso che il suo valore è pari alternativamente o al picco positivo o a quello negativo. Un importante parametro specifico dell'onda quadra è il duty-cycle che è definito come il rapporto tra il tempo in cui l'onda assume il valore positivo ed il tempo in cui essa assume il valore negativo.

Le onde quadre, tuttavia, nella realtà non esistono in quanto è impossibile avere un passaggio istantaneo tra valore massimo e valore minimo e vengono quindi approssimate sommando una serie di armoniche cioè di onde sinusoidali, al fine di ottenere un andamento il più simile possibile a quello ideale.

Per tali motivi, nel corso dell'esperimento oggetto del presente lavoro, si è deciso di utilizzare solamente onde sinusoidali, scartando quelle quadre che non avrebbero garantito una sufficiente precisione.

1.3 Strumenti utilizzati

Durante la realizzazione dell'intero progetto di tesi sono stati utilizzati vari strumenti ognuno dei quali destinato a svolgere una precisa funzione all'interno dell'esperimento.

Tali apparecchiature possono essere suddivise in strumenti necessari per le misurazioni, quali anemometro a filo caldo e tubo di Pitot, e strumenti per la visualizzazione, come l'oscilloscopio; inoltre, sono stati impiegati dispositivi per la generazione e per la diffusione delle onde, quali un altoparlante ed un generatore d'onde.

Si ritiene utile, a tale riguardo, descrivere il funzionamento di ciascuno di tali strumenti al fine di illustrare, sinteticamente, i principi fisici ad esso sottesi.

1.3.1 Anemometro a filo caldo

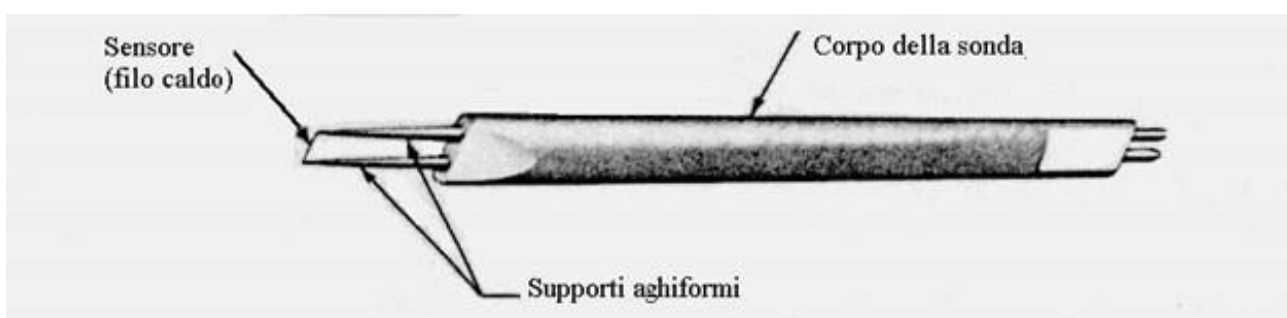


Figura 1.4 Anemometro a filo caldo

L'anemometro a filo caldo è uno strumento utilizzato per misurare la velocità di un flusso che investe l'apparecchio. Esso è composto da un filo molto sottile (dell'ordine dei micron) che viene riscaldato mediante transito di corrente elettrica: a causa del passaggio del flusso il filo tende a raffreddarsi,

cedendo calore in modo convettivo al flusso incidente, processo, questo, strettamente collegato alla velocità del flusso.

Il raffreddamento comporta dei cambiamenti nei parametri di resistenza del filo che vengono misurati da un dispositivo elettronico collegato ai lati del filamento.

L'anemometro può funzionare in due modi distinti:

- Constant Temperature Anemometer (CTA): in questo caso viene mantenuta costante la temperatura del filo modificando il valore di intensità di corrente passante nel filo;
- Constant Current Anemometer (CCA): in questa applicazione viene mantenuta costante la corrente che passa nel filo agendo sui valori di resistenza.

Nell'esperimento presentato è stata utilizzata la prima modalità di funzionamento: l'anemometro, infatti, ha fornito dei valori di tensione che, poi, grazie alla calibrazione (vedi sezione 2.2), sono stati trasformati in valori di velocità del flusso. Ciò è stato possibile in quanto l'anemometro utilizzato opera attraverso un Dantec StreamLine 90N10 frame equipaggiato con moduli CTA 90C10 che permettono di leggere il segnale proveniente dall'anemometro e di trasferire i dati acquisiti al computer dotato del programma NI Labview.



Figura 1.5 Streamline 90N10 con moduli CTA 90C10

1.3.2 Tubo di Pitot

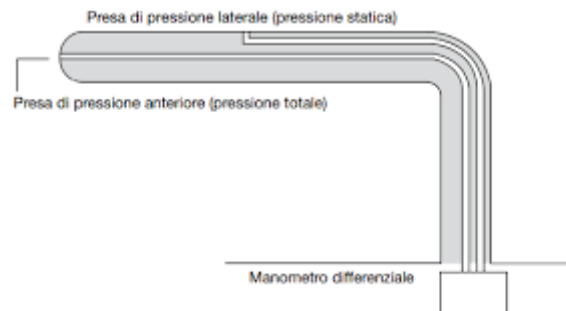


Figura 1.6 Tubo di Pitot

Il Tubo di Pitot, inventato nel 1732 dallo scienziato Henry Pitot, è un altro strumento utile per misurare la velocità di un flusso. Il principio fisico alla base del funzionamento di questo strumento è costituito dalla differenza tra la pressione totale e la pressione statica, ovvero la pressione dinamica:

$$p_{totale} = p_{statica} + p_{dinamica} = p_{statica} + \frac{1}{2}\rho v^2$$

Dove ‘ ρ ’ è la densità del fluido e ‘ v ’ è la velocità del flusso.

La pressione statica è definita come la forza che il fluido esercita su una unità di superficie ed è, quindi, legata semplicemente alla densità di tale fluido. La pressione dinamica, invece, rappresenta l’incremento di pressione dovuto all’energia cinetica associata ad un fluido in movimento.

La pressione totale è invece data dalla somma delle due pressioni.

Come si evince dalla sua espressione, la pressione dinamica è proporzionale al quadrato della velocità del flusso: invertendo tale formula è allora possibile ricavare la velocità desiderata.

$$v = \sqrt{\frac{2(p_{totale} - p_{statica})}{\rho}}$$

Sul tubo di Pitot sono presenti due prese: una esposta direttamente al flusso, necessaria per misurare la pressione totale, ed una posizionata in un punto in cui l'ambiente è indisturbato, per misurare la pressione statica. Infine, il manometro differenziale misura la differenza tra le due pressioni per ricavare la pressione dinamica da cui ottenere la velocità del flusso.

Durante l'esperimento, tuttavia, il tubo di Pitot non è stato utilizzato direttamente per misurare la velocità del flusso: esso infatti non ha una sufficiente sensibilità per riuscire a misurare tutte le perturbazioni di velocità causate dalla presenza dell'eccitazione acustica.

L'utilizzo di tale strumento è stato, pertanto, limitato al processo di calibrazione dell'anemometro a filo caldo, processo che sarà descritto in seguito nella sezione 2.2

1.3.3 Altoparlante

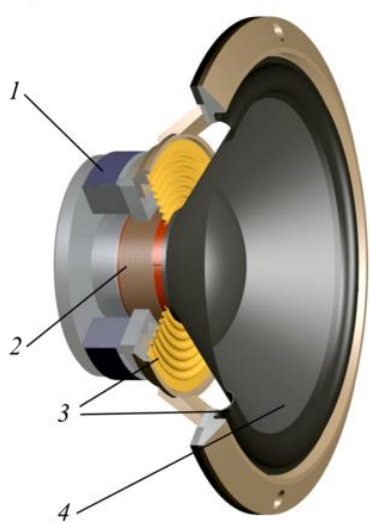


Figura 1.7 Schema di altoparlante: (1) magnete (2) bobina solenoidale (3) sospensioni (4) membrana a cono

La cassa o altoparlante, la cui invenzione risale al 1861 per mano di Johann Ph. Reis, è un dispositivo in grado di convertire un segnale elettrico in onde sonore. Nel corso dell'esperimento è stato utilizzato un altoparlante magnetodinamico in cui la membrana viene messa in movimento da una bobina solenoidale che è immersa in un campo magnetico generato dal magnete permanente; essa, quando viene attraversata da corrente elettrica alternata, è soggetta alla forza di Lorentz che la fa oscillare mettendo, quindi, in movimento la membrana. La membrana, a sua volta, comprime l'aria circostante creando l'onda sonora. L'altoparlante utilizzato è un modello Audibax GR15AR

1.3.4 Generatore d'onda e oscilloscopio

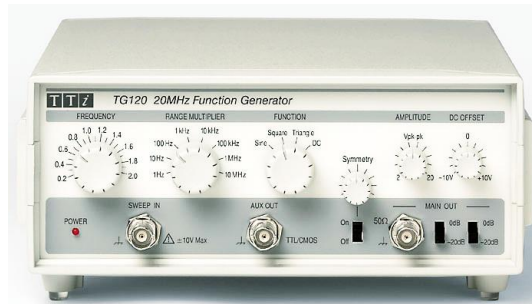


Figura 1.8 Generatore d'onda TG120 del tipo presente nel laboratorio

Un generatore d'onda è un dispositivo elettronico in grado di generare segnali di forme diverse. Nel caso specifico è stato utilizzato un generatore d'onda modello TG120 prodotto dalla Thurbly Thandar Instrument con cui si possono creare onde sinusoidali, onde quadre e onde triangolari. Lo strumento permette di agire, tramite opportune manopole, sui vari parametri dell'onda, quali frequenza, ampiezza picco-picco e duty-cycle nel caso di onde quadre.



Figura 1.9 Oscilloscopio DPO2024B del tipo presente in laboratorio

L'oscilloscopio è uno strumento elettronico che permette di visualizzare su un grafico l'andamento nel dominio del tempo di segnali elettrici, effettuando misurazioni di tensione sull'asse delle ordinate, e del periodo sull'asse delle ascisse. Nell'esperimento l'oscilloscopio modello DPO2024B prodotto da Tektronix è stato impiegato per visualizzare contemporaneamente l'onda eccitante e l'andamento del segnale proveniente dall'anemometro.

1.4 Eccitazione acustica

Rappresentando uno dei metodi più efficaci per il controllo del flusso, l'eccitazione acustica era già stata ampiamente applicata in forme differenti. Come detto, infatti, l'eccitazione acustica può essere introdotta sia internamente che esternamente.

L'eccitazione acustica interna è stata utilizzata nell'esperimento riportato in [1] per indagare l'influenza che essa produce sullo sviluppo delle instabilità all'interno di due getti coassiali oppure in [2] per studiare il processo di mescolamento di due flussi paralleli. In entrambi i casi si sono ricercati i valori di frequenza per cui gli effetti erano maggiormente visibili sui fenomeni rispettivamente indagati.

In alternativa, un altro esempio di utilizzo, di eccitazione acustica interna è riportato in [3] in cui questa volta si ricercano i valori di frequenza dell'onda eccitante per cui si riesce maggiormente a ridurre o eliminare le instabilità che si formano all'interno di un getto turbolento.

Anche per l'eccitazione acustica esterna possono essere citati esperimenti pregressi come quello descritto in [4] in cui è stata impiegata per indagare la relazione tra la frequenza dell'onda eccitante e la frequenza di distacco dei vortici del getto.

Infine, va evidenziato che è anche possibile combinare le due metodologie di eccitazione, come viene fatto in [5], per dimostrare come, servendosi di un'eccitazione acustica esterna, sia possibile eliminare alcuni disturbi interni al getto, nel caso specifico creati con un'eccitazione interna per conoscerne perfettamente i parametri.

Nell'esperimento oggetto del presente lavoro, invece, è stata adoperata solamente l'eccitazione acustica interna al fine di verificare se questa sia da sola sufficiente a consentire di avere un controllo del flusso; si è, altresì, proceduto a ricercare una frequenza di risonanza che provocasse un aumento di energia del flusso, aumento deducibile dalla presenza di un forte picco nello spettro del segnale delle velocità del getto ottenute grazie all'anemometro.

Capitolo 2

Setup sperimentale

2.1 Galleria del vento piana (PAT)

L'esperimento è stato svolto all'interno di una galleria del vento piana, o PAT (planar air tunnel), presente all'interno del Laboratorio CICLOPE di Predappio (FC). La PAT è costituita da vari componenti, quali il motore, la precamera di calma, due tubi in plastica, una sezione per il trattamento del flusso e il convergente per l'uscita del flusso.

Il motore è un motore AC trifase che funziona come un ventilatore centrifugo e movimentata l'aria fornendola alla galleria. La precamera di calma invece è una sezione utilizzata per attenuare i disturbi e le turbolenze dovute al motore. Dopo essere passata nella precamera di calma l'aria viene poi trasferita alla camera di calma attraverso due tubi di plastica simmetrici.

All'interno della camera di calma vi sono poi vari dispositivi, quali sfere di vetro, strutture a nido d'ape e tre schermi, atti a diminuire il più possibile la turbolenza ed a rendere il flusso il più uniforme possibile. Al termine della galleria è posizionato il convergente necessario ad eliminare la turbolenza residua e accelerare il flusso in uscita.

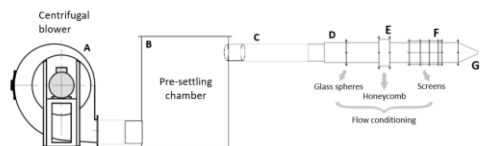


Figura 2.1 Vista laterale della PAT: (A) motore trifase (B) precamera di calma (C) tubi di plastica (D) sfere di vetro (E) strutture a nido d'ape (F) schermi (G) convergente

2.2 Calibrazione dell'anemometro a filo caldo

Per ottenere le misure di velocità del flusso è stato utilizzato un anemometro a filo caldo posizionato all'uscita della PAT. Come detto nella sezione 1.3.1, tuttavia, l'anemometro a filo caldo restituisce dei valori di tensione che sono necessari allo strumento per potere mantenere costante la propria temperatura. Si è allora reso necessario effettuare una calibrazione dell'anemometro per riuscire a

convertire i valori di tensione in valori di velocità del flusso: a tale scopo è stato, pertanto, utilizzato un tubo di Pitot posizionato a fianco dell'anemometro.

L'operazione è stata così svolta.

Innanzitutto, è stata misurata la temperatura dell'ambiente in quanto essa influenza la densità dell'aria e quindi la pressione rilevata dal tubo di Pitot. Successivamente si è proceduto ad effettuare una misurazione della pressione statica e dinamica utilizzando due trasduttori MKS.



Figura 2.2 Trasduttore MKS

Dopo queste operazioni preliminari, è stata svolta la calibrazione vera e propria, processo che si articola in diversi passaggi: inizialmente si è misurata la velocità del flusso con il tubo di Pitot a motore spento e si è appuntata la tensione dell'anemometro.

Poi, si è poi ripetuta la stessa procedura aumentando progressivamente i valori di velocità del motore e, quindi, aumentando la velocità del flusso.

Così agendo, si sono ottenuti coppie di valori di velocità del flusso e tensione dell'anemometro: interpolando i punti tramite predeterminate curve, come la "King's law" o curve polinomiali, è stato possibile ottenere un valore di velocità del flusso a partire da qualsiasi valore di tensione dell'anemometro.

Conclusa la fase di calibrazione, il tubo di Pitot è stato rimosso per evitare che interferisse con il flusso, mentre le velocità del getto sono state ricavate grazie all'anemometro opportunamente calibrato.

2.3 Produzione dell'eccitazione acustica

La parte centrale del progetto di tesi è costituita dalla realizzazione di un apparato in grado di eccitare il flusso tramite onde acustiche. A tale scopo sono stati utilizzati un generatore di onde e un altoparlante. Il generatore di onde era collegato contemporaneamente sia con la cassa, tramite un cavo elettrico ed un adattatore tra questo e la presa BNC, sia con l'oscilloscopio, tramite un cavo BNC-BNC. Lo sdoppiamento del segnale in uscita dallo strumento è stato ottenuto mediante un connettore a T del tipo BNC. Il collegamento con l'oscilloscopio ha consentito di visualizzare sullo strumento l'onda prodotta dal generatore e verificare che questa rispettasse i parametri di ampiezza e frequenza desiderati. La cassa è stata installata all'interno del coperchio della precamera di calma utilizzando otto barre filettate di lunghezza 25 cm e filettatura M5 ed è stata fissata utilizzando autobloccanti e coppie di dadi. Era infine presente un nono foro per fare passare i fili di collegamento tra la cassa e il generatore.

2.4 Elaborazione dati

Per l'acquisizione e la successiva elaborazione dei dati è stato utilizzato un sistema NI c-DAQ 9189 collegato ad un computer con installato Labview: tramite tale software è stato possibile registrare i dati provenienti dall'anemometro e dal tubo di Pitot ed anche movimentare la struttura su cui erano montati questi due strumenti.

Infine, per l'elaborazione dei dati è stato implementato un codice MATLAB in grado di analizzare tutti i dati raccolti dai sensori ed estrapolare uno spettro del segnale dell'anemometro.

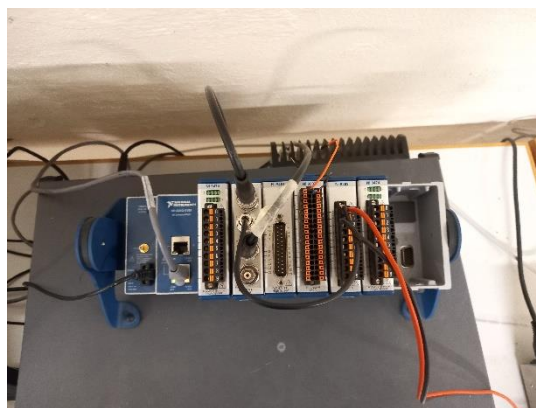


Figura 2.3 Sistema NI c-DAQ 9189

Capitolo 3

Risultati e discussioni

3.1 Risultati

L'obiettivo dell'esperimento era verificare il corretto funzionamento del sistema di controllo, ossia accertare che il flusso mantenesse, al suo interno, segnali dell'eccitazione acustica.

Tale indagine è stata resa possibile realizzando uno spettro del segnale dell'anemometro rappresentante le velocità del flusso. Lo spettro del segnale è una riproduzione nel dominio delle frequenze dell'energia contenuta nel flusso ed è composto da un grafico in cui sulle ascisse sono rappresentate le frequenze mentre sulle ordinate è rappresentata l'energia. Se il sistema funziona correttamente, in corrispondenza della frequenza eccitante deve essere presente un picco di energia nel flusso. Per rendere più evidente il fenomeno si è pertanto deciso di indagare intorno alla frequenza di risonanza della precamera in quanto è una frequenza per cui la potenza dell'onda eccitante viene amplificata dalla vibrazione della struttura stessa, ottenendo così il maggior aumento possibile di energia. Per trovare tale frequenza si è effettuato un esperimento preliminare: a motore spento e dunque a flusso praticamente fermo, si è posizionato l'anemometro all'uscita della PAT e si è attivato il generatore d'onda. In questo modo la forma dell'onda eccitante e il segnale dell'anemometro sono stati contemporaneamente visualizzati sull'oscilloscopio. Si è poi proceduto a variare la frequenza dell'onda fino a quando l'andamento del segnale dell'anemometro non ha ricalcato l'andamento dell'onda eccitante. È stata così trovata la frequenza di risonanza della precamera, corrispondente a circa 350 Hz. L'incertezza sul valore di frequenza è dovuta alla precisione della manopola di selezione di quest'ultima nel generatore d'onda che prevede, selezionando come moltiplicatore 1000 Hz, le frequenze a step di 100 Hz, non compatibile, quindi, con l'intervallo in cui si trovava la frequenza di risonanza.

Trovata la frequenza di risonanza si è attivato anche il getto: inizialmente, si è deciso di mantenere costante la velocità del flusso pari a 5 m/s che corrispondevano ad una frequenza del motore di 3.8 Hz. Si è poi attivato il generatore d'onda variandone la frequenza di eccitazione tra sette valori diversi:

- 100 Hz
- 200 Hz
- 300 Hz
- 350 Hz
- 400 Hz
- 500 Hz
- 600 Hz

L'esperimento è poi stato ripetuto utilizzando quattro posizioni diverse dell'anemometro per cercare di capire in quale di queste il fenomeno indagato fosse più evidente. Per ognuna delle quattro posizioni, pertanto, sono state effettuate delle misurazioni della velocità del flusso, utilizzando un tempo di acquisizione di ogni misurazione di 90 s ed un rateo di acquisizione di 12000 Hz pari a 12000 misure al secondo. Grazie al codice MATLAB, una volta convertiti i valori di tensione in velocità grazie all'interpolazione, per ogni posizione e frequenza di eccitazione sono stati creati degli spettri del segnale dell'anemometro e sono state calcolate le velocità medie e le deviazioni standard del flusso. Inoltre, per verificare che l'anemometro producesse un segnale plausibile, si è elaborato anche un grafico con l'andamento naturale del segnale sia nell'intero intervallo di tempo di acquisizione sia per un solo secondo: questa verifica è stata però limitata solamente al caso con frequenza di eccitazione pari a 100 Hz. Velocità media e deviazione standard riportate sono sempre riferite al caso di frequenza di eccitazione pari a 100 Hz.

- Posizione 1

Anemometro posizionato allo sbocco del convergente in posizione centrale.

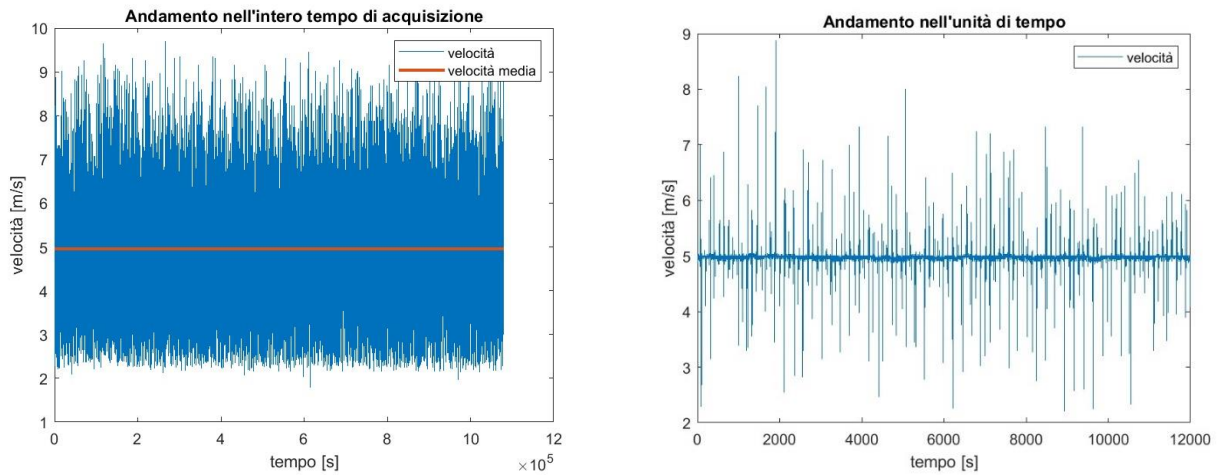


Figura 3.1 Andamento del segnale con frequenza di eccitazione a 100 Hz: (sinistra) nell'intero tempo di acquisizione (destra) nell'unità di tempo

Velocità media=4.9633 m/s;

Deviazione standard=0.1926;

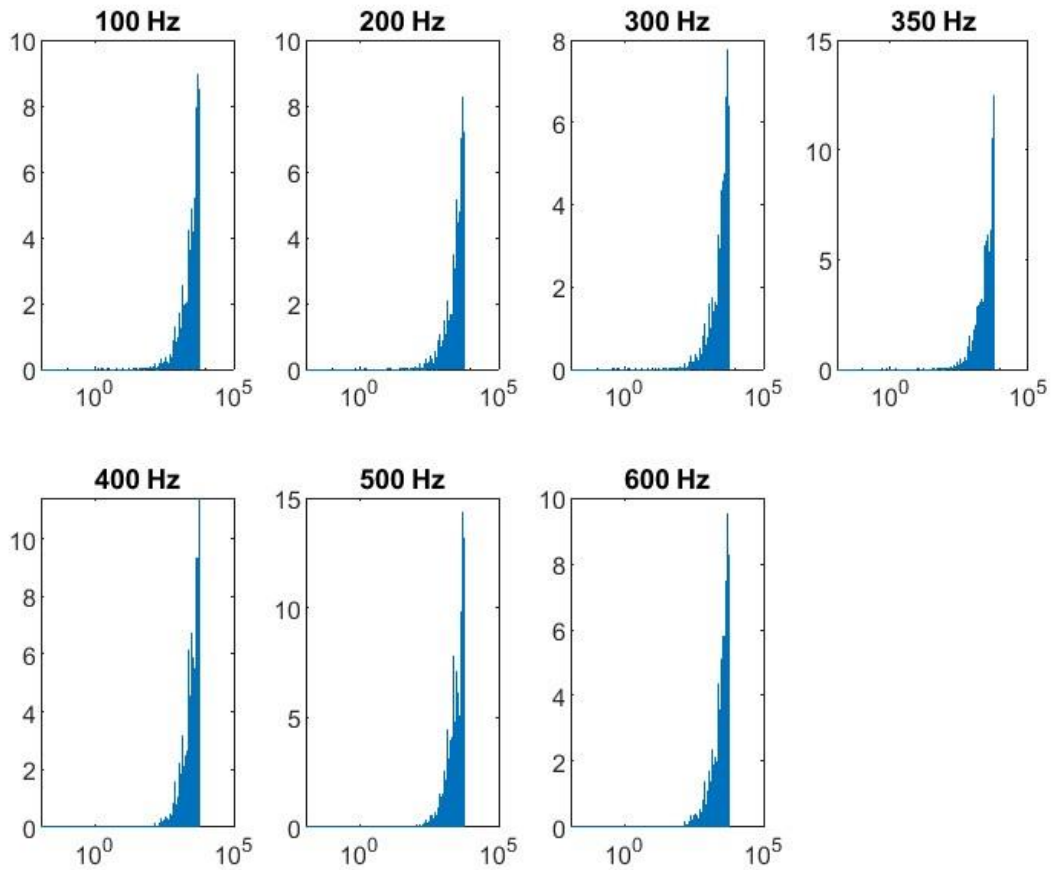


Figura 3.2 Spettro del segnale al variare della frequenza di eccitazione. Sulle ascisse sono riportate le frequenze mentre sulle ordinate l'energia misurata in dB/Hz. Sopra ogni grafico è riportata la frequenza di eccitazione

- Posizione 2

Anemometro posizionato allo sbocco del convergente ma al confine del getto, quindi 1 cm più in basso rispetto alla posizione 1.

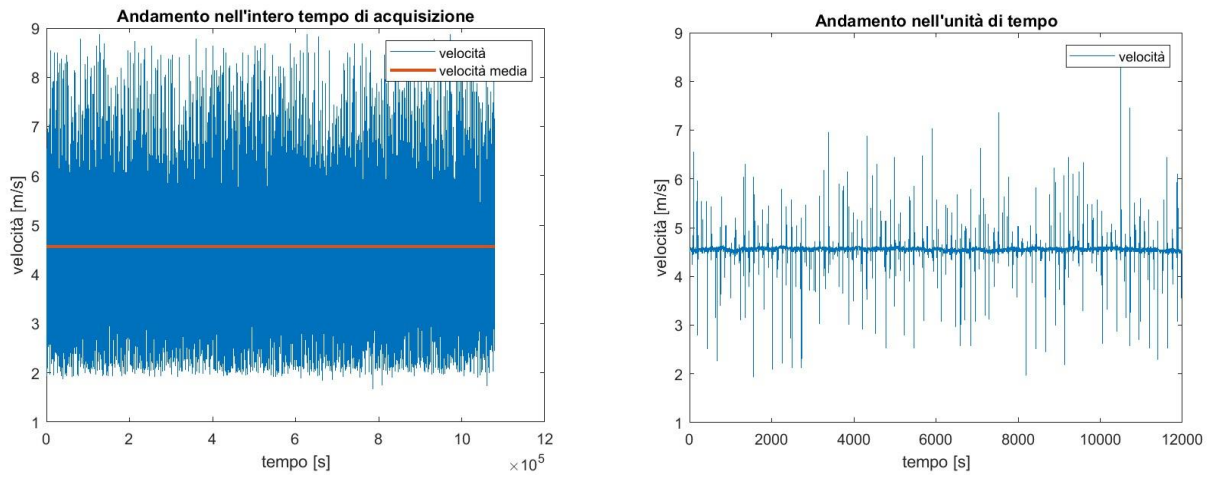


Figura 3.3 Andamento del segnale con frequenza di eccitazione a 100 Hz: (sinistra) nell'intero tempo di acquisizione (destra) nell'unità di tempo

Velocità media=4.5568 m/s;

Deviazione standard=0.1814;

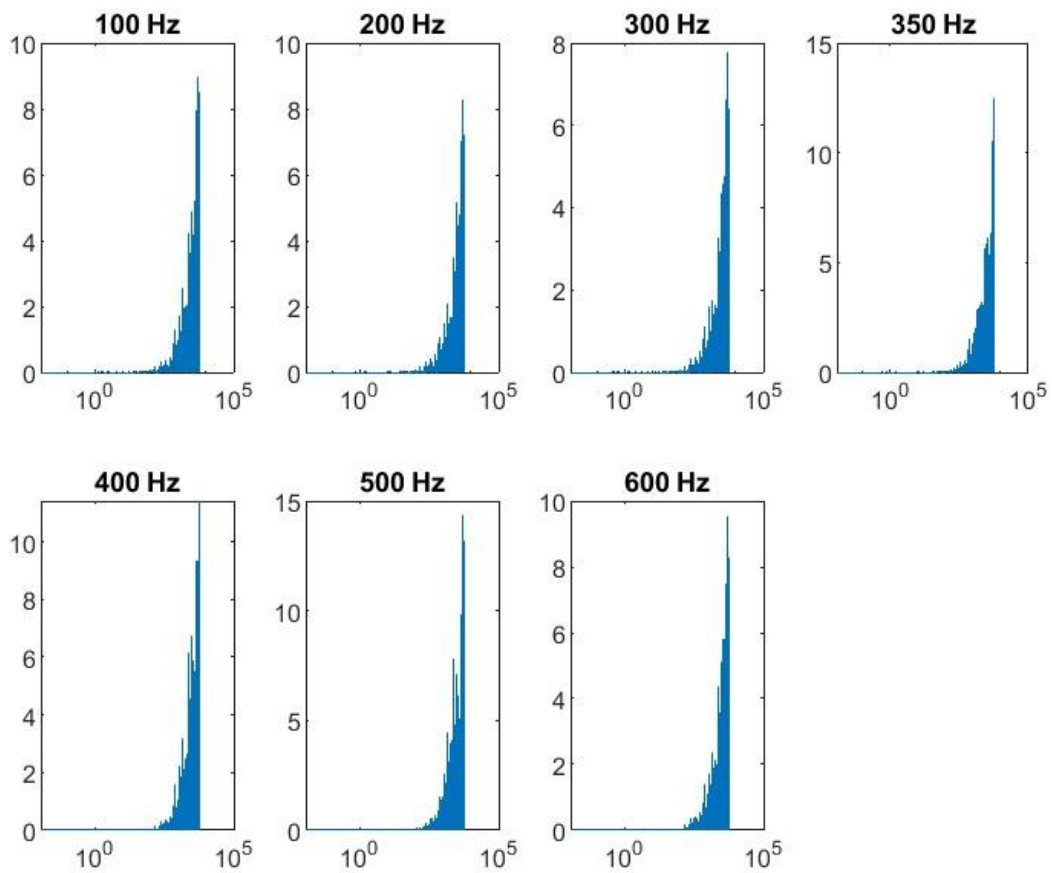


Figura 34.4 Spettro del segnale al variare della frequenza di eccitazione. Sulle ascisse sono riportate le frequenze mentre sulle ordinate l'energia misurata in dB/Hz. Sopra ogni grafico è riportata la frequenza di eccitazione

- Posizione 3

Anemometro posizionato a una distanza pari a 5 volte la lunghezza caratteristica del convergente in posizione centrale. Come lunghezza caratteristica si è presa l'altezza dello sbocco del convergente, pari a 2 cm, per cui lo strumento è stato collocato ad una distanza di 10 cm dallo sbocco della PAT.

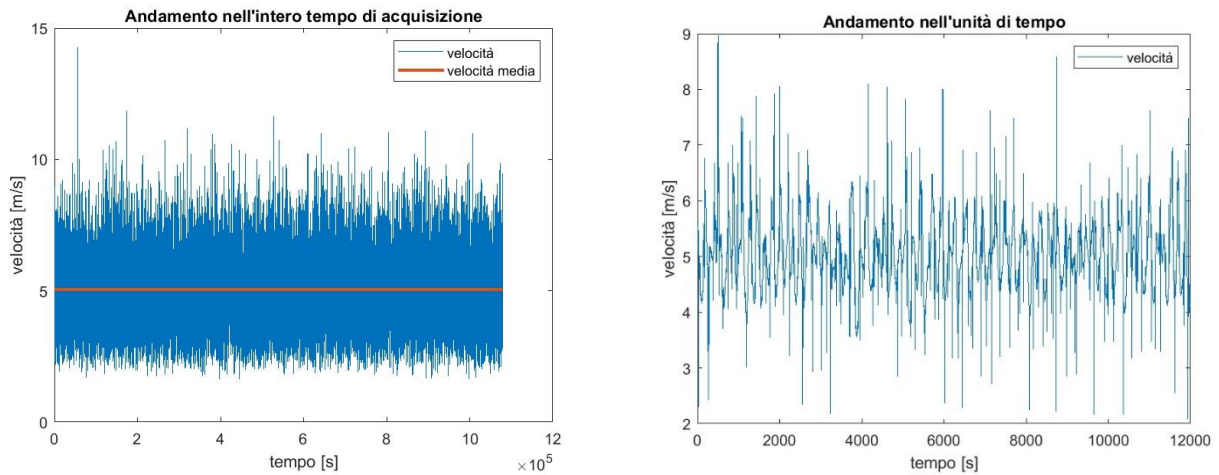


Figura 3.5 Andamento del segnale con frequenza di eccitazione a 100 Hz: (sinistra) nell'intero tempo di acquisizione (destra) nell'unità di tempo

Velocità media=5.0366 m/s;

Deviazione standard=0.5595;

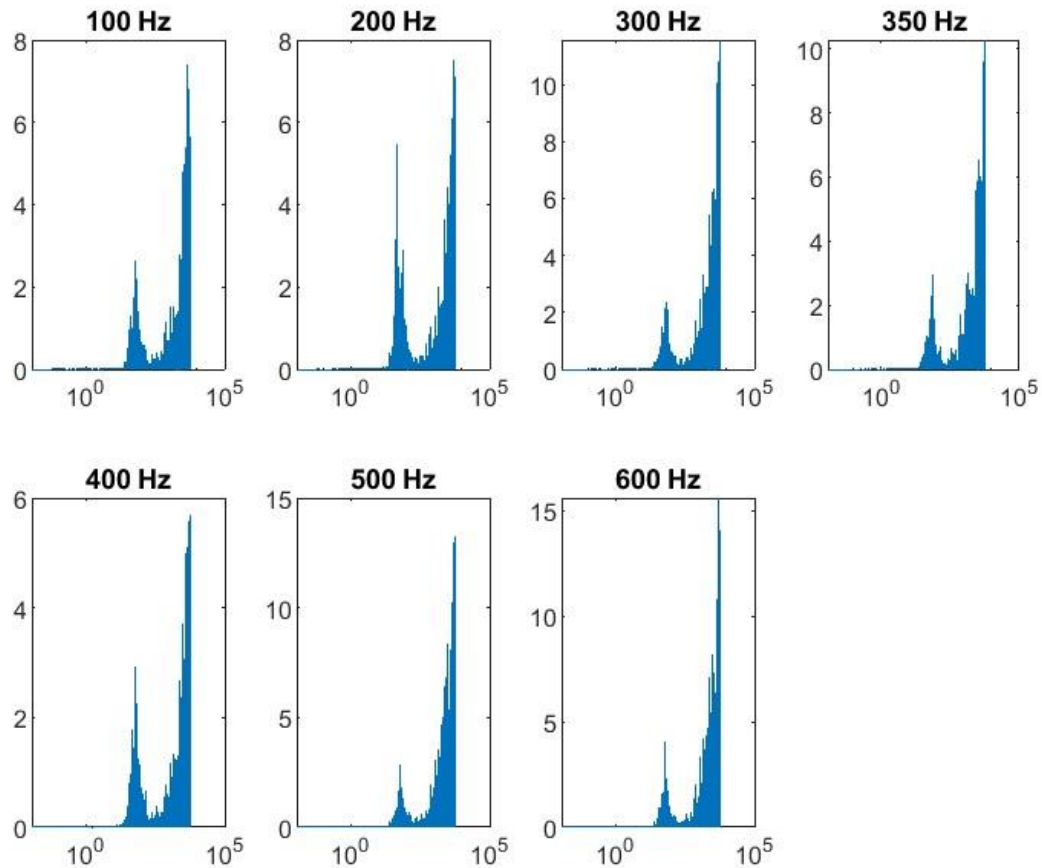


Figura 3.6 Spettro del segnale al variare della frequenza di eccitazione. Sulle ascisse sono riportate le frequenze mentre sulle ordinate l'energia misurata in dB/Hz. Sopra ogni grafico è riportata la frequenza di eccitazione

- Posizione 4

Anemometro posizionato a 10 cm dallo sbocco del convergente al confine del getto. Come precedentemente spiegato, il getto evolvendo nel tempo si espande: è allora necessario trovare il nuovo confine. A tale scopo, si sono effettuate una serie di misurazioni della velocità del flusso al fine di costruire un profilo di velocità. Si è posizionato l'anemometro ad una distanza di 10 cm dallo sbocco ed a una casuale altezza e si è misurata la velocità del flusso. Si è poi ripetuta l'operazione abbassando progressivamente l'anemometro di step inizialmente di 1 cm l'uno diminuendo poi l'ampiezza di ciascuno step intorno al centro del getto. Così facendo, si è trovata la linea centrale del flusso. Per trovare, poi, il confine si è approssimato, con una ragionevole incertezza, che esso si trovi dove la velocità del flusso è pari alla metà della massima velocità rilevata, che invece si ottiene nella mezzeria. Costruendo il profilo si è ottenuto che il confine del getto si trova a circa 1.75 cm dal centro dove la velocità è pari a 2.35 m/s cioè circa la metà della velocità massima pari a 4.85 m/s.

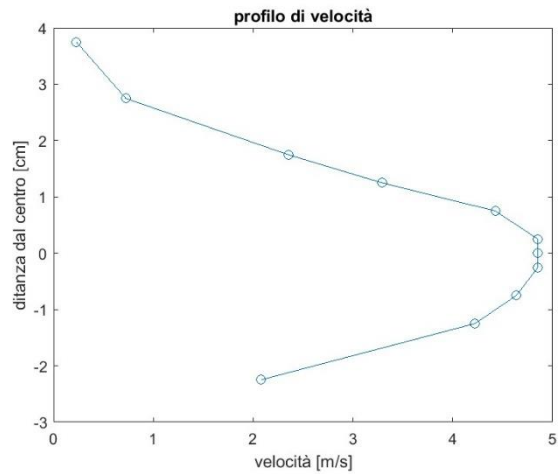


Figura 3.7 Profilo di velocità

Effettuata questa analisi preliminare si è proceduto con l'esperimento esattamente come nelle altre tre posizioni.

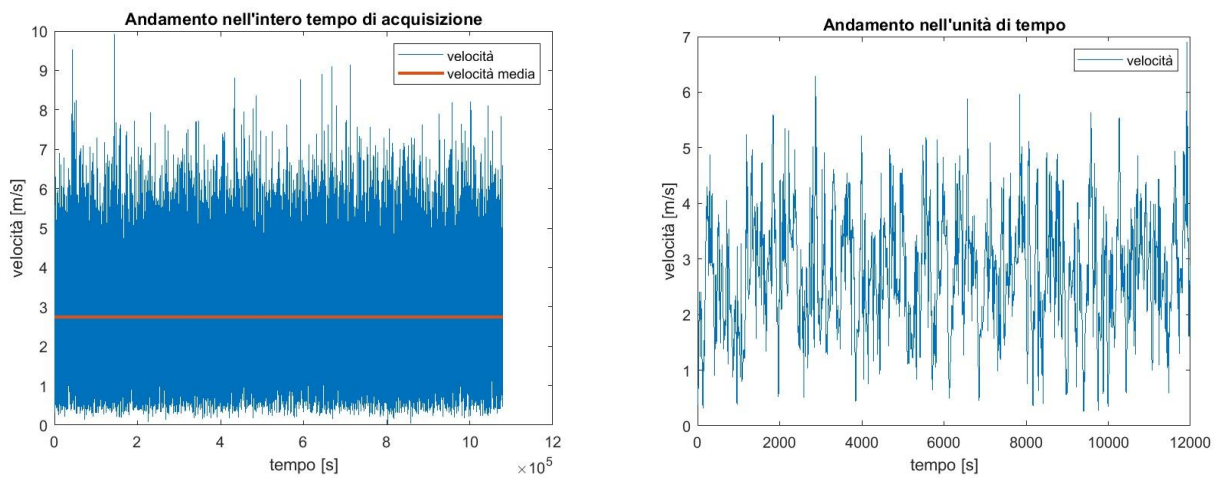


Figura 3.8 Andamento del segnale con frequenza di eccitazione a 100 Hz: (sinistra) nell'intero tempo di acquisizione (destra) nell'unità di tempo

Velocità media=2.7405 m/s;

deviazione standard=1.0236;

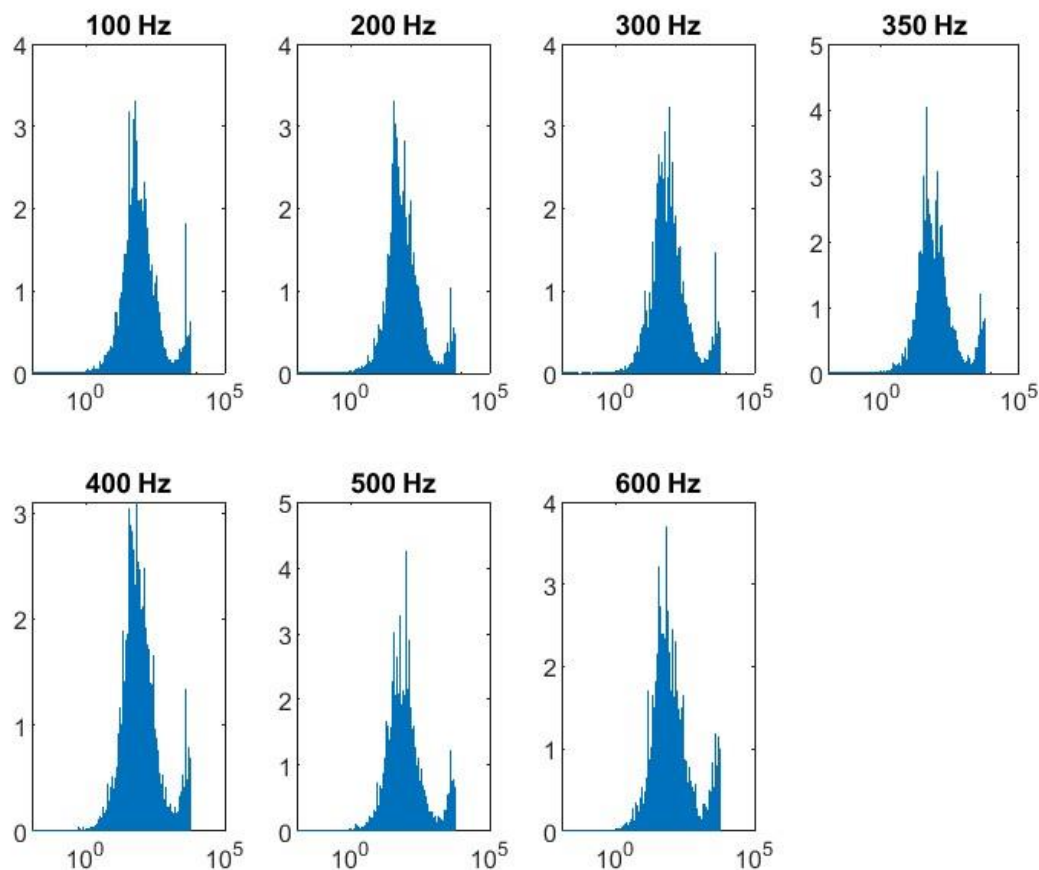


Figura 3.9 Spettro del segnale al variare della frequenza di eccitazione. Sulle ascisse sono riportate le frequenze mentre sulle ordinate l'energia misurata in dB/Hz. Sopra ogni grafico è riportata la frequenza di eccitazione

Nei vari grafici si nota la mancanza di un picco di energia in corrispondenza della frequenza eccitante; l'unico picco presente si riscontra al di sopra dei 4000 Hz ma è dovuto al rumore inevitabilmente presente, come, ad esempio, quello provocato dalla rotazione del motore della PAT. Per le posizioni 3 e 4 sono presenti anche leggeri picchi a frequenze più basse, intorno ai 70 Hz ma comunque troppo poco intensi per poter essere associati alla presenza dell'eccitazione per cui si presume che siano anch'essi conseguenza del rumore esterno o dei disturbi durante le misurazioni.

Data la mancanza di picchi in corrispondenza delle frequenze d'eccitazione si è continuato ad effettuare misurazioni cambiando i parametri dell'onda e del flusso. Le successive misurazioni sono state tutte svolte con l'anemometro nella posizione 1 ovvero allo sbocco del convergente al centro. Inoltre, dato che si cercava semplicemente di accertare se nello spettro comparisse o meno un picco, non è stata effettuata una nuova calibrazione dello strumento, necessaria in quanto le nuove misurazioni sono state effettuate in un giorno differente, ma si è costruito il grafico a partire dal valore

di tensione dell'anemometro. Infatti l'andamento dello spettro rimane identico ma cambiano i valori perché manca l'interpolazione polinomiale per il passaggio da tensione a velocità.

Analizzati tali risultati, inizialmente si è pensato che l'intensità dell'onda eccitante non fosse sufficiente per essere rilevata all'interno del getto dall'anemometro. Si è allora ripetuto l'esperimento variando il valore dell'ampiezza dell'onda, portandolo progressivamente dai 2 V iniziali fino a 12 V, mantenendo fissa la frequenza di eccitazione pari a quella di risonanza, ovvero 350 Hz.

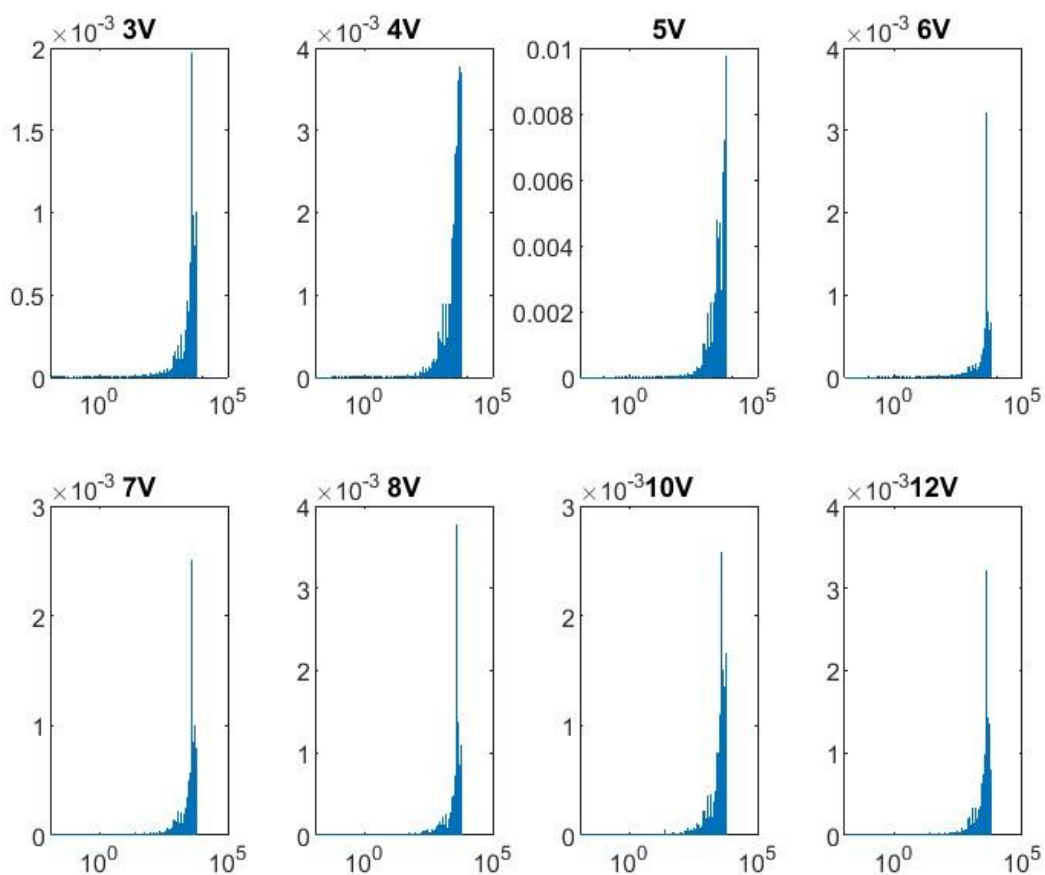


Figura 3.10 Spettro del segnale a partire dal valore di tensione dell'anemometro per valori di frequenza pari a 350 Hz, velocità del flusso di 5 m/s e ampiezza variabile da 2 V fino a 12 V. Sulle ascisse sono riportate le frequenze, sulle ordinate l'energia in V/Hz

Anche così, tuttavia, non è comparso alcun picco nello spettro del segnale. Non si è inoltre provato ad aumentare ulteriormente l'ampiezza sia per non rischiare di rompere l'altoparlante sia perché in ogni caso nello spettro continuava a non vedersi alcun cambiamento rispetto al caso iniziale.

Si è allora deciso di agire sulla velocità del flusso. Siccome la frequenza di risonanza era stata misurata con flusso spento si è deciso di ripetere le misurazioni abbassando la velocità del motore. Si

è perciò impostata una velocità del motore pari a 3 Hz, che corrispondono a 3.84 m/s del flusso e si è prodotta un'onda eccitante con frequenza pari a 350 Hz e ampiezza di 4 V.

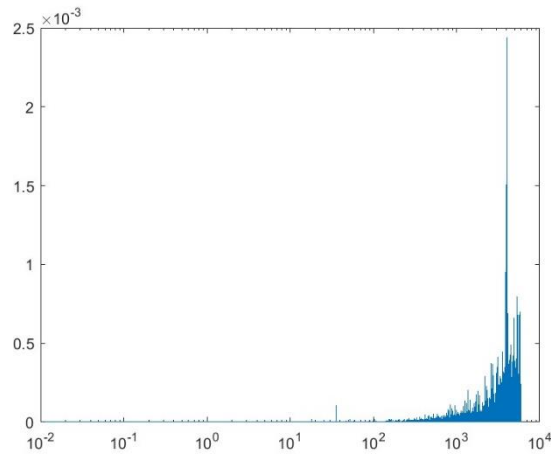


Figura 3.11 Spettro del segnale a partire dal valore di tensione dell'anemometro per frequenza pari a 350 Hz, velocità del flusso di 3.84 m/s e ampiezza pari a 4 V. Sulle ascisse sono riportate le frequenze mentre sulle ordinate l'energia in V/Hz

In questo caso, è comparso un leggerissimo picco in corrispondenza di una frequenza pari a 36 Hz pari a circa un decimo rispetto all'onda eccitante. Tale picco comunque è troppo lieve per essere associato ad una risonanza della precamera.

Nonostante ciò, sono state comunque svolte indagini su questo picco, aumentando l'ampiezza dell'onda fino a 10 V ed effettuando una misurazione per tre diverse frequenze: 100 Hz, 350 Hz e 600 Hz.

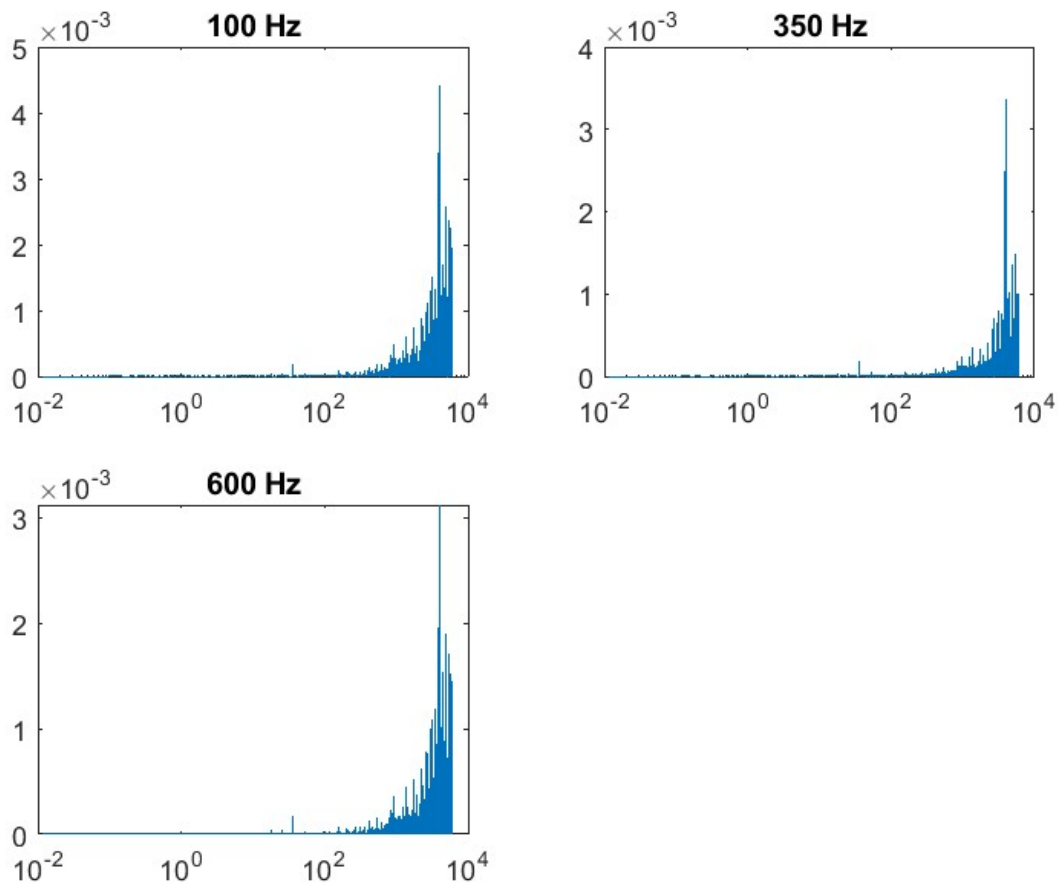


Figura 3.12 Spettro del segnale a partire dal valore di tensione dell'anemometro per ampiezza di 10 V, velocità del flusso di 3,84 m/s e frequenza variabile tra 100 Hz, 350 Hz e 600 Hz. Sulle ascisse sono riportate le frequenze, sulle ordinate l'energia in V/Hz

In tutti e tre i casi, però, il grafico ha mantenuto esattamente lo stesso andamento, evidenziando un flebile picco intorno ai 36 Hz.

Si è allora deciso di abbassare ulteriormente la velocità del flusso portandola a 2.79 m/s, che corrispondono a 2 Hz del motore nonché mantenendo costante l'ampiezza a 4V.

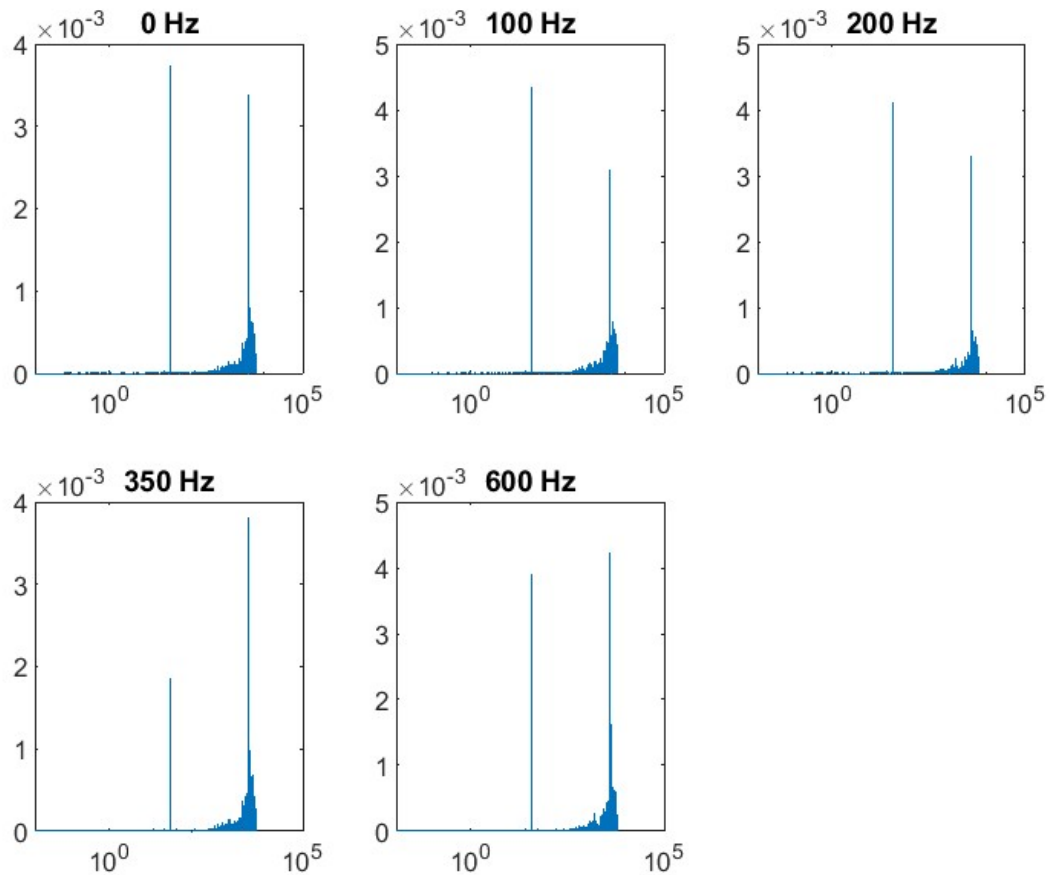


Figura 3.13 Spettro del segnale a partire dal valore di tensione dell'anemometro per ampiezza di 4V, velocità del flusso di 2.79 m/s, frequenza variabile tra 0Hz,100Hz,200Hz,350Hz,600Hz. Sulle ascisse sono riportate le frequenze, sulle ordinate l'energia in V/Hz

Si è così potuto constatare che l'intensità del picco a 36 Hz è molto maggiore ma questo rimane presente anche quando la frequenza di eccitazione è nulla, il che conferma che questo picco non è legato all'onda eccitante.

Successivamente si è provato ad agire sulla frequenza dell'onda eccitante.

In particolare, si è riportata la velocità del flusso a 5 m/s, ovvero 3.8 Hz del motore, e si è prodotta una sinusoide con frequenza pari a 1000 Hz: il tutto è stato ripetuto per due valori di ampiezza, 4V e 10V.

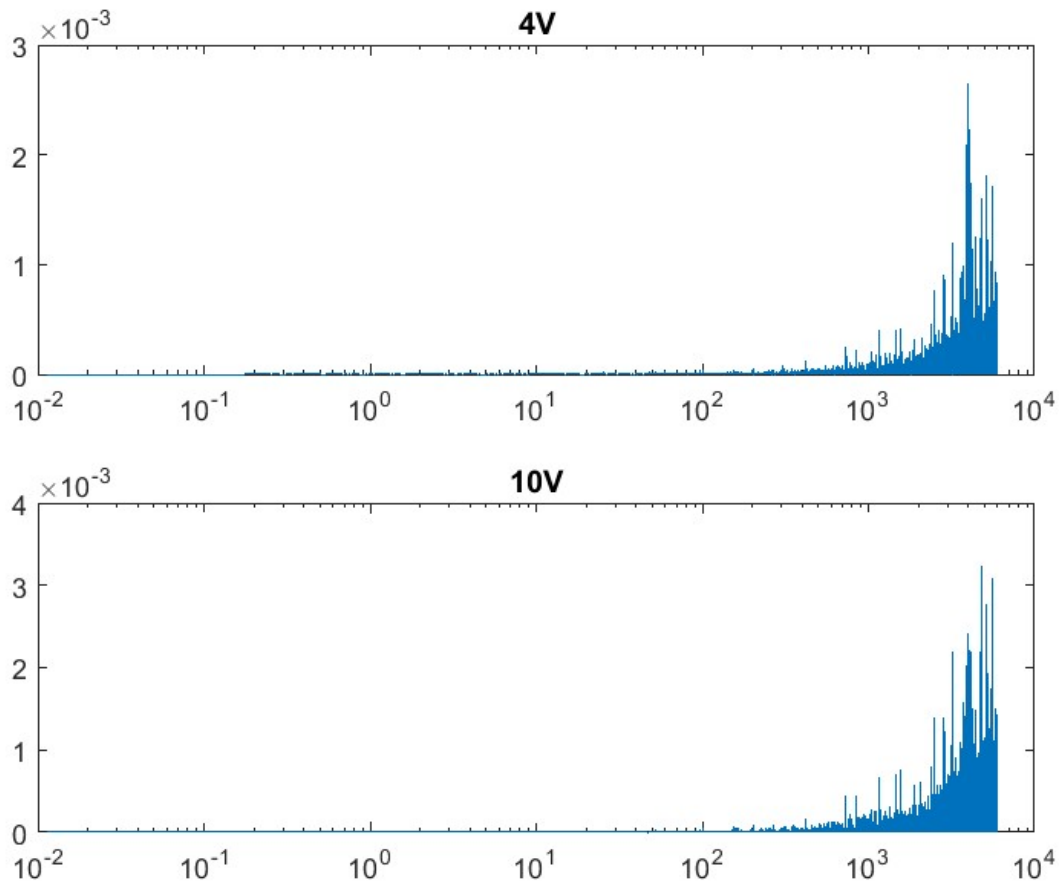


Figura 3.14 Spettro del segnale a partire dal valore di tensione dell'anemometro per frequenza pari a 1000 Hz, velocità del flusso di 5 m/s e ampiezza variabile tra 4V e 10V. Sulle ascisse sono riportate le frequenze, sulle ordinate l'energia in V/Hz

In entrambi i casi il grafico ritorna ad essere simile a quelli iniziali in cui non è presente alcun picco se non quelli ad elevatissima frequenza, legati al rumore esterno.

Si è infine deciso di lavorare intorno alle frequenze in corrispondenza delle quali comparivano i lievi picchi abbassando la velocità del flusso.

A seguire si sono impostati il motore a 3.8 Hz e l'ampiezza dell'onda a 12 V.

Poi si è variata la frequenza tra sei distinti valori:

- 10 Hz
- 20 Hz
- 25 Hz
- 30 Hz
- 35 Hz
- 40 Hz

Osservando in tempo reale l'oscilloscopio ci si è subito accorti che si stavano finalmente indagando le frequenze giuste dato che utilizzando una frequenza pari a 30 Hz, l'andamento del segnale dell'anemometro ricalcava quasi perfettamente l'andamento dell'onda eccitante.

Si è allora proceduto con una nuova calibrazione dello strumento al fine di ottenere nuovamente spettri del segnale a partire dai valori di velocità del flusso.

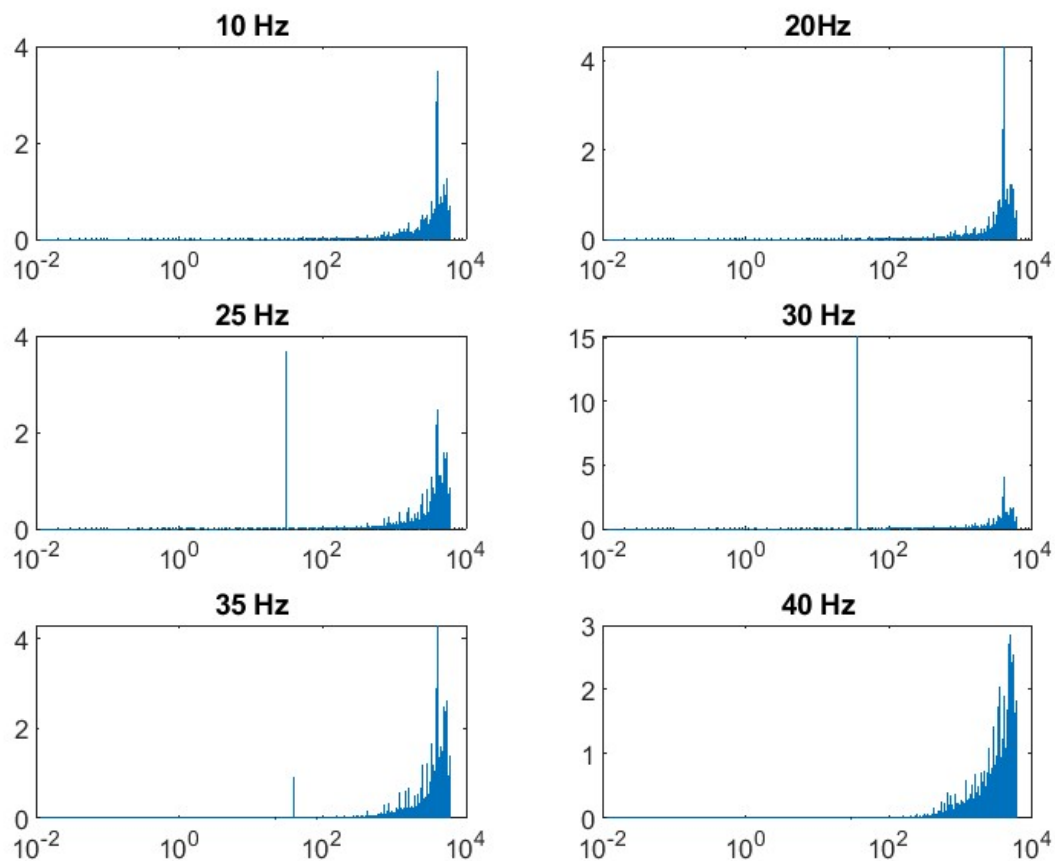


Figura 3.15 Spettro del segnale al variare della frequenza di eccitazione. Sulle ascisse sono riportate le frequenze mentre sulle ordinate l'energia misurata in dB/Hz. Sopra ogni grafico è riportata la frequenza di eccitazione

In questo caso si nota subito come per le frequenze di eccitazioni pari a 25 Hz, 30 Hz e 35 Hz si assiste alla comparsa di un forte picco in corrispondenza di tali frequenze. I picchi sono in realtà traslati verso l'alto di circa 5 Hz ma questo potrebbe essere dovuto alla poca precisione del generatore d'onda la cui manopola, selezionando come moltiplicatore 100 Hz, ha scatti di 10 Hz alla volta e quindi probabilmente non si è riusciti a posizionarla nel punto desiderato. I picchi, inoltre, al di fuori delle tre frequenze indicate sopra, non sono presenti, a differenza di ciò che accade con velocità del flusso più basse. Questo fa quindi capire che tali picchi sono direttamente legate alla presenza dell'onda eccitante.

3.2 Discussioni

Benché siano stati necessari più tentativi, in definitiva l'esperimento può considerarsi riuscito in quanto si è trovata una frequenza di risonanza in corrispondenza della quale si trova un picco nello spettro del segnale.

Tuttavia la frequenza non corrisponde a quella che ci aspettava dagli esperimenti preliminari. Quest'ultima, infatti, era legata alla risonanza della precamera di calma. Ed invero, in corrispondenza di quella frequenza di eccitazione, non solo sull'oscilloscopio era possibile riscontrare un segnale dell'anemometro leggermente più simile all'andamento dell'onda ma, altresì, ad orecchio era possibile percepire che la precamera in cui era installata la cassa risuonava.

È quindi plausibile ritenere che la risonanza che si è riscontrata intorno ai 30 Hz non sia legata alla precamera di calma bensì al flusso o ad un'altra componente della PAT.

Ulteriori futuri lavori, quindi, potranno indagare quale sia la causa della risonanza a questa determinata frequenza.

Un altro possibile sviluppo futuro può implicare la ricerca della risonanza della precamera di calma anche con il flusso in movimento: per far ciò si potrebbe aumentare significativamente l'ampiezza dell'onda eccitante, servendosi anche di un amplificatore.

Un'altra accortezza per migliorare l'esperimento e renderlo più preciso potrebbe consistere nella sostituzione del generatore d'onda ad esempio con un programma informatico. Infatti, come detto, i picchi riscontrati nell'ultima configurazione dell'esperimento si collocano a frequenze leggermente traslate rispetto a quella d'eccitazione, probabilmente a causa della poca precisione del generatore nel selezionare la frequenza prescelta. Tramite l'utilizzo di un programma informatico o di un generatore d'onda più preciso, pertanto, potrebbe essere possibile verificare se questo shift in frequenza sia effettivamente la conseguenza di quanto sopra esposto.

Su altro fronte, si potrebbe poi cercare di migliorare il programma di elaborazione dati implementato su MATLAB. E difatti, potrebbe essere interessante inserire un filtro che elimini il rumore indesiderato in modo da ottenere degli spettri in cui gli unici picchi siano legati all'onda eccitante.

Capitolo 4

Conclusioni

Lo scopo del lavoro di tesi era la realizzazione di un sistema di controllo del flusso mediante eccitazione acustica e la successiva verifica del suo funzionamento, con ricerca di una frequenza di risonanza.

La prima parte è stata compiuta mediante l'utilizzo di un semplice generatore d'onda, di una cassa con i relativi oggetti necessari per il fissaggio e dei cavi per il collegamento tra i due componenti.

Per la verifica si è reso necessario l'utilizzo di un anemometro a filo caldo, una DAQ in grado di salvare i dati e trasferirli ad un computer, ed un oscilloscopio.

Sostanzialmente anche l'altra finalità del lavoro è stata perseguita dato che le prove sperimentali eseguite hanno consentito di trovare una frequenza di eccitazione del flusso capace di generare un picco di energia nello spettro del segnale.

Come esposto nella sezione 3.2 , tuttavia, il valore di frequenza di risonanza accertato è diverso da quello che era stato inizialmente ipotizzato.

Elenco delle figure

- 1.1 Topologia del getto [6]
- 1.2 Onda sonora [7]
- 1.3 Onda sinusoidale (sopra) e onda quadra (sotto) [8]
- 1.4 Anemometro a filo caldo [9]
- 1.5 Streamline 90N10 con moduli CTA 90C10
- 1.6 Tubo di Pitot [10]
- 1.7 Schema di altoparlante: (1) magnete (2) bobina solenoidale (3) sospensioni (4) membrana a cono [11]
- 1.8 Generatore d'onda TG120 del tipo presente nel laboratorio [12]
- 1.9 Oscilloscopio DPO2024B del tipo presente in laboratorio [13]
- 2.1 Vista laterale della PAT: (A) motore trifase (B) precamera di calma (C) tubi di plastica (D) sfere di vetro (E) strutture a nido d'ape (F) schermi (G) convergente [14]
- 2.2 Trasduttore MKS
- 2.3 Sistema NI c-DAQ 9189
- 3.1 Andamento del segnale con frequenza di eccitazione a 100 Hz: (sinistra) nell'intero tempo di acquisizione (destra) nell'unità di tempo
- 3.2 Spettro del segnale al variare della frequenza di eccitazione. Sulle ascisse sono riportate le frequenze mentre sulle ordinate l'energia misurata in dB/Hz. Sopra ogni grafico è riportata la frequenza di eccitazione
- 3.3 Andamento del segnale con frequenza di eccitazione a 100 Hz: (sinistra) nell'intero tempo di acquisizione (destra) nell'unità di tempo
- 3.4 Spettro del segnale al variare della frequenza di eccitazione. Sulle ascisse sono riportate le frequenze mentre sulle ordinate l'energia misurata in dB/Hz. Sopra ogni grafico è riportata la frequenza di eccitazione
- 3.5 Andamento del segnale con frequenza di eccitazione a 100 Hz: (sinistra) nell'intero tempo di acquisizione (destra) nell'unità di tempo
- 3.6 Spettro del segnale al variare della frequenza di eccitazione. Sulle ascisse sono riportate le frequenze mentre sulle ordinate l'energia misurata in dB/Hz. Sopra ogni grafico è riportata la frequenza di eccitazione
- 3.7 Profilo di velocità

- 3.8 Andamento del segnale con frequenza di eccitazione a 100 Hz: (sinistra) nell'intero tempo di acquisizione (destra) nell'unità di tempo
- 3.9 Spettro del segnale al variare della frequenza di eccitazione. Sulle ascisse sono riportate le frequenze mentre sulle ordinate l'energia misurata in dB/Hz. Sopra ogni grafico è riportata la frequenza di eccitazione
- 3.10 Spettro del segnale a partire dal valore di tensione dell'anemometro per valori di frequenza pari a 350 Hz, velocità del flusso di 5 m/s e ampiezza variabile da 2 V fino a 12 V. Sulle ascisse sono riportate le frequenze, sulle ordinate l'energia in V/Hz
- 3.11 Spettro del segnale a partire dal valore di tensione dell'anemometro per frequenza pari a 350 Hz, velocità del flusso di 3.84 m/s e ampiezza pari a 4 V. Sulle ascisse sono riportate le frequenze, sulle ordinate l'energia in V/Hz
- 3.12 Spettro del segnale a partire dal valore di tensione dell'anemometro per ampiezza pari a 10V, velocità del flusso di 3,84 m/s e frequenza variabile tra 100 Hz,350 Hz,600Hz. Sulle ascisse sono riportate le frequenze, sulle ordinate l'energia in V/Hz
- 3.13 Spettro del segnale a partire dal valore di tensione dell'anemometro per ampiezza di 4V, velocità del flusso di 2.79 m/s e frequenza variabile tra 0Hz,100Hz,200Hz,350Hz e 600Hz. Sulle ascisse sono riportate le frequenze, sulle ordinate l'energia in V/Hz
- 3.14 Spettro del segnale a partire dal valore di tensione dell'anemometro per frequenza pari a 1000 Hz, velocità del flusso di 5 m/s e ampiezza variabile tra 4V e 10V. Sulle ascisse sono riportate le frequenze, sulle ordinate l'energia in V/Hz
- 3.15 Spettro del segnale al variare della frequenza di eccitazione. Sulle ascisse sono riportate le frequenze mentre sulle ordinate l'energia misurata in dB/Hz. Sopra ogni grafico è riportata la frequenza di eccitazione

Bibliografia

- [1] Segalini, A. & Talamelli, A., s.d. A sensitivity analysis of acoustic forcing on coaxial jets. *submitted*.
- [2] Nasr, A. & Lai, J. C. S., 1997. Two parallel plane jets: mean flow and effects of acoustic excitation. *Experiments in Fluids*, Volume 22, pp. 251-260.
- [3] Phimshtein, V. G., 2016. On the Appearance of a System of Ring Vortices in the Mixing Layer of Axially Symmetric Turbulent Jets under Acoustic Action. *Acoustical Physics*, 62(4), pp. 491-494.
- [4] Kopiev, V. F. et al., 2013. Acoustic Control of Instability Waves in a Turbulent Jet. *Acoustical Physics*, 59(1), pp. 16-26.
- [5] Mironov, A. K., Krasheninnikov, S. Y., Maslov, V. P. & Zakharov, D. E., 2016. Experimental Study of Propagation of Instability Waves in a Submerged Jet under Transverse Acoustic Excitation. *Acoustical Physics*, 62(4), pp. 483-490.
- [6] Kooner, P., 2013. Numerical Analysis of the Flow Behavior of a Turbulent Round Free Jet Course Name and Number: Applied Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer. *ResearchGate*.
- [7] https://it.wikipedia.org/wiki/File:Onda_sonora.jpg
- [8] https://it.wikipedia.org/wiki/Forma_d%27onda#/media/File:Waveforms.svg
- [9] <https://arwmisure.it/corporate/anemometro-a-ventolina-e-a-filo-caldo/>
- [10] Zambon, S., 2023. *TUBO DI PITOT: ANALISI E APPLICAZIONI*, s.l.: s.n.
- [11] <https://it.wikipedia.org/wiki/Altoparlante#/media/File:Loudspeaker-bass.png>
- [12] <https://www.aimtti.com/product-category/legacy-products/aim-tg120>
- [13] <https://www.valuetronics.com/product/dpo2024b-tektronix-digital-oscilloscope-used>
- [14] Carioli, N., 2022. *Realizzazione in stampa 3D e calibrazione attraverso procedura semplificata di una sonda a 5 fori*, s.l.: s.n.