

Indice

Introduzione	3
CAPITOLO 1 WINS	6
1.1 Applicazioni	7
CAPITOLO 2 DESCRIZIONE DEL DISPOSITIVO	9
2.1 Descrizione ali	9
CAPITOLO 3 INTERAZIONE FLUIDO-STRUTTURA	12
3.1 Flutter	12
3.2 Teoria dell'Airfoil ed equazione del moto	13
CAPITOLO 4 APPARATO STRUMENTALE	17
4.1 Galleria del vento	17
4.3 Cella di carico mono	21
4.4 Cella di carico a tre assi	23
4.5 Smoke generator	24
4.6 Stampante 3D	25
4.7 Telecamera	26
CAPITOLO 5 ANALISI SPERIMENTALE	27
5.1 Descrizione del moto	27
5.2 Parametri d'influenza	30
5.3 Misure della forza di drag	32
5.4 Confronto con il sistema a due gradi di libertà	42
5.5 Misure di potenza e frequenza	46

<i>CAPITOLO 6</i> CONCLUSIONI	50
Bibliografia	51
Ringraziamenti	53

Introduzione

In questi anni il tema dell' "Energy Harvesting" (che tradotto in italiano significa "raccolta di energia") è oggetto di molte ricerche. Per "Energy Harvesting" si indica un insieme di processi sfruttati da dispositivi elettronici, in grado di catturare energia da fonti esterne, che in altro modo verrebbe dissipata, e di convertirla in energia elettrica.

Lo sviluppo di questi dispositivi, che permettono l'estrazione e la conversione di energia, è reso necessario dalla diminuzione della disponibilità e dall'aumento del costo dei carburanti fossili, oltre che dalla comune e crescente sensibilità nei confronti delle problematiche ambientali.

Le fonti di tale energia sono molteplici: per esempio, grazie al gran numero di trasmettitori di onde radio presenti oggi in ambiente, è possibile pensare di progettare dispositivi che utilizzano i loro segnali di fondo come sorgenti di energia. Purtroppo tali strumenti hanno potenza limitata e generalmente richiedono vicinanza alla sorgente per poter funzionare: è stato infatti provato sperimentalmente che la densità di potenza prodotta da un'antenna ricevitore segue la legge E^2/Z_0 e che quindi un campo elettrico di intensità 1 V/m comporta un conversione di soli 0.26 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Ma campi di questo tipo in genere sono rari, a meno che non ci si trovi vicino alla sorgente.

Un'altra promettente possibilità è lo sfruttamento della luce come sorgente, infatti l'efficienza di conversione in energia, in questo caso, può raggiungere il 20% e l'intervallo di potenza prodotta si estende per diversi ordini di grandezza. L'utilizzo di tali dispositivi è però limitato a luoghi aperti e fortemente soleggiati e risulta inefficiente in quelli chiusi.

Al momento i materiali impiegati per tale scopo sono soprattutto monocristalli di silicio, ma si continua a ricercarne di nuovi che permettano un aumento dell'efficienza.

Un'altra tipologia di "Energy Harvesting" è quella della conversione termoelettrica. È possibile infatti sfruttare una differenza di temperatura tra due corpi per produrre

energia elettrica. Tale conversione è limitata superiormente dal rendimento di Carnot (se si ipotizzano scambi termici isotermi):

$$\eta = \frac{T_h - T_l}{T_h}$$

Dove T_h è la temperatura della sorgente a più alta temperatura e T_l è la temperatura di quella più bassa.

Quindi, ad esempio, una conversione termoelettrica tra la temperatura corporea (37°C) e l'ambiente (20°C) può avvenire con un rendimento massimo del 5% che è sufficiente per alimentare un orologio in grado di generare una potenza totale di $60 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (seiko thermic wristwatch).

Per ottenere rendimenti e potenze maggiori occorre avere sorgenti ad alta temperatura, come quella dei gas di scarico di un impianto turbogas o di un motore a combustione interna.

Un'ulteriore fonte di energia è costituita dal corpo umano: infatti sono stati progettati dei dispositivi in grado di convertire un lavoro di tipo meccanico, svolto dai muscoli, in energie elettrica che ne permette il funzionamento.

Un esempio sono le wind-up radio: si tratta di radio alimentate non da comuni batterie, bensì dal movimento di una manovella.

Questi dispositivi possono raggiungere efficienze del 40%, immagazzinando fino a 500 J con 60 giri di manovella che servono ad alimentare il ricevitore.

Un altro modo di sfruttare energia normalmente utilizzata dal corpo umano per muoversi è quella di utilizzare delle scarpe aventi nel tacco un cristallo piezoelettrico che viene compresso tutte le volte che la persona appoggia il piede per terra. Un dispositivo simile può essere sfruttato per ricaricare la batteria di un cellulare.

Un'altra energia che è possibile impiegare è quella delle vibrazioni, che sono una forma di energia molto diffusa, basti pensare ai motori aeronautici, al passaggio di autoveicoli sopra ai ponti, ma anche semplicemente alle lavatrici durante alla centrifuga e ad altri elettrodomestici.

Vi sono principalmente quattro modi per sfruttare l'energia delle vibrazioni:

1. Mettere in movimento una massa la quale, ruotando, induce un campo magnetico che si può sfruttare per la generazione di corrente elettrica.

2. Collegare due masse in moto relativo tra loro, rispettivamente ad un magnete e ad una bobina disposti coassialmente, in maniera tale che la vibrazione generi un moto relativo tra loro, quindi variazione di flusso del campo magnetico della bobina e di conseguenza, per la legge di Faray-Neumann, corrente elettrica.
3. Sfruttare cristalli piezoelettrici che, compressi ciclicamente dal moto vibratorio, generano corrente elettrica.
4. Generare energia sfruttando la variazione di distanza, causata dalle vibrazioni, tra le piastre di un condensatore carico.

Il range di potenza disponibile va dai 4 agli 800 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ e il range di vibrazioni sfruttabili dagli Hz ai kHz.

In questa tesi si è studiato il caso di dispositivi in grado di ricavare energia elettrica attraverso movimenti controllati di un corpo soggetto alla forza di un fluido in movimento.

CAPITOLO 1

WINS

Un esempio di dispositivi in grado di funzionare utilizzando potenze dell'ordine dei μW e mW , che sono quelle generabili da apparecchiature studiate nell'ambito dell' "Energy Harvesting", è rappresentato dalle WINS (Wireless Integrated Network Sensors): si tratta di reti costituite da un elevato numero, a volte può raggiungere le decine di migliaia, di sensori wireless (nodi) che vengono distribuiti nell'ambiente e che cooperano tra loro con lo scopo di monitorare l'ambiente rilevando parametri quali temperatura, pressione, umidità, inquinamento, accelerazione e altri ancora. Questi piccoli dispositivi sono prodotti e distribuiti in massa, hanno un costo di produzione trascurabile e sono caratterizzati da dimensioni e pesi molto ridotti.

La comunicazione, realizzata tramite tecnologia wireless a corto raggio, si basa su di un sistema denominato multi-hop: nodi vicini inviano le informazioni raccolte ad uno o più nodi speciali della rete, detti *sink*, i quali hanno lo scopo di raccogliere i dati e trasmetterli tipicamente ad un server o ad un calcolatore.

Una rappresentazione della più semplice rete WINS è mostrata in figura 1.1.

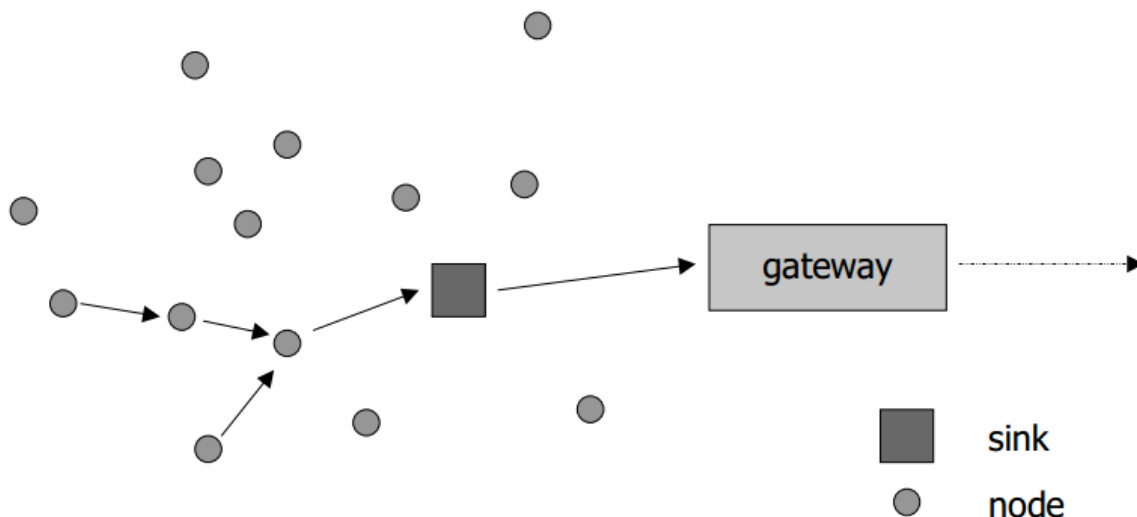


Figura 1.1 – Rappresentazione di una rete WINS

Le motivazioni per cui si sta lavorando ad un continuo sviluppo e messa a punto della tecnologia legata all' "Energy Harvesting" per queste reti sono varie: prima di tutto perché, nella maggior parte dei sensori utilizzati al giorno d'oggi, ogni

dispositivo ha una riserva di energia limitata e non rinnovabile e, una volta messo in opera, deve lavorare autonomamente; per questo motivo tali dispositivi devono mantenere costantemente i consumi molto bassi, in modo da avere un maggior ciclo di vita.

Inoltre, poiché vengono maggiormente utilizzati come strumenti di controllo e monitoraggio, è da tenere in considerazione che molto spesso vengono posizionati in punti non facilmente raggiungibili e di conseguenza, nel caso si scaricassero, la loro sostituzione comporterebbe un costo elevato, dato sia dalla batteria di ricambio sia dall'operazione di sostituzione.

Quindi nel caso in cui non sia possibile utilizzare accumulatori per il sostentamento energetico delle WINS si è costretti a convertire in elettrica l'energia disponibile nell'ambiente circostante come l'energia solare, eolica, vibratoria ecc.

1.1 Applicazioni

Le applicazioni delle WINS sono molteplici, tra le quali:

1. Comunicazione e analisi dati in caso di catastrofe

Uno dei tipi di impiego più spesso citati per WINS sono le operazioni di soccorso; uno scenario tipico è il rilevamento degli incendi. I nodi-sensore di questo tipo sono dotati di termometri e possono determinare la propria posizione, l'uno rispetto all'altro o in coordinate assolute. Questi sensori sono solitamente distribuiti a macchia d'olio, per esempio in una foresta, da un aeroplano. Essi collettivamente producono una mappa termica della zona e determinano il perimetro delle aree con elevata temperatura, che per esempio può essere sfruttata dai vigili del fuoco al fine di valutare il punto più accessibile per intervenire nell'incendio.

2. Controllo dell'ambiente

Le WINS possono essere usate per controllare l'ambiente, per esempio nel monitoraggio degli inquinanti chimici; una possibile applicazione è presso i siti di discarica dei rifiuti. Un altro esempio è il monitoraggio della corrosione marina come nei parchi eolici off-shore.

3. Edifici intelligenti

Un monitoraggio ad alta risoluzione in tempo reale di temperatura, flussi d'aria, umidità e altri parametri fisici in un edificio per mezzo di una WINS può aumentare sensibilmente il livello di comfort degli abitanti e ridurre il consumo di energia dovuto, per esempio, da ventilazione inefficiente, dispersioni termiche e utilizzo di aria condizionata. Inoltre possono essere utilizzate per monitorare i livelli di stress meccanico di edifici in zone sismicamente attive, misurare parametri meccanici come il carico di flessione di travi e valutare se è sicuro entrare in un determinato edificio dopo un terremoto o se l'edificio è sull'orlo del collasso. Sistemi simili possono essere applicati anche ai ponti.

Nonostante la maggior parte di queste applicazioni siano possibili anche con attuali tecnologie, le WINS sono caratterizzate da scarsa necessità energetica. Inoltre forniscono informazioni a maggiore risoluzione spaziale e temporale di quelle che possono essere fornite dai sensori appartenenti alla tecnologia tradizionale.

Le WINS sono perciò in grado di fornire le informazioni con estrema precisione temporale con il minimo consumo delle risorse possibile.

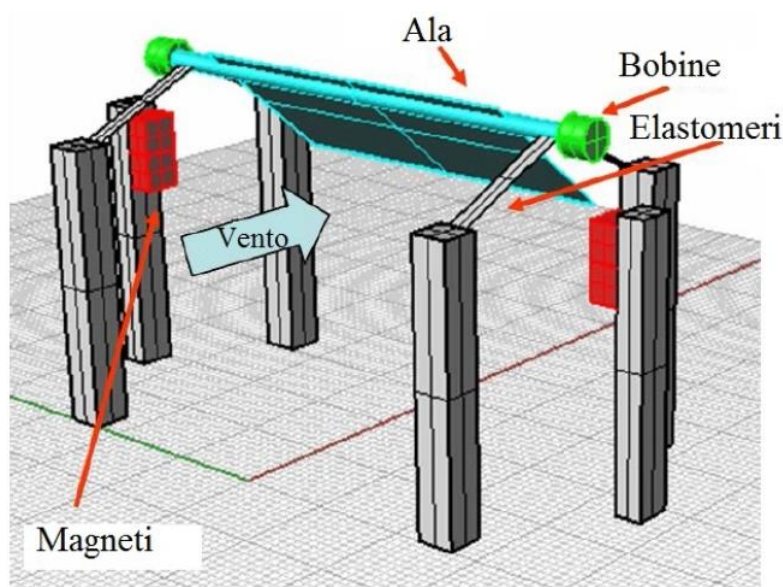
Lo scopo della tesi è la caratterizzazione di un sistema di "Energy Harvesting" in grado di garantire sostentamento energetico di un nodo di una WINS; tale dispositivo sfrutta le vibrazioni indotte su un sistema aeroelastico da parte di un fluido in movimento.

CAPITOLO 2

Descrizione del dispositivo

Il dispositivo, come si nota in figura 2.1, è formato da un supporto costituito da 6 parallelepipedi che sono fissati rigidamente alla base. A due di essi sono fissati dei magneti, mentre agli altri, a due a due, sono fissati gli elastomeri che sorreggono l'ala. Essa può ruotare liberamente attorno ad un'asta di rame fissata agli elastomeri. Solidali all'asta, sono posizionate due bobine che permettono l'accoppiamento elettromagnetico con i magneti.

Figura 2.1 – Rendering del dispositivo impiegato per le misure in laboratorio



2.1 Descrizione ali

Per poter comprendere lo studio affrontato in questa tesi, è necessario prima di tutto descrivere in modo chiaro i parametri che caratterizzano le ali che vengono utilizzate per lo studio del fluttering.

Per aiutare la comprensione, in figura 2.2 è riportata una rappresentazione dell'ala e delle sue principali proprietà.

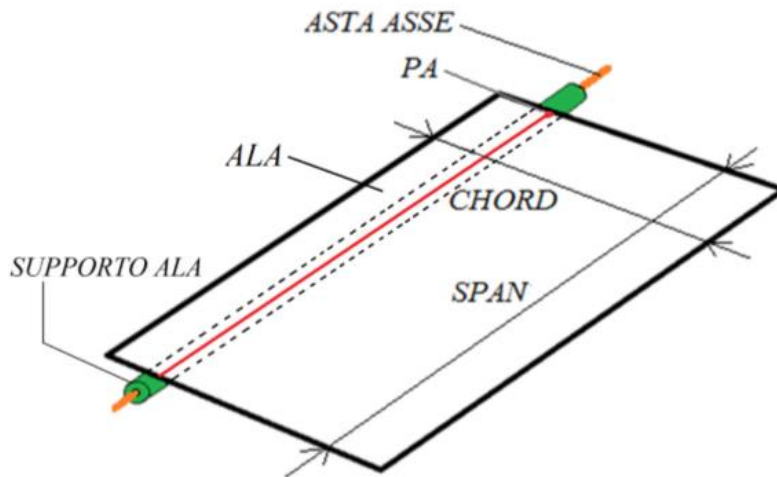


Figura 2.2 – Schema dell'ala adoperata e indicazione delle sue principali parti costitutive utili allo studio del moto

Si definisce trailing edge (TE) la parte posteriore dell'ala, e leading edge (LE) quella anteriore.

Lo Span e la Chord rappresentano rispettivamente la larghezza e la lunghezza dell'ala.

Dal rapporto di queste due dimensioni si può definire l'Aspect Ratio, o allungamento alare:

$$ASPECT\ RATIO = \frac{SPAN}{CHORD}$$

Questo parametro è di grande importanza nello studio dell'interazione ala/fluido, perché influisce direttamente sul valore del *coefficiente di resistenza indotta*, che è un parametro che permette di valutare la resistenza al moto causata dalla perturbazione del flusso che si viene a creare ai bordi dell'ala.

Tale perturbazione è data dal fatto che l'aria, o più in generale un qualunque fluido, tende a muoversi da zone a pressione più alta a zone a pressione più bassa; poiché non può farlo passando davanti al bordo d'attacco (la parte anteriore dell'ala) né dietro il bordo d'uscita (la parte posteriore dell'ala) a causa della direzione del flusso stesso, esso tenderà a passare attorno alle estremità, muovendosi nella direzione dell'asse longitudinale dell'ala. Di conseguenza l'aria si muove in maniera circolare dal ventre al dorso dell'ala, passando attorno alle sue estremità e dà vita a quelli che

vengono chiamati vortici d'estremità (figura 2.3) che causano una perturbazione del flusso.



Figura 2.3 – Vortice di estremità causato dall'ala di un aeroplano

Il punto di attacco PA è definito come il rapporto della posizione X della Chord nella quale passa l'asse di rotazione e la Chord stessa: $PA = \frac{X}{Chord}$

Variando la posizione del punto di attacco è possibile modificare la posizione del centro di massa dell'ala CM.

Al fine di minimizzare il peso dei vari componenti si è scelto di utilizzare materiali polimerici per la realizzazione dell'intero sistema; il foil, che costituisce la superficie effettiva dell'ala, è realizzata in polivinil acetato ($\rho=1,17 \text{ g/cm}^3$) e ha uno spessore di 200 μm , mentre il supporto dell'ala, fissato attraverso incollaggio nella parte inferiore, è realizzato in poli(acido lattico) ($\rho=1,25 \text{ g/cm}^3$) utilizzando una stampante 3D.

Quest'ultimo possiede un profilo semicircolare: realizzato in modo tale che all'interno del supporto possa passare un'asta di rame di lunghezza 75 mm e diametro 1 mm, che permette la completa rotazione dell'ala intorno al proprio asse, per far sì che il sistema sia in grado di raggiungere le proprie condizioni di fluttering aeroelastico.

CAPITOLO 3

Interazione fluido-struttura

3.1 Flutter

Quando un corpo interagisce con un fluido è soggetto a forze che lo mettono in movimento inducendo, in determinate condizioni, anche oscillazioni di grande ampiezza.

Tale fenomeno prende il nome di Fluttering Aeroelastico.

Il flutter è un'instabilità dinamica di un corpo elastico immerso in un fluido in movimento, causato dalla combinazione tra la deflessione del corpo e la forza esercitata dal fluido. Considerando un sistema lineare il "punto di flutter" è il punto in cui la struttura è in moto armonico semplice, senza smorzamento, di modo che ogni ulteriore diminuzione dello smorzamento netto si tradurrà in un'auto-oscillazione e conseguente possibile rottura. Lo smorzamento netto può essere inteso come somma dello smorzamento positivo naturale della struttura, e lo smorzamento negativo della forza aerodinamica. Il Flutter può essere classificato in due tipi: hard flutter, in cui lo smorzamento netto diminuisce improvvisamente in prossimità del punto di flutter e flutter morbido, in cui lo smorzamento netto diminuisce progressivamente. Strutture esposte alle forze aerodinamiche - come ali ma anche camini e ponti - sono progettati con cura all'interno di parametri noti per evitare il flutter. In strutture complesse in cui sia l'aerodinamica sia le proprietà meccaniche della struttura non sono pienamente descrivibili, il rischio di flutter può essere escluso solo attraverso un test dettagliato. Anche cambiando la distribuzione di massa di un aeromobile o la rigidità di un componente si può indurre flutter in una componente aerodinamica apparentemente non soggetta a tale rischio. In alcuni casi, sistemi di controllo automatico vengono utilizzati per aiutare a prevenire o limitare vibrazioni strutturali legate al flutter. Flutter può verificarsi anche su strutture diverse da aerei. Un famoso esempio di fenomeni di flutter è il crollo del ponte di Tacoma Narrows originale. Il Flutter non è sempre una forza distruttiva; come fenomeno di instabilità aerodinamica controllata viene utilizzato intenzionalmente e positivamente in mulini a vento per la generazione di energia elettrica o in ambito. Nel nostro caso studieremo gli effetti dell'instaurarsi dell'instabilità del flutter nell'ala del nostro sistema.

3.2 Teoria dell'Airfoil e equazione del moto

Per semplificare lo studio del moto di tale corpo, in questa tesi si è deciso di fare ricorso al modello dell'AIRFOIL, in cui l'oggetto in esame è un'ala di forma rettangolare e spessore tale da poter essere trascurato e il flusso si trova in condizioni di regime laminare.

Il sistema preso in considerazione è schematizzabile come un'ala in grado di ruotare su se stessa attorno all'asta del dispositivo, vincolata a due elastomeri posti parallelamente alla direzione del vento, che permettono unicamente un movimento verticale.

Utilizzando questo tipo di configurazione sono possibili unicamente due gradi di libertà: uno di plunge, che consiste nel movimento lungo l'asse verticale, e uno di pitch, che consiste nel movimento intorno all'asse trasversale. In quest'analisi studieremo gli effetti dinamici del fluido sulla struttura e non viceversa.

Per studiare a fondo l'equazione del moto di questa ala è necessario partire dallo studio dell'energia, che può essere scomposta in energia cinetica e potenziale:

$$E_{tot} = E_k + E_v$$

Schematizzando l'ala e il suo moto come in figura 3.1 è possibile esprimere l'energia cinetica come:

$$E_k = \frac{1}{2} m \dot{h}^2 + S \dot{h} \dot{\alpha} + \frac{1}{2} I_\alpha \dot{\alpha}^2$$

Dove

$\frac{1}{2} m \dot{h}^2$ è il contributo di energia cinetica connesso al moto di plunge

$\frac{1}{2} I_\alpha \dot{\alpha}^2$ è il contributo di energia cinetica connesso al moto di pitch

$S \dot{h} \dot{\alpha}$ è il contributo misto dovuto sia al moto di plunge che di pitch

$S = m(c/2 - x_f)$

$I_\alpha = \frac{1}{3} (c^2 - 3cx_f + 3x_f^2)$

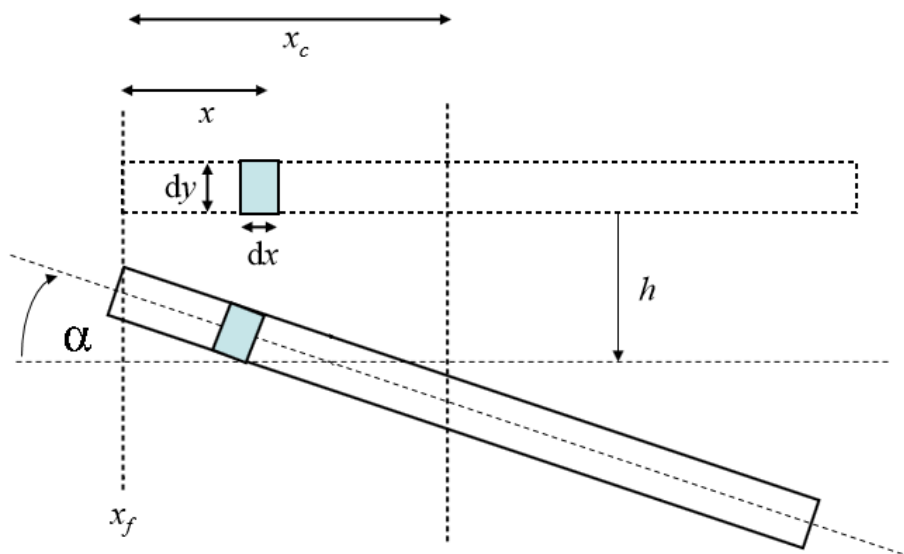


Figura 3.1 – Schematizzazione del profilo alare e del suo moto di pitch and plunge

L'energia potenziale invece è l'energia riposta negli elastici a cui è legata l'ala (la forza peso è trascurabile):

$$E_v = \frac{1}{2} K_h h^2$$

Una volta definita l'energia del sistema è possibile ricavare l'equazione del moto utilizzando l'equazione di Lagrange.

L'equazione del moto così ottenuta ha la forma:

$$M\ddot{q} + Kq = Q$$

in cui Q è il vettore della forza esterna, che nel caso specifico è rappresentata dalla forza del vento che collide con l'ala. Q , in generale, dipenderà non solo da tutte le variabili fisiche e geometriche che influenzano il sistema, ma anche dalla storia del moto che ha avuto precedentemente. Non è quindi sorprendente che l'espressione esplicita di Q sia sconosciuta anche nel caso di fluido non viscoso. L'equazione del moto non può essere risolta senza ulteriori semplificazioni.

Nella trattazione della forza Q è conveniente fare ricorso al modello quasi stazionario, in cui non si tiene conto del contributo alla forza aerodinamica delle scie di vortici (scie vorticosi di von Kármán) che si creano dall'oscillazione dell'ala. Non si tiene neanche conto della forza di drag esercitata in accordo con la trattazione della teoria dell'airfoil.

In questo modello i contributi alle varie forze aerodinamiche sono ridotti a quattro:

1. Velocità orizzontale U incidente sull'airfoil all'angolo $\alpha(t)$;
2. Velocità di plunge dell'airfoil $h(t)$;
3. Componente normale della velocità di pitch;
4. Velocità locale indotta dalla vorticosità intorno all'airfoil.

Di conseguenza è possibile assumere la forza totale risultante sull'ala, semplicemente come la somma di due singole forze: lift e drag (figura 3.2).

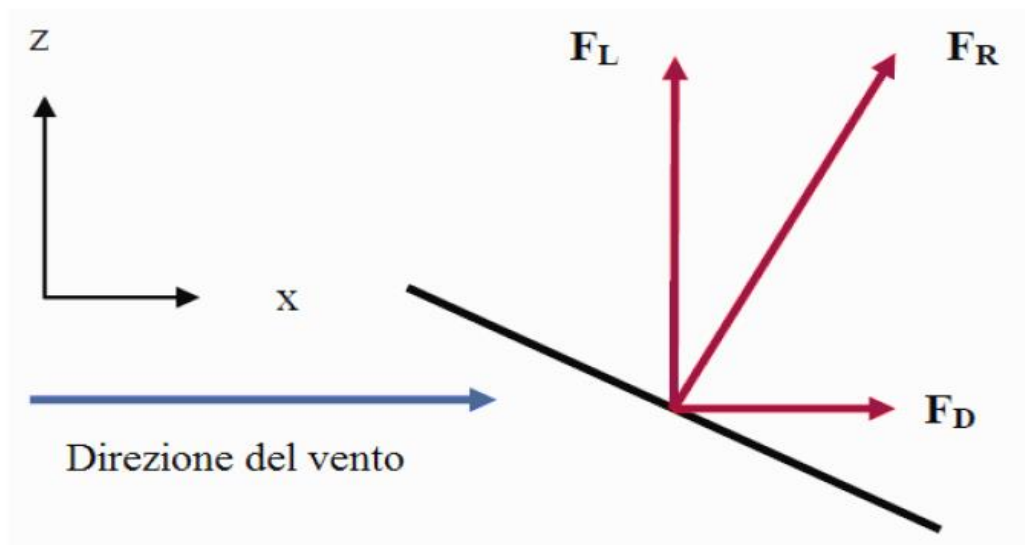


Figura 3.2 – Scomposizione della forza agente su di un airfoil a causa della sua interazione con il vento

F_L rappresenta il lift, o portanza, ed è la forza che permette all'ala di muoversi perpendicolarmente alla direzione del flusso. Tale forza agisce sul centro di pressione, che nel caso di un airfoil coincide con il quarto corda ed è la responsabile del sollevamento dell'ala.

F_D è il drag, cioè la forza che le permette di muoversi in direzione parallela al flusso, ma nelle condizioni in cui si è operato in questo caso, non è stato possibile osservarlo direttamente, poiché l'ala non può spostarsi lungo tale direzione a causa dell'impedimento dato dagli elastici.

Poiché la direzione della forza totale F_R è normale alla superficie dell'ala, è facile comprendere che le due forze di lift e drag non sono indipendenti, ma legate da una relazione.

Facendo qualche approssimazione è possibile scrivere la relazione in funzione dei due coefficienti di lift e di drag che sono ricavabili per via sperimentale:

$$\frac{C_D}{C_L} = \tan(\alpha)$$

Oltre a queste due forze è presente un momento aerodinamico, detto slancio ascensionale, che agisce sull'asse di flessione che permette il movimento di pitch.

Inoltre per poter ottenere una formulazione corretta bisogna introdurre il concetto di effetto di massa aggiunta.

Tale effetto prende in considerazione la massa di aria che l'ala deve spostare per potersi muovere, di conseguenza nel calcolo delle forze agenti bisogna tenere conto del suo contributo. Si considera una massa aggiunta pari a $\rho\pi b^2$ dove $b=c/2$

In conclusione la formulazione della forza di lift e del momento sono:

$$l(t) = \rho\pi b^2 \left(h - \left(x_f - \frac{c}{2} \right) \alpha \right) + \rho\pi b^2 U \alpha + \rho U^2 c \pi \left(\alpha(t) + \frac{\dot{h}(t)}{U} + \left(\frac{3}{4} c - x_f \right) \frac{\dot{\alpha}(t)}{U} \right)$$

$$m_{x_f}(t) = \rho\pi b^2 \left(x_f - \frac{c}{2} \right) \left(\ddot{h} - \left(x_f - \frac{c}{2} \right) \ddot{\alpha} \right) - \frac{\rho\pi b^4}{8} \ddot{\alpha} - \left(\frac{3}{4} c - x_f \right) \rho\pi b^2 U \dot{\alpha} \\ + \rho U^2 c^2 \pi \left(\alpha(t) + \frac{\dot{h}(t)}{U} + \left(\frac{3}{4} c - x_f \right) \frac{\dot{\alpha}(t)}{U} \right) - \frac{1}{16} \rho U c^3 \pi \dot{\alpha}$$

Queste due forze rappresentano i contributi della forza totale agente sull'ala causata dall'interazione con il vento e quindi rappresentano Q nell'equazione del moto ricavata precedentemente.

Per descrivere il comportamento reale del dispositivo sono necessarie prove sperimentali.

CAPITOLO 4

Apparato strumentale

Per poter eseguire le misure necessarie allo studio del sistema in esame è stato utilizzato uno specifico apparato sperimentale in grado di caratterizzarne il moto e la risposta dinamica in funzione dei parametri significativi. Vengono descritti in questo paragrafo gli strumenti utilizzati a tale fine.

4.1 Galleria dei vento

La galleria del vento è un tipico strumento utilizzato negli studi di aerodinamica per comprendere il comportamento di un flusso (solitamente di aria) quando interagisce con un corpo.

Esistono diverse varietà di gallerie, che possono essere classificate in base a:

- *Tipo di costruzione*: ciclo aperto, ciclo chiuso;
- *Velocità del flusso*: subsoniche, transoniche, supersoniche, ipersoniche.

La differenza tra le gallerie a ciclo aperto e quelle a ciclo chiuso consiste nel fatto che nelle prime il fluido viene aspirato dall'ambiente circostante, inviato nella camera di prova e infine rimandato nell'ambiente, mentre nelle seconde è presente un condotto di ritorno grazie al quale una volta che il fluido passa dalla camera di prova viene rimesso in circolo e riutilizzato.

Per differenziare le diverse gallerie in base alla velocità del flusso si utilizza il numero di Mach, che è un gruppo adimensionale che definisce il rapporto tra la velocità di un fluido e la velocità del suono nel fluido considerato (a temperatura fissata):

$$Ma = \frac{v}{a} = \frac{v}{\sqrt{\gamma RT}}$$

Dove:

- v = velocità del fluido
- $\gamma = c_p/c_v$
- R = costante del gas considerato (solitamente per l'aria secca si considera il valore di 287,05)
- T = Temperatura assoluta del fluido

Se il numero di Mach è <1 il flusso è detto subsonico, se $=1$ è detto sonico, se $1 < M < 5$ è supersonico, se >5 è ipersonico.

Inoltre se $Ma < 0.3$ il fluido è considerato incomprimibile.

Nel laboratorio in cui sono state svolte le prove a cui si riferisce questa tesi, si è deciso di progettare e realizzare una galleria subsonica ad aspirazione a ciclo aperto. La scelta di questo tipo di galleria è stata determinata da ragioni di ingombro e praticità e dal fatto che, considerando la velocità della corrente impiegata, il numero di Mach risultante è inferiore a 0.3, quindi si commette un errore trascurabile nel considerare il fluido incomprimibile. La galleria del vento utilizzata consiste in un condotto di sezione variabile nel quale il fluido viene messo in movimento da un ventilatore posto nella parte terminale dello strumento. Il ventilatore è azionato da un motore elettrico asincrono trifase in maniera tale da rendere agevole la regolazione in funzione della tensione di alimentazione.

Potendo assumere il flusso d'aria a densità costante ($Ma < 0,3$), si può semplificare la legge di continuità fino pervenire alla seguente formulazione

$$Q = S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 = cost$$

Dove:

- Q è la portata volumetrica
- S_1 e S_2 sono due generiche aree di due differenti sezioni
- v_1 e v_2 sono i valore della velocità nelle sezioni sopraindicate

Da questa legge si deduce che, avendo realizzato la camera di prova con una sezione minore rispetto a quella d'uscita e a quella d'entrata è possibile ottenere in essa una velocità del flusso superiore a parità di portata Q .

Tenendo in considerazione quanto detto lo schema della galleria in questione è mostrato in figura 5.1:

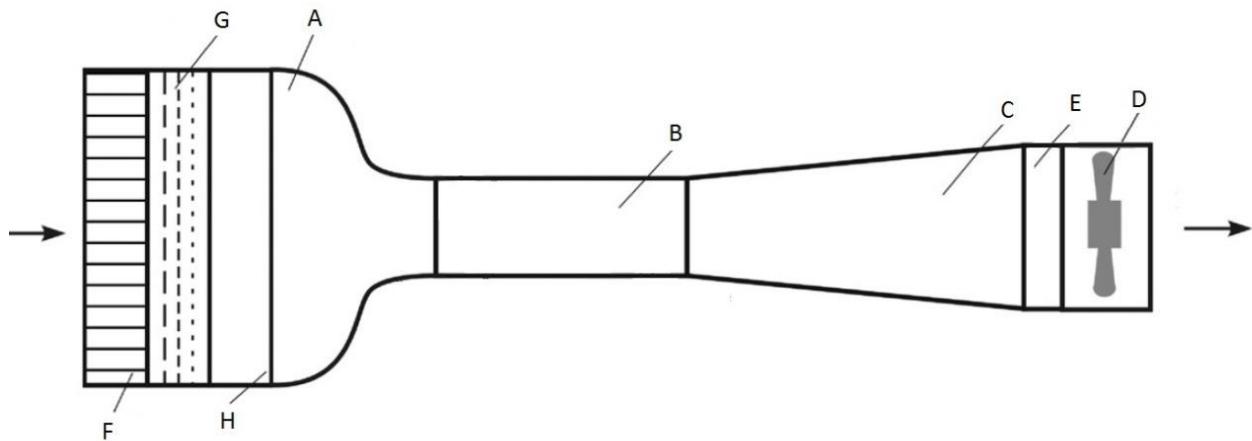


Figura 4.1 – Schema della galleria del vento presente in laboratorio e delle sue componenti

- A. *Nozzle*: è la parte convergente del tunnel, in esso l'aria accelera riducendo contemporaneamente il livello di turbolenza e lo spessore dello strato limite sulle pareti. (Acciaio).
- B. *Camera di prova*: è la parte in cui l'aria ha velocità massima e al suo interno vengono testati il modelli di interesse; è importante conoscere alcuni parametri, come la velocità del fluido e la temperatura, che possono caratterizzare la prova. Il modello deve inoltre avere una sezione frontale molto piccola rispetto alla sezione della condotta in modo da ridurre gli effetti di "bloccaggio" e di interferenza di parete. Se si è sufficientemente distanti dalla parete si può ritenere trascurabile l'influenza dello strato limite. (Acciaio e 4 finestre di Plexiglass).
- C. *Diffusore*: data la sua geometria in esso l'aria viene decelerata in accordo con il principio di continuità. (Acciaio).
- D. *Ventilatore*: il motore utilizzato è di tipo trifasico a regolazione di potenza; la ventola è coassiale al centro della camera di prova. Esso è dotato di pale progettate per garantire la massima aspirazione. Generalmente nelle gallerie del vento viene utilizzato un compressore posizionato nella parte anteriore della camera di prova, ma in questo caso, poiché si vuole ottenere un flusso laminare per simulare il comportamento del vento in spazi aperti, si è optato per un ventilatore posto all'uscita del condotto.

- E. *Shape Adapter*: componente che offre un'apertura circolare a partire dalla sezione quadrata del diffusore idoneo ad ospitare il diametro effettivo della ventola.
- F. *Honeycomb*: è una struttura posizionata prima del nozzle costituita da un pannello a nido d'ape la cui funzione è quella di direzionare il flusso ordinandolo in piccoli "filetti" di aria; per questo motivo è formato da tanti canali paralleli tra loro e alla direzione del flusso. (Policarbonato, 1,1x1,1m² con canali di d=4mm, l=30mm).
- G. *Reti antiturbolenza*: è un'ulteriore strategia per diminuire le turbolenze. Utilizzando uno o più strati di diversa larghezza di trama, posizionati a debita distanza, è possibile spezzare il flusso d'aria ottenendo una corrente più uniforme.
- H. *Settling Chamber*: è l'estensione del Nozzle, atto a ottimizzare la canalizzazione del fluido.

4.2 Cella di carico

Per poter effettuare la misura della forza di drag che agisce sull'ala, è stata utilizzata una cella di carico. Si tratta di un trasduttore in grado di convertire una deformazione meccanica, causata dalla forza da misurare, in una tensione elettrica ad essa proporzionale.



Figura 4.2 – Cella di carico SMT1-5N:CSC-5-1M utilizzata

Il modello di cella di carico utilizzata è SMT1-5N:CSC-5-1M (figura 4.2), prodotta da Interface Advanced Force Measurement, che possiede un carico massimo di 5N e una sensibilità in tensione di output di $\pm 0.0001V$. Questo tipo di cella di carico permette unicamente la misura di una sola componente della forza, in questo caso quella di drag ovvero quella orizzontale. La cella in questione è stata montata in maniera tale da lavorare in compressione.

La cella di carico è accoppiata ad un oscilloscopio gestito da un apposito software, in questo caso Picoscope, che permette la lettura dei valori su di un display.

Per la conversione dei valori in uscita da volt a newton è fornita dal produttore una calibrazione certificata della cella.

Alcune specifiche della cella di carico sono: tensione di alimentazione 5 V, corrente massima di alimentazione 15 mA, banda utile di misura 1 kHz (figura 5.3).

SPECIFICATIONS	
EXCITATION	
Voltage	5 VDC
Current	15 mA MAX
PERFORMANCE	
Bandwidth	1000 Hz
Span Adjustment Range	±8 % FRO
Zero Adjustment Range	±2 % FRO
Nonlinearity	0.02% FS
Span Temperature Coefficient	±0.0036 % /°F
Zero Temperature Coefficient	±0.0014% FRO/°F
ENVIRONMENTAL	
Size	2.2" 1.1" Diameter
Operating Temperature	-40 to 185°F
Enclosure	Stainless Steel Case Compression Cable Seals
Reverse Polarity Protection	-30V

Figura 4.3 – Specifiche della cella di carico fornite dal costruttore

4.3 Cella a tre assi

La cella a tre assi è una cella di carico, solitamente utilizzata in galleria del vento, in grado di misurare le forze normali (di trazione o compressione) lungo tre assi ortogonali concorrenti al centro della cella di carico stessa.

Il suo funzionamento ideale è rappresentabile da:

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 \\ 0 & 0 & K_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix}$$

Ovvero il segnale di lettura V_i è direttamente proporzionale alla forza F_i . È quindi possibile una calibrazione indipendente di ciascun asse di carico essendo le sensibilità incrociate tutte nulle. Nella realtà il comportamento di una cella di carico tre assi è rappresentato da un'equazione più simile alla seguente

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix}$$

Con K_{ij} $i \neq j$ nella cella di carico in uso intorno al 2%. Pertanto vi è una piccola influenza della forza su un'asse sulla misura di quella su un altro, che purtroppo non può essere disaccoppiata. Con tale cella di carico è stato possibile misurare contemporaneamente la forza di drag e di lift del dispositivo.

4.4 Smoke generator

Per poter studiare e visualizzare il comportamento del flusso durante l'interazione con l'ala si è deciso di fare ricorso ad un generatore di fumo in grado di produrre dei filamenti bianchi che possono essere più facilmente visualizzati da una telecamera al buio. Infatti per un flusso permanente le linee di fumo e le traiettoria delle singole particelle del fluido sono coincidenti.

Il fumo, grazie ad una corretta illuminazione, consente di visualizzare e misurare le perturbazioni e le turbolenze create dai prototipi, oltre a valutare la qualità della corrente stessa.

Il modello dello Smoke generator, acquistato per tali misure, è Concept Aerotech Smoke Wand, prodotto dalla compagnia britannica Concept Smoke System Engineering Ltd: una pompa peristaltica permette il trasporto di gocce di olio medicinale dal serbatoio alla punta della sonda, dove è presente una bobina alimentata a bassa tensione che la riscalda producendo una sorgente puntiforme di fumo sotto forma di aerosol.

Per ragioni fluidodinamiche, nonché sperimentali, si è reputato il posizionamento pre-camera quello più favorevole all'ottenimento di un buon tracciamento del flusso.

Poiché durante le prove ci si è accorti che il flusso ottenuto tramite la sonda fornita dal produttore risultava molto disturbato e poco uniforme, si è deciso di sostituirla con una messa a punto in laboratorio costituita da un filo di rame, che attraversa verticalmente la camera di prova, nel quale viene fatta passare una corrente, che per effetto Joule lo riscalda e quindi provoca l'evaporazione delle gocce.

Sia la tensione applicata al filamento di rame, sia la frequenza con cui la pompa preleva le gocce dal serbatoio sono controllabili e regolabili a seconda delle necessità operative.

Questo tipo di sonda ha permesso di ottenere linee di fumo più sottili, poco perturbate e di sufficiente intensità da permetterne una buona osservazione.

4.5 Stampante 3D

È stata utilizzata una stampante 3D (figura 4.4) per realizzare alcune parti dei prototipi, quali i supporti dell'ala, le strutture di supporto a cui saranno connessi gli elastomeri ed altre componenti dei dispositivi. È stata acquistata una stampante 3D per poter realizzare in tempi brevi e costi contenuti componenti aventi geometrie complesse e specifiche allo studio in esame.

La stampante 3D è uno strumento in grado di realizzare oggetti tridimensionali sfruttando la stereo-litografia, processo che consiste nel suddividere in molti piani un volume, disegnato da pc o acquisito via foto, e riprodotto grazie ad una testina mobile in cui è presente un ugello da cui fuoriesce il materiale polimerico che viene depositato piano su piano.

Il modello acquistato per il laboratorio utilizza come materiali l'ABS (Acril Butadien



Figura 4.4 – Cubex 3D printer utilizzata

Stirene) e il PLA (Acido poli-Lattico), possiede una risoluzione spaziale di 100 μm , ed è in grado di realizzare oggetti fino a dimensioni di 230x265x240 mm.

4.6 Telecamera

La telecamera utilizzata per ottenere immagini e video del flusso, dei prototipi, e di altri oggetti posti all'interno della camera di prova della galleria del vento, è la Prosilica GE680 mono, GigE Vision, Allied Vision Technology (figura 4.5).

Si tratta di una telecamera ad alta definizione CCD (a circuito integrato) in B/N



Figura 4.5 – Telecamera Prosilica GE680 adoperata

(mono) provvista di un'interfaccia Gigabit Ethernet, che possiede una velocità di acquisizione massima di 205 fps (frame per second) a 640 x 480 pixels, ma nel caso fosse necessario possono essere raggiunti fps maggiori ricorrendo ad una tecnica chiamata binning, che consiste nel combinare pixel adiacenti in un unico pixel più grande. Questo metodo oltre a permettere un'acquisizione dell'immagine più veloce comporta anche un aumento della sensibilità alla luce, a scapito però della risoluzione.

La suddetta telecamera è fissata su un supporto esterno alla camera di prova, e posta lateralmente ad essa. Inoltre le acquisizioni sono state gestite da Imaqtool, un programma grafico di Matlab, e con quest'ultimo sono state anche svolte le elaborazioni video.

Analisi sperimentale**5.1 Descrizione del moto**

Le prove sperimentali sono state effettuate posizionando il dispositivo nella galleria del vento, in modo tale che il flusso d'aria investisse perpendicolarmente l'ala a riposo.

Ciò che si è notato è che, superata una certa soglia di velocità del vento, l'ala instaurava un moto oscillatorio complesso.

La figura 5.1 illustra il comportamento dell'ala al variare della velocità del vento. Le immagini illustrano nello specifico la traiettoria del trailing edge.

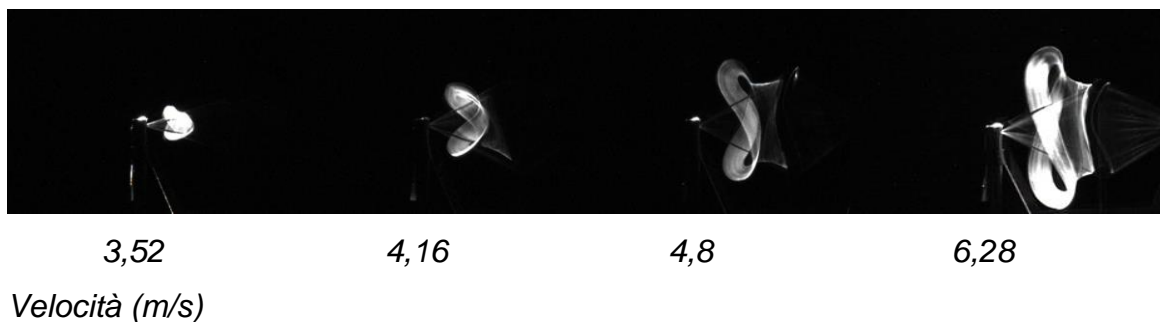


Figura 5.1 – Foto scattate in laboratorio che mostrano l'instaurarsi di un moto complesso all'aumentare della velocità del vento.

A velocità del vento nulla, l'ala a riposo si dispone perpendicolarmente agli elastici.

Quando il flusso d'aria inizia a transitare per la galleria del vento, l'ala ruota attorno all'asta proporzionalmente alla velocità del vento fino ad essere parallela agli elastici, minimizzando la superficie perpendicolare al vento e opponendo quindi la minima forza di drag.

Aumentando la velocità del vento si arriverà ad un punto ($v=3.52$ m/s nel caso in figura) in cui il sistema diventerà instabile e quindi l'ala inizierà un moto di pitch and plunge, ovvero un moto verticale alternato e oscillatorio intorno all'asta, che viene determinato dalla forza del vento e degli elastici. Osservando il moto del trailing edge in figura, si può notare che la traiettoria assomiglia ad un 8 via via più definito e di ampiezza maggiore, quanto maggiore è la velocità del flusso d'aria.

Si verifica sperimentalmente come l'instaurarsi del moto di pitch and plunge si traduca in un immediato incremento della forza di drag.

Per comprendere invece il moto del fluido che impatta sulla superficie dell'ala, grazie all'impiego dello smoke generator, sono state realizzate delle foto (figura 5.2) in cui è possibile distinguere con chiarezza come l'interazione tra il flusso e la superficie dell'ala dia luogo a delle scie vorticosose.

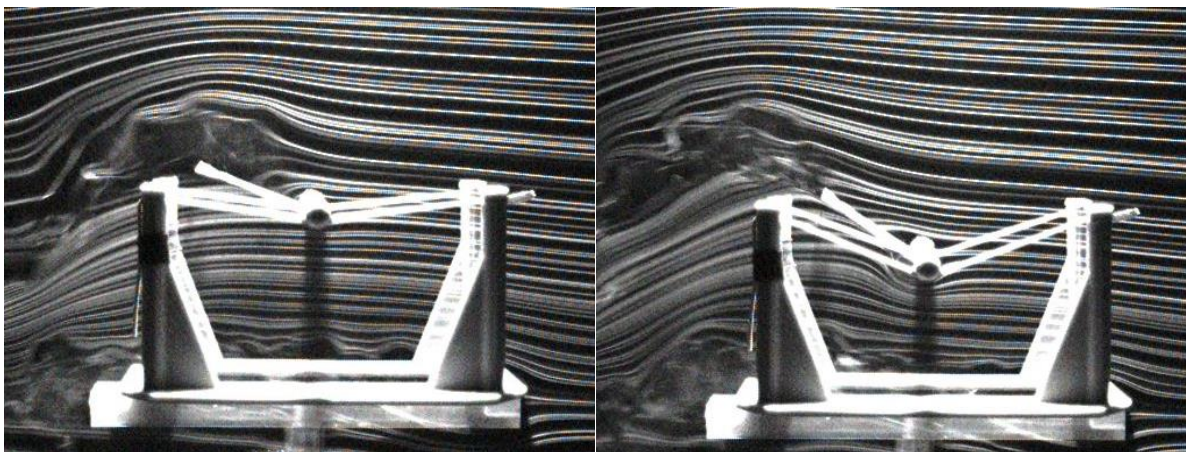
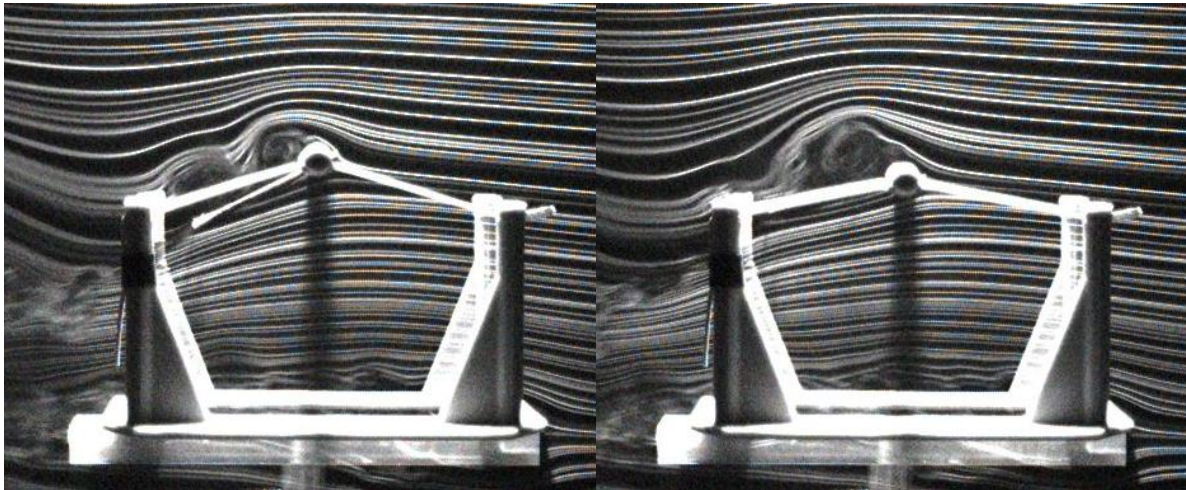


Figura 5.2 – Foto scattate in sequenza che mostrano la formazione e la scomparsa di un vortice

Come si può notare tali vortici si creano nel momento in cui il flusso viene a contatto con la superficie dell'ala in movimento e si dissolvono una volta che se ne distaccano.

È molto probabile che tale fenomeno vorticoso sia legato all'instaurarsi del flutter e influenzi la forza di drag che agisce sull'ala in movimento.

5.2 Parametri d'influenza

Tale moto è influenzato da vari parametri quali: massa, posizione del centro di massa, velocità del vento, corda, tensione degli elastici.

Quindi sono state eseguite diverse prove per osservare l'influenza dei singoli parametri sul moto dell'ala e in particolare sulla forza di drag.

Sperimentalmente si è osservato che per $0,25 < PA < 0,50$ il sistema non raggiunge condizioni stabili di oscillazione; per questo motivo $PA=0,25$ è conosciuto come *quarto corda* e rappresenta il centro aerodinamico dell'ala, cioè il punto in cui il coefficiente del momento agente sul profilo rimane generalmente costante al variare dell'incidenza (nel limite di incidenze non elevate).

Questa osservazione limita le possibili posizioni del PA e semplifica anche lo studio affrontato.

Pertanto sono stati scelti come punti di attacco: 0.075, 0.15 e 0.2.

Inoltre per ottenere differenti allungamenti alari è stato fissato lo span a 65 mm e si è variata la lunghezza della chord: le tre diverse lunghezze corrispondono a $C_1= 30$ mm, $C_2= 40$ mm e $C_3= 50$ mm.

Le ali utilizzate per le prove saranno:

<i>Ala</i>	<i>PA</i>	<i>Chord (mm)</i>
W1	0.075	30
W2	0.15	30
W3	0.2	30
W4	0.075	40
W5	0.15	40
W6	0.20	40
W7	0.075	50
W8	0.15	50
W9	0.2	50

La tensione degli elastici del sistema a riposo (ovvero la forza che per reazione esercitano gli elastici una volta allungati per vincolare l'ala al supporto) è stata fatta variare tra quattro valori:

- $k_1 = 100 \text{ mN}$
- $k_2 = 200 \text{ mN}$
- $k_3 = 300 \text{ mN}$
- $k_4 = 400 \text{ mN}$

La massa del sistema varierà al variare della corda dell'ala, tuttavia il peso totale del dispositivo si mantiene pressoché costante e quindi consideriamo questa variazione come trascurabile.

5.3 Misure della forza di drag

Per prima cosa si è deciso di mantenere costante la tensione degli elastici e studiare l'andamento della forza di drag al variare dell'ala e della velocità del vento.

Per ogni terna di ali con stessa chord si è fatto il paragone con la configurazione avente l'ala fissa, poiché quella è la configurazione che, in teoria, dovrebbe mostrare una forza di drag maggiore in assoluto quando ha superficie perpendicolare alla direzione del flusso.

Poiché il sistema impiegato per effettuare le misure presentava degli errori sistematici, si è dovuto rielaborare i dati ottenuti al fine di eliminarli.

<i>U (m/s)</i>	<i>w1 fissa (mN)</i>	<i>w1 (mN)</i>	<i>w2 (mN)</i>	<i>w3 (mN)</i>
2,38	12	0	4	2
3,06	17	5	5	4
3,74	23	7	9	19
4,42	26	31	30	31
5,1	48	43	53	43
5,78	49	47	51	61
6,46	64	43	44	47
7,14	77	36	46	48
7,82	94	32	42	49
8,5	107	25	39	48

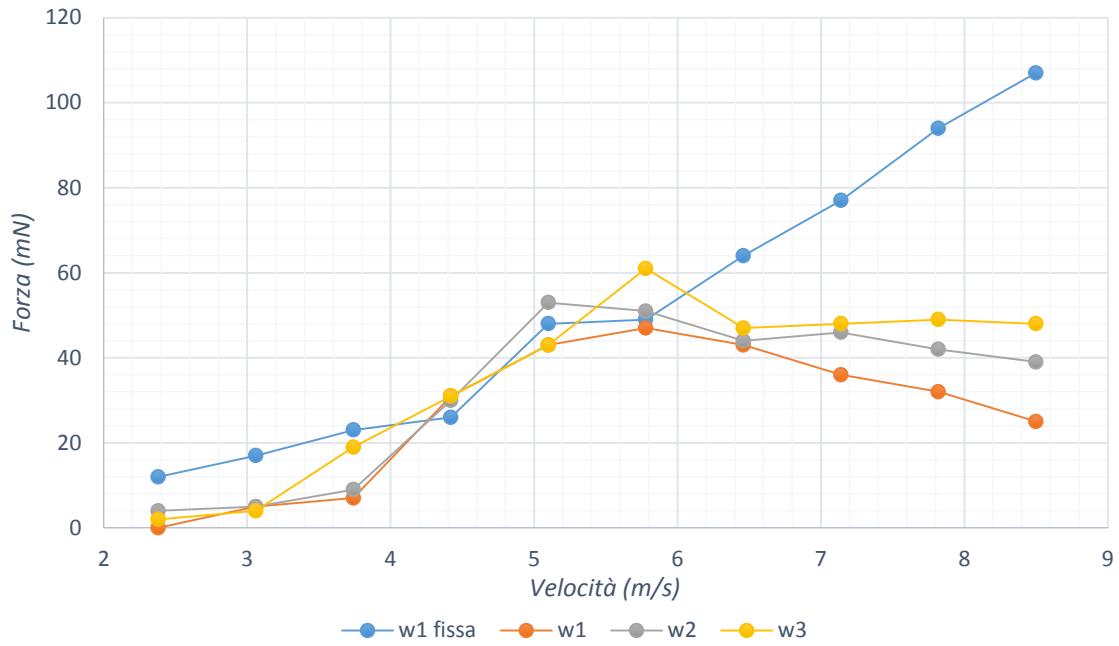


Grafico 5.1 – Forza di drag in funzione della velocità per le ali w1 fissa, w1, w2 e w3 mobili.

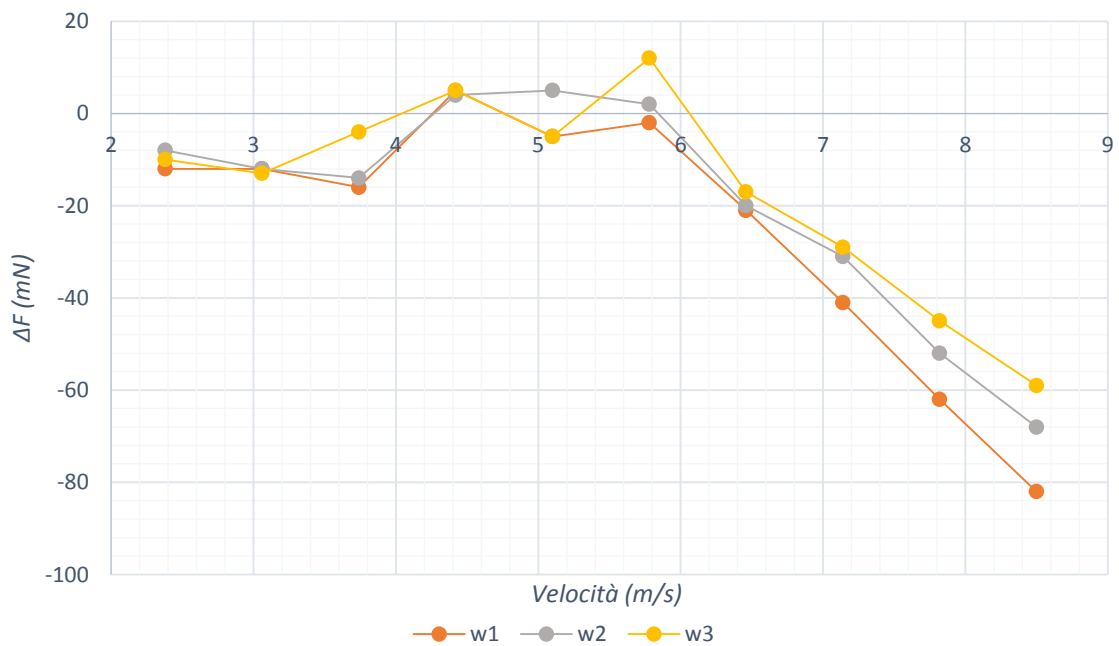


Grafico 5.2 – Differenza tra la forza di drag in funzione della velocità tra l'ala fissa w1 e le ali mobili w1, w2 e w3.

Essendo che la forza di drag è definita come $F_D = \frac{1}{2} C_D S \rho U^2$, mantenendo l'ala fissa in posizione di riposo si ha che la forza di drag dipenderà dal quadrato della velocità del vento (dalla letteratura si ha che per un rettangolo finito posto

perpendicolarmente alla direzione del vento $c_D=1,3$). È stata quindi utilizzata come riferimento delle prove l'ala fissa avente come sezione la stessa della terna di ali considerate. L'obiettivo di questa analisi è quella di scegliere i parametri per massimizzare la differenza tra il drag di un'ala rispetto a quello di un'ala fissa avente la stessa sezione.

Per le ali w1, w2 e w3 l'andamento del drag in funzione della velocità del vento è a massimo; esso supera solo per un piccolo numero di punti sperimentali la curva di riferimento. Superato tale massimo il drag tende a stabilizzarsi e a mantenersi costante. i punti per i quali il drag è quasi nullo sono quelli in cui il lift è uguale alla forza peso e quindi l'ala si dispone parallelamente al flusso. Il drag tende poi ad aumentare per via del moto di pitch and plunge indotto dal flutter sull'ala. Oltre velocità di 6 m/s il moto tende a stabilizzarsi e quindi a mantenere il drag costante.

Seppur in maniera lieve, si osserva che è quindi possibile ottenere con tale dispositivo un coefficiente di drag maggiore di quello che per la letteratura è considerato il massimo assoluto, ovvero quello della vela perpendicolare alla direzione del flusso.

Vento (m/s)	w 4 fissa	w4	w5	w6
2,38	9	3	1	3
3,06	19	2	1	4
3,74	24	2	2	8
4,42	33	15	14	0
5,1	48	43	47	30
5,78	58	53	65	52
6,46	70	63	104	70
7,14	80	84	117	103
7,82	100	90	125	131
8,5	123	97	108	111

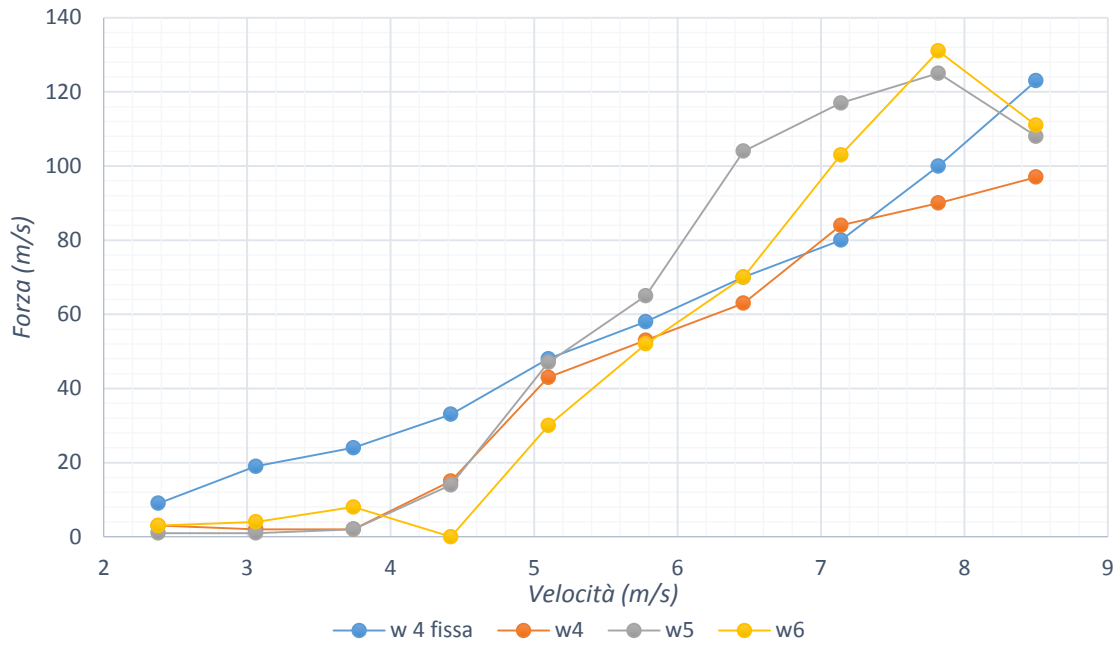


Grafico 5.3 – Forza di drag in funzione della velocità per le ali w4 fissa, w4, w5 e w6 mobili.

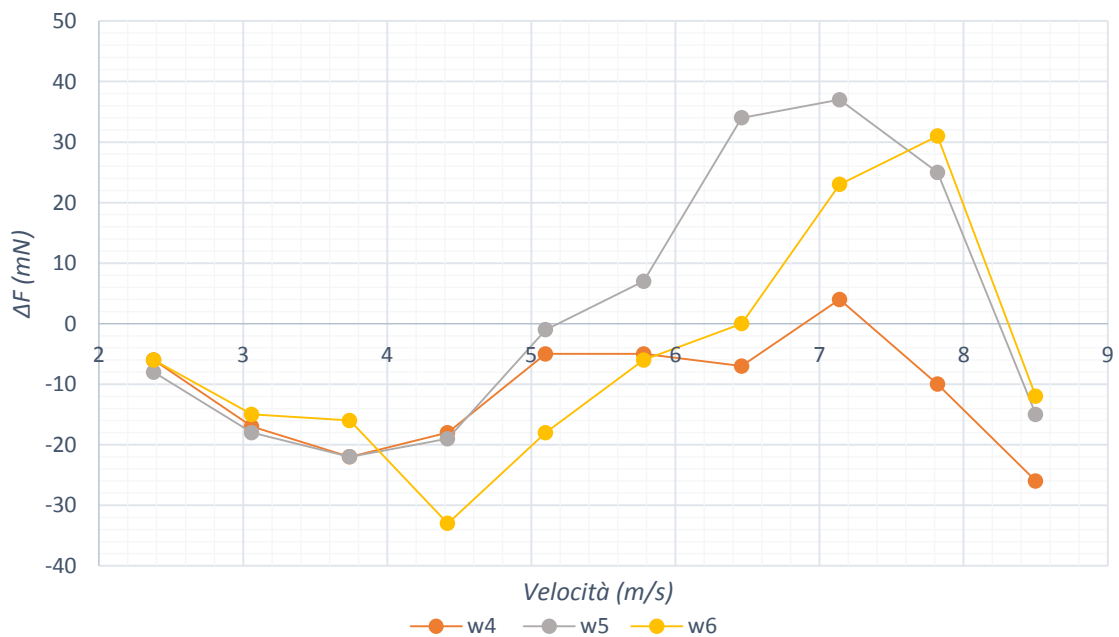


Grafico 5.4 – Differenza tra la forza di drag in funzione della velocità tra l'ala fissa w4 e le ali mobili w4, w5 e w6.

Anche per le ali w4, w5 e w6 l'andamento è a massimo per le motivazioni precedentemente esposte. Si nota però che per le ali w5 e w6, per velocità del vento alte (6,5 ÷ 8 m/s), il drag del dispositivo supera notevolmente il drag dell'ala fissa,

mentre per l'ala w4 tale effetto non viene osservato. Inoltre in questo caso anche l'intervallo di velocità nel quale le ali del dispositivo hanno un drag maggiore di quello dell'ala fissa è molto più esteso.

Vento (m/s)	w7 fissa	w7	w8	w9
2,38	9	0	1	4
3,06	19	3	2	6
3,74	26	2	16	5
4,42	36	2	22	11
5,1	50	65	63	36
5,78	54	73	81	60
6,46	71	78	101	69
7,14	90	91	85	91
7,82	106	109	104	125
8,5	125	85	113	121

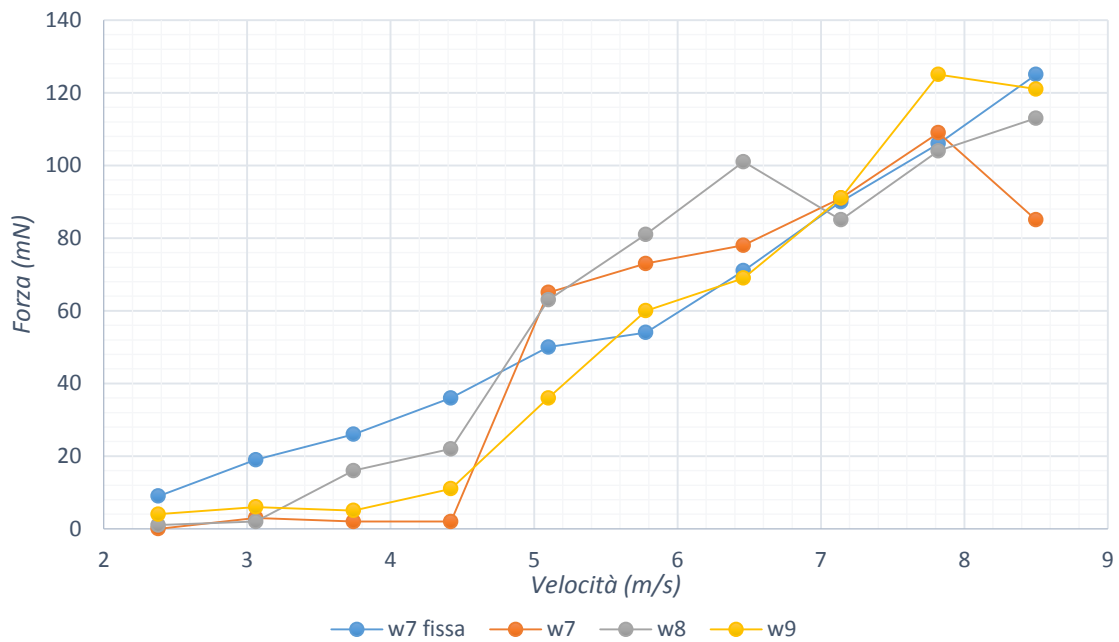


Grafico 5.5 – Forza di drag in funzione della velocità per le ali w7 fissa, w7, w8 e w9 mobili.

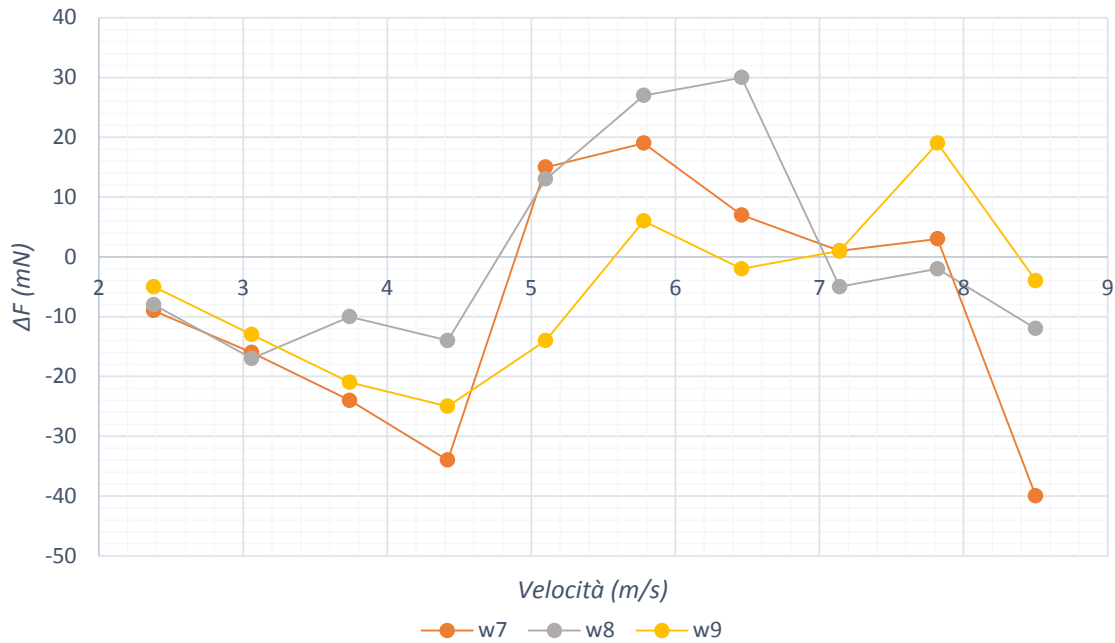


Grafico 5.6 – Differenza tra la forza di drag in funzione della velocità tra l’ala fissa w7 e le ali mobili w7, w8 e w9.

Le ali con corda massima, nelle quali il drag si discosta maggiormente dall’andamento di quello dell’ala fissa, sono la w7 e la w8 per valori di velocità dai 5m/s ai 7 m/s . Per quanto riguarda w9, il massimo discostamento si ha per in un solo punto quello con $v=7.82$ m/s. Diversamente dalle ali w1, w2 e w3, seppur il discostamento dalla linea dell’ala fissa ha un massimo, l’andamento del drag è sempre crescente (almeno per i valori di velocità analizzati).

Dai grafici precedenti si possono compiere alcune osservazioni.

La differenza tra la curva dell’ala mobile e dell’ala fissa ha un massimo che si verifica con una velocità del vento che aumenta all’aumentare del valore del punto d’attacco: prendendo ad esempio le ali w1, w2 e w3, si nota che l’ala w1 presenta il massimo discostamento per $U=4,42$ m/s, l’ala w2 per $U=5.1$ m/s e la w3 per $U=5.78$ m/s.

Analogamente avviene per le ali aventi corda 40 mm e 50 mm.

Inoltre facendo il confronto tra ali con stesso PA si nota anche che il massimo viene raggiunto a velocità maggiori all’aumentare della lunghezza della corda.

Un’ulteriore osservazione che si può fare è che per i valori massimi di velocità del vento, il drag massimo si ha per ali aventi punto d’attacco maggiore.

Concludendo l'analisi si ha che la massima differenza tra la curva dell'ala fissa e quella di un'ala specifica si ha per l'ala w5 con una velocità del vento di 7.14 m/s (37 mN).

Si può constatare che le ali w4, w5 e w6 siano in generale le più performanti, pertanto saranno studiate per analizzare l'andamento della forza di drag in funzione della tensione degli elastici.

Di seguito i risultati e i relativi grafici ottenuti da tali prove.

- W4 -

Vento (m/s)	ala fissa	k1	k2	k3	k4
0	8	10	4	4	6
2,38	21	10	4	6	8
2,72	31	11	8	8	7
3,06	32	9	5	6	10
3,4	38	13	2	5	0
3,74	44	21	5	4	11
4,08	47	32	12	6	12
4,42	55	32	21	5	12
4,76	57	47	29	8	13
5,1	64	62	47	7	16
5,44	71	77	62	63	15
5,78	82	82	79	79	69
6,12	84	95	88	96	81
6,46	86	88	80	97	86
6,8	110	93	94	111	99

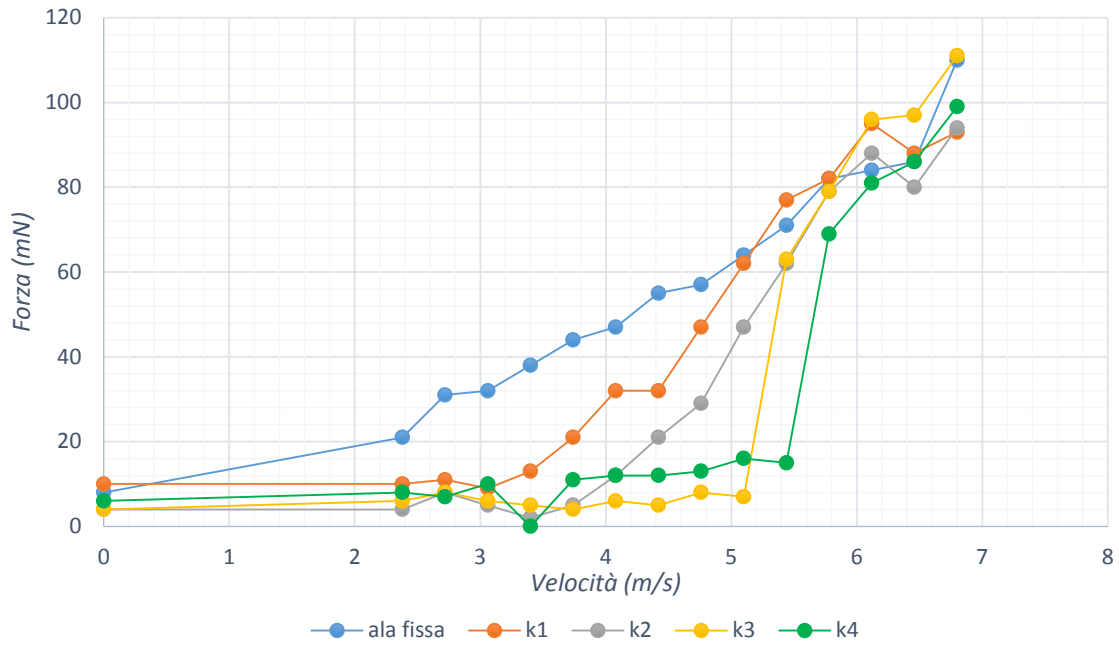


Grafico 5.7 – Forza di drag in funzione della velocità per diverse tensioni degli elastomeri per l'ala w4.

- W5 -

U (m/s)	w5 fissa	k1	k2	k3	k4
0	9	10	5	6	7
2,38	22	10	5	7	8
2,72	32	12	8	8	9
3,06	33	14	6	8	8
3,4	39	10	0	2	6
3,74	45	18	5	8	10
4,08	48	30	13	7	12
4,42	56	35	22	7	15
4,76	58	45	35	23	27
5,1	65	67	44	40	35
5,44	72	74	79	55	45
5,78	83	90	79	68	65
6,12	85	109	99	88	78
6,46	87	110	97	92	94
6,8	111	115	120	130	105

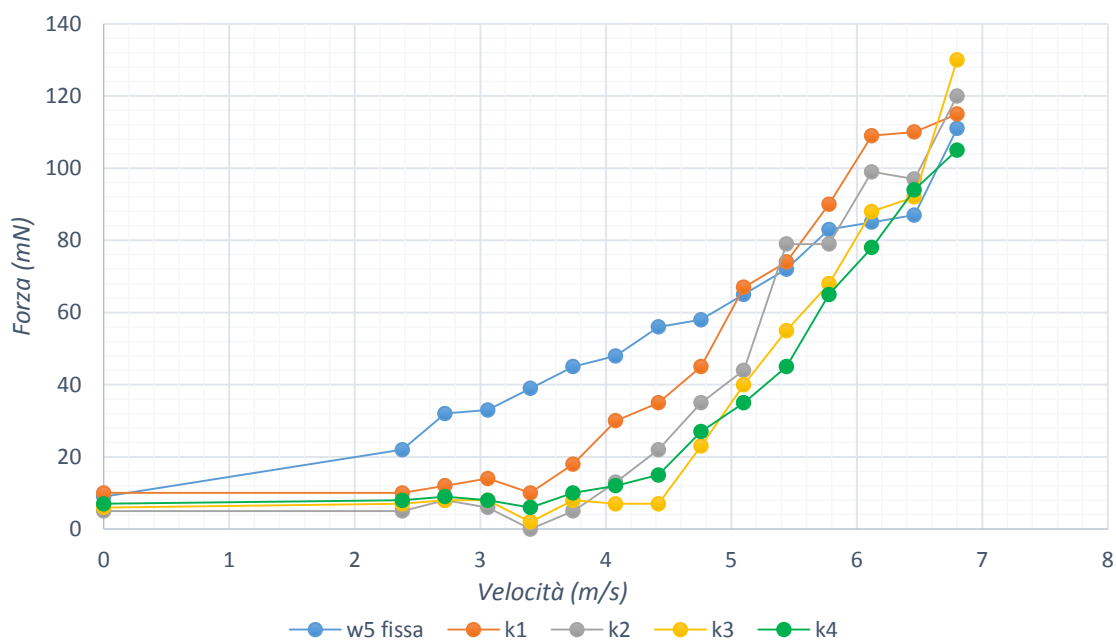


Grafico 5.8 – Forza di drag in funzione della velocità per diverse tensioni degli elastomeri per l'ala w5.

- W6 -

U (m/s)	ala fissa	k1	k2	k3	k4
0	8	10	5	4	5
2,38	21	9	5	7	7
2,72	31	11	8	7	8
3,06	32	16	5	7	6
3,4	38	14	3	0	3
3,74	44	19	4	4	12
4,08	47	23	17	8	13
4,42	55	35	26	8	11
4,76	57	48	32	20	18
5,1	64	65	52	35	29
5,44	71	83	60	52	40
5,78	82	81	74	58	54
6,12	84	97	91	83	68
6,46	86	104	95	86	68
6,8	110	129	111	100	89

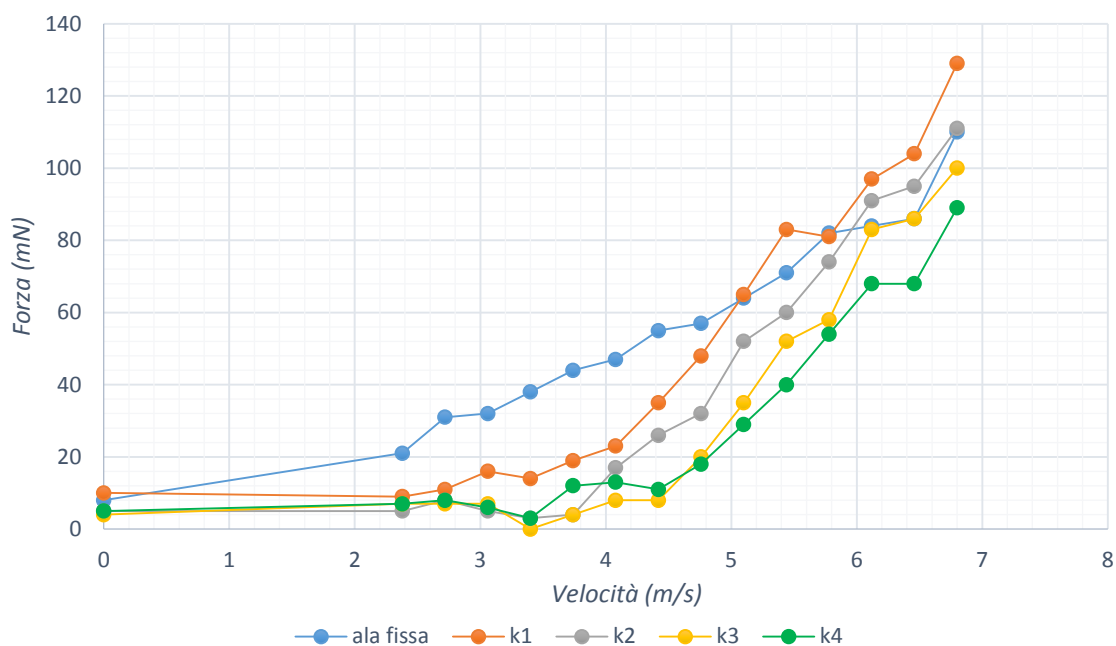


Grafico 5.9 – Forza di drag in funzione della velocità per diverse tensioni degli elastomeri per l'ala w6.

Dalle prove effettuate, si è dedotto che l'errore sistematico del sistema è di almeno 15mN; poiché le curve realizzate, aventi come parametro le tensioni degli elastici, differiscono l'una dall'altra di un valore inferiore all'errore, non è possibile determinare neanche qualitativamente l'influenza che la tensione degli elastici ha sulla forza di drag. Pertanto le curve possono essere assimilabili ad una sola dotata di un plateau iniziale e di un tratto lineare crescente che ha origine nel punto in cui si instaura il moto oscillatorio causato dal flutter.

Sarà possibile analizzare tale influenza utilizzando la cella di carico a tre assi, dotata di maggiore sensibilità.

Tuttavia, è stato possibile osservare che il moto oscillatorio causato dal flutter si instaurava per velocità del vento inferiori al diminuire della tensione degli elastici.

Pertanto si può concludere affermando che la massima differenza tra la forza di drag del dispositivo e quella dell'ala fissa si riscontra utilizzando l'ala w5 alla velocità del vento $v=7.14$ m/s e si rimanda ad analisi con strumentazione più accurata la scelta ottimale della tensione degli elastici.

5.4 Confronto con sistema a due gradi di libertà

È possibile effettuare un confronto tra il dispositivo adottato e un dispositivo mostrato in figura 5.2 che, seppur sfruttando lo stesso fenomeno fisico, concede due gradi di libertà al leading edge: ovvero gli permette sia il moto in direzione perpendicolare al flusso, di cui era già dotato il dispositivo in studio, sia il moto oscillatorio in direzione parallela.

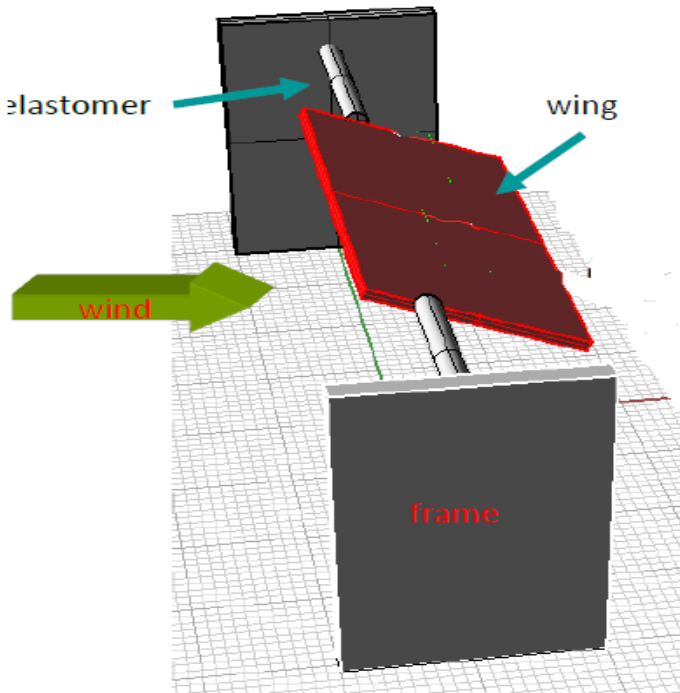


Figura 5.2 – Rendering del dispositivo a due gradi di libertà. In questo caso l'elastomero è posto in direzione perpendicolare alla direzione del vento.

Seguono tabella e grafico relative alla misura della forza di drag del dispositivo a due gradi di libertà al variare della velocità del vento, oltre alle tabelle relative alle ali precedentemente studiate in cui viene calcolato il valore $x = \frac{F_l - F_f}{F_f}$.

U (m/s)	F_f (N)	F_l (N)	x
0,00	-0,003	-0,004	0,3333
2,72	0,0094	-0,0046	-1,489
3,06	0,0107	-0,0084	-1,785
3,40	0,0205	0,002	-0,902
3,74	0,0262	0,0143	-0,454
4,08	0,0358	0,0373	0,0419
4,42	0,0462	0,045	-0,026
4,76	0,0601	0,0679	0,1298
5,10	0,0768	0,1037	0,3503
5,44	0,0784	0,1158	0,477
5,78	0,0925	0,1371	0,4822
6,12	0,1024	0,1791	0,749
6,46	0,1182	0,2017	0,7064
6,80	0,1318	0,2005	0,5212
7,14	0,14	0,2123	0,5164
7,48	0,1549	0,2104	0,3583
7,82	0,173	0,2115	0,2225
8,16	0,1767	0,2086	0,1805
8,50	0,196	0,2103	0,073
8,84	0,2177	0,2177	0
9,18	0,2462	0,2049	-0,168

Dove

- F_f è Forza di drag esercitata dall'ala fissa;
- F_l Forza di drag esercitata dall'ala libera di muoversi (dispositivo con leading edge dotato di 2 gradi di libertà).

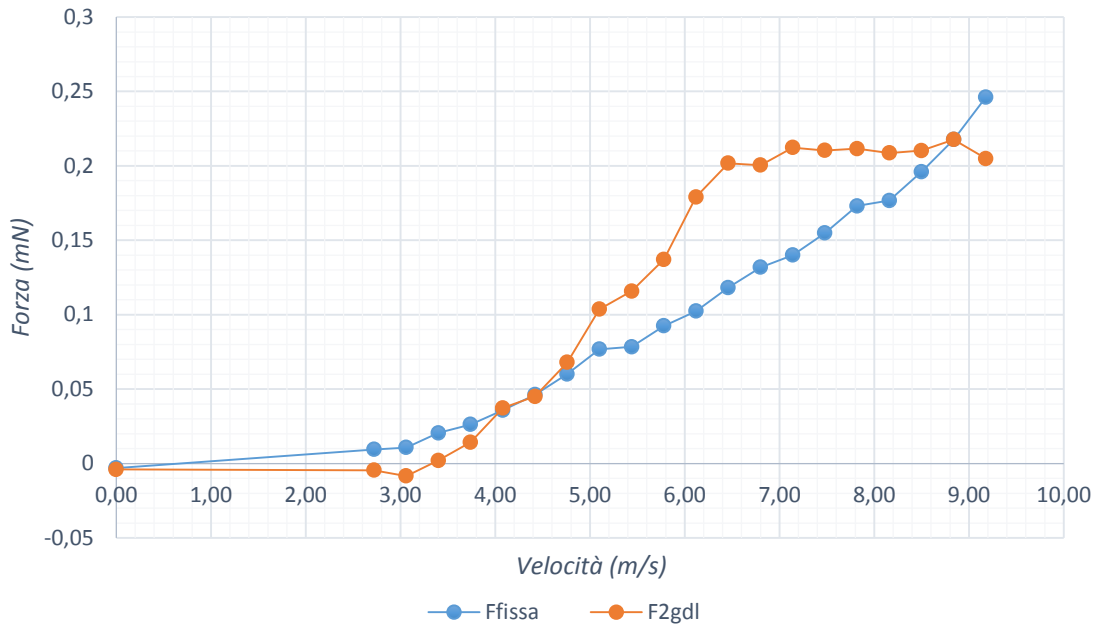


Grafico 5.10 – Confronto tra la forza di drag al variare della velocità per l’ala fissa e l’ala mobile per il dispositivo a due gradi di libertà.

U (m/s)	W1	w2	w3	w4	w5	w6	w7	w8	w9
2,38	-1	-0,66	-0,83	-0,66	-0,88	-0,66	-1	-0,88	-0,55
3,06	-0,70	-0,70	-0,76	-0,89	-0,94	-0,78	-0,84	-	-0,68
								0,894	
3,74	-0,69	-0,60	-0,17	-0,91	-0,91	-0,66	-0,92	-0,38	-0,80
4,42	0,19	0,15	0,19	-0,54	-0,57	-1	-0,94	-0,38	-0,69
5,1	-0,10	0,10	-0,10	-0,10	-0,02	-0,37	0,3	0,26	-0,28
5,78	-0,04	0,04	0,24	-0,08	0,12	-0,10	0,35	0,5	0,11
6,46	-0,32	-0,31	-0,26	-0,1	0,48	0	0,09	0,42	-0,02
7,14	-0,53	-0,40	-0,37	0,05	0,46	0,28	0,01	-0,05	0,01
7,82	-0,65	-0,55	-0,47	-0,1	0,25	0,31	0,02	-0,01	0,17
8,5	-0,76	-0,63	-0,55	-0,21	-0,12	-0,09	-0,32	-0,09	-0,03

Anche per questo dispositivo si è misurata e graficata la forza di drag al variare della velocità del vento. Si può osservare un andamento abbastanza simile a quello del dispositivo dotato di un solo grado di libertà: presenta un tratto iniziale in cui il drag è nullo seguito da un incremento quasi lineare causato dal flutter.

Le due principali differenze che si possono notare sono:

- 1) Il fatto che la forza di drag ha un massimo seguito da un rapido decremento. Ciò non è stato osservato nella configurazione precedente perché il decremento avviene per velocità del vento superiori a quelle analizzate.
- 2) La differenza tra la forza di drag del dispositivo e quella relativa all'ala fissa per un range sufficientemente ampio di velocità del vento è quasi equivalente a metà di quest'ultima (fino al 75%), mentre nel dispositivo precedente tale differenza raggiunge la metà del drag dell'ala fissa di riferimento per un solo punto sperimentale.

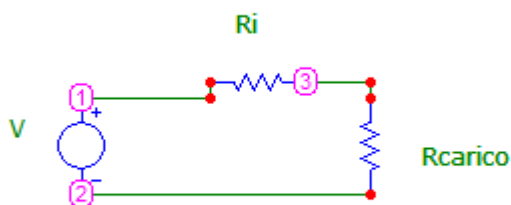
Si può concludere che il dispositivo che permette 2 gradi di libertà al leading edge è nettamente più efficiente per quanto riguarda la massimizzazione della forza di drag ma è difficilmente sfruttabile per l'estrazione di energia elettrica

5.4 Misure di potenza e frequenza

Per l'analisi del dispositivo, occorre studiarne non solo il funzionamento libero, ma anche in condizioni di funzionamento reali, ovvero considerando il carico elettromagnetico che il dispositivo dovrà sopportare per la produzione di energia elettrica per la quale è stato pensato.

Si è deciso quindi di studiare l'andamento della frequenza di oscillazione e della potenza prodotta dell'ala w5, perché nelle prove effettuate precedentemente è risultata la più performante, al variare della velocità del vento e del carico applicato (ipotizzato solo resistivo).

Il sistema può essere schematizzato nella maniera seguente.



Dove il dispositivo può essere rappresentato come un generatore di tensione reale avente resistenza interna $R_i \cong 100\Omega$ (misurata tramite un tester)

POTENZA

U (m/s)	100Ω	200Ω	300Ω	400Ω	600Ω	800Ω	$1k\Omega$	$1,2k\Omega$	$1,4k\Omega$
3,4	0	0	0	0,832	0,815	1,1	0,788	0,625	0,579
3,57	0	0,723	0,889	1,2	1,5	1,7	1,3	1,3	1,4
3,91	0,671	1,4	1,9	2,9	2,6	2,2	2,3	2,6	2
4,42	1,6	4,5	4,6	5,2	3,7	4,2	4,9	3,4	3,7
4,93	5,4	9,4	8,4	8,2	7,2	6,6	5,3	4,8	4,2
5,44	10,5	10,9	10,5	9,6	7,9	6,7	5,7	4,8	4,4
6,12	10	11,3	10,3	9,2	8	6,8	5,9	5	4,5

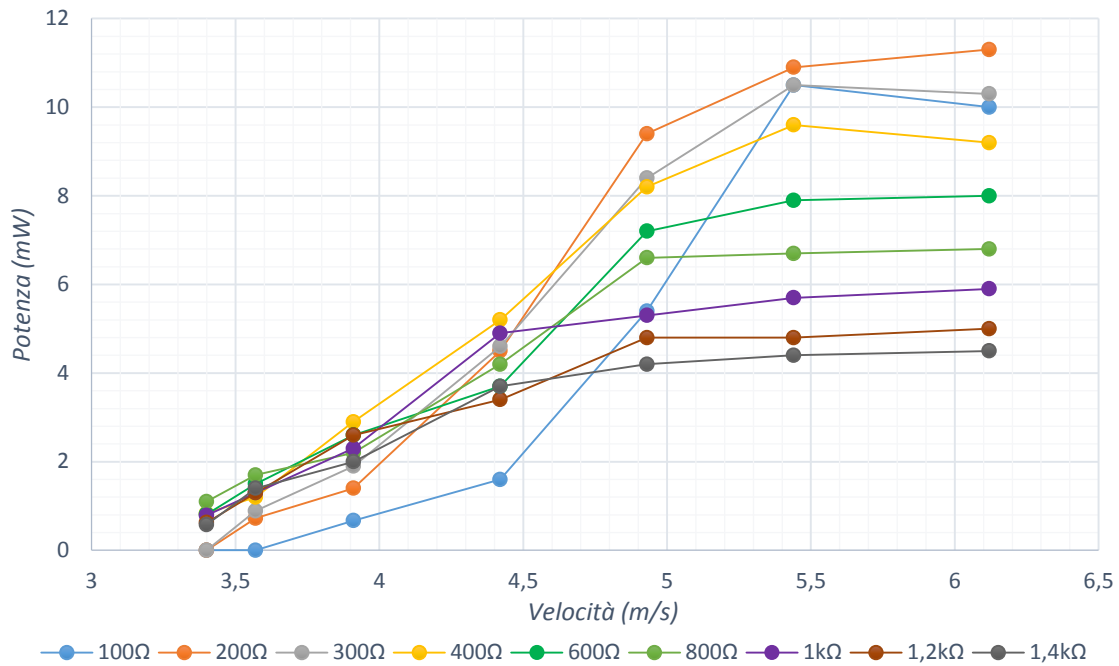


Grafico 5.11 – Potenza estratta dal dispositivo al variare della velocità per l'ala w5 al per diversi carichi applicati.

La potenza assorbita da un eventuale dispositivo si può studiare calcolando la potenza P assorbita dal carico (e quindi da R_{carico} da qui in poi chiamato solo R). La tensione V non è costante ma ha un andamento quasi sinusoidale; ne consideriamo pertanto il valore efficace. Analoghe considerazioni possono essere fatte per I (corrente che circola nel circuito).

Si possono calcolare, noti i valori di V (tensione ai poli del generatore ideale di tensione, ipotizzata costante in valore efficace, nonostante nella realtà dipenda dalla frequenza di oscillazione del magnete) e delle resistenze:

$$\text{La corrente } I \text{ che attraversa il circuito } I = \frac{V}{R+R_i}$$

$$\text{La tensione presente tra i nodi 2 e 3 } V_{23} = RI = \frac{R}{R+R_i} V$$

$$\text{Si ha quindi che } P(R) = V_{23}I = V_{23} \frac{V}{R_i+R} = RI \frac{V}{R_i+R} = \frac{R V^2}{(R_i+R)^2}$$

Si può facilmente dimostrare che la potenza massima assorbita dal carico P_{max} si ha per $R=R_i$. In tal caso si ha che $P_{\text{max}} = \frac{V^2}{4R}$.

In questo caso, dato che la velocità del vento è bassa e quindi è bassa l'energia a disposizione del sistema, il carico ne assorbirà una parte rilevante e pertanto l'ala tenderà a rallentare. Conseguentemente a ciò l'energia del sistema diminuirà e con

essa l'energia assorbibile dal carico. Viceversa, aumentando la velocità del vento, aumenterà l'energia disponibile al sistema e quindi, nonostante sia massima l'energia assorbita dal carico, essa sarà solo una piccola parte dell'energia disponibile al sistema. Pertanto l'ala non viene rallentata considerevolmente e quindi si ha un brusco incremento nella potenza assorbita dal sistema.

Un'altra osservazione che si può fare in linea teorica (osservazione che poi è stata verificata dalle prove sperimentali) è che se $R > R_i$ la corrente del circuito è molto bassa e quindi è bassa l'energia assorbita dal dispositivo.

Si è osservato sperimentalmente che la potenza assorbita aumenta aumentando la resistenza del carico oltre i valori di R_i ma che, superato un valore di massimo, essa tende a diminuire per la diminuzione della corrente fino, idealmente, a valori nulli.

I valori di R che massimizzano la produzione di corrente elettrica appartengono ad un range di valori compresi tra i 200Ω e i 400Ω come si può vedere dal grafico.

FREQUENZA

U (m/s)	100Ω	200Ω	300Ω	400Ω	600Ω	800Ω	$1k\Omega$	$1,2k\Omega$	$1,4k\Omega$
3,4	-	-	-	12,45	12,78	13,44	13,12	13,04	13,08
3,57	-	12,14	12,37	12,82	13,54	14,34	14,08	14,34	15,01
3,91	12,06	12,69	13,12	14,29	14,83	14,95	15,3	15,8	15,74
4,42	12,69	14,67	15,12	15,74	15,68	16,2	16,83	16,55	16,91
4,93	15,01	16,2	16,62	16,76	17,06	17,44	17,52	17,68	17,6
5,44	16,76	17,06	17,28	17,52	17,76	17,68	17,76	17,84	17,84
6,12	17,28	17,44	17,84	17,68	18,01	18,18	18,26	18,18	18,18

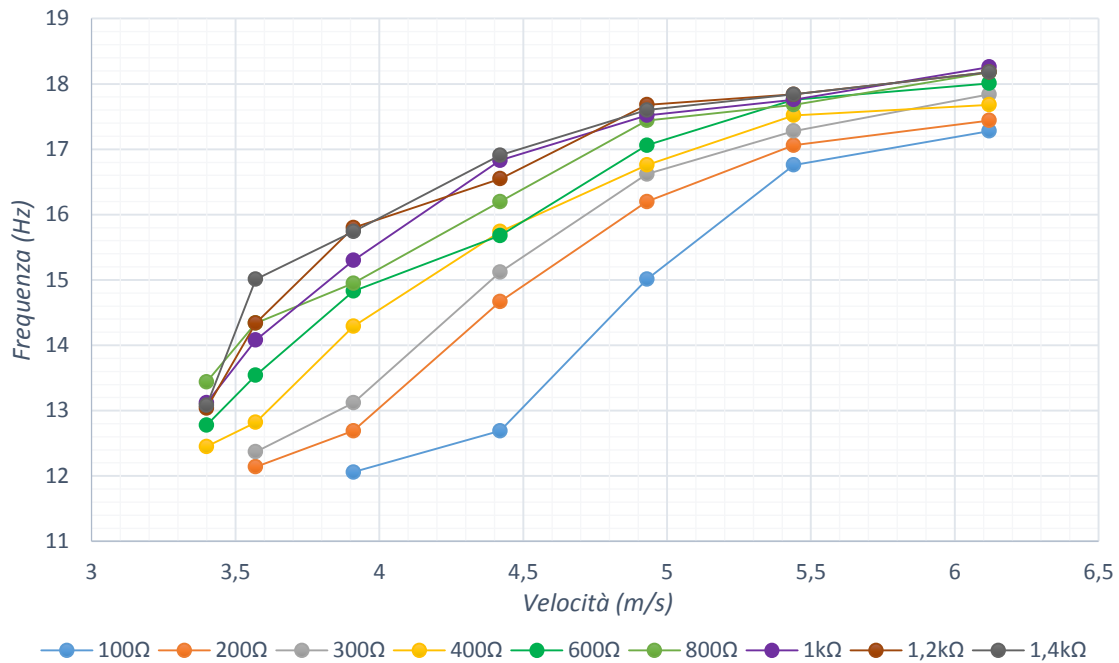


Grafico 5.12 – Frequenza di oscillazione dell'ala w5 al variare della velocità per diversi carichi applicati.

Un altro parametro fondamentale per l'analisi energetica del dispositivo è la frequenza di oscillazione dell'ala e quindi della bobina. Infatti la tensione V ai poli del generatore sarà proporzionale a tale frequenza. Inoltre la frequenza è indice dell'energia cinetica di cui è dotato il sistema.

Dalle prove sperimentali si osserva che, fissata una velocità del vento, la frequenza di oscillazione è proporzionale alla resistenza del carico. Tale fenomeno si può spiegare osservando che aumentando R diminuisce la frazione di energia assorbita dal carico diminuendo la corrente. Infatti R molto grande significa avere un bipolo circuito aperto tra i nodi 2 e 3 e quindi lavorare senza carico. Se diminuisce l'energia assorbita come energia elettrica, è maggiore quella cinetica rimasta al dispositivo, fatto che si traduce in un aumento della frequenza di oscillazione. Analogamente, fissato un carico aumentando la velocità del vento, la frequenza tende ad aumentare perché aumenta l'energia disponibile all'ala.

CAPITOLO 6

Conclusioni

Riassumendo le conclusioni a cui si è pervenuti in questo elaborato si ha innanzitutto che dalle prove di potenza si osserva che per un intervallo di carico tra i 200 e i 400 ohm la potenza estratta dal dispositivo è la massima possibile.

Nel caso dei due carichi limite (100Ω e 1,4Ω), invece, è la minima.

Nel caso studiato la potenza massima estratta corrisponde ad una resistenza di 200Ω e si aggira intorno agli 11,3 mW.

Tale valori incoraggiano a proseguire nello studio di un dispositivo per WINS di questo tipo, in quanto con simili dispositivi è possibile provvedere al loro fabbisogno energetico. Tuttavia, mettendo a confronto i dati ottenuti per il dispositivo in questione e il dispositivo che permette un ulteriore grado di libertà, si comprende che, con molta probabilità, la seconda configurazione è la più efficiente e quindi la più promettente dal punto di vista della ricerca riguardante l' "Energy Harvesting".

Si è cercato inoltre di fornire una possibile spiegazione del fatto che si è osservato una forza di drag maggiore per intensità del valore indicato come massimo in letteratura. Quella più probabile è quella che prende in considerazione l'area di aria spazzata dall'ala: infatti, da come si può vedere nelle foto che rappresentano il moto dell'ala alle diverse velocità del vento, si nota che superato un certo valore di velocità il trailing edge comincia a disegnare una traiettoria a forma di otto che diventa sempre più sottile ed allungata. Nei punti in cui la forza di drag dell'ala mobile è maggiore di quella fissa, è facile notare quindi che l'area che spazia il trailing edge è maggiore rispetto all'area effettiva dell'ala, che è quella che definisce la forza di trascinamento per l'ala fissa.

Bibliografia

- [1] S. Buttrich, "Wireless sensor networks" SPVC2010
- [2] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey" *Computer Networks, IEEE*, vol. 38, pp. 393-422, 2002
- [3] G. J. Pottie and W.J. Kaiser, "Wireless Integrated Network Sensors (WINS): Principles and Practice"
- [4] Zhangli Peng and Qiang Zhu, "Energy harvesting through flow-induced oscillations of a foil"
- [5] Anderson, J. D., "Fundamentals of Aerodynamics", 2nd edition, pp. 16-17. McGraw-Hill, Inc., New York, 1991.
- [6] C. Boragno, R. Festa, A. Mazzino, "Elastically bounded flapping wing for energy harvesting", *Appl. Phys. Lett.* 100, 253906 (2012), 2012
- [7] J.A. Paradiso, T. Starner *Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics*
- [8] D. H. Hodges and G. A. Pierce, "Introduction to Structural Dynamics and Aeroelasticity"
- [9] T. Theodorsen, "General theory of aerodynamic instability and the mechanism of flutter", NACA report No. 496, 1935.
- [10] G. Dimitriadis "Aerolasticity introductions equations of motion" universitè de Liège
- [11] R. H. Scanlan, J. J. Tomko "Airfoil and bridge deck flutter derivatives", *Journal of the engineering mechanics division*, December 1971.

[12] Bisplinghoff, Raymond L., Holt Ashley and Robert L. Halfman (1955) "Aeroelasticity". Addison-Wesley, Cambridge, MA.

[13] Fei Fei a, John D. Maib,1, Wen Jung Li, "A wind-flutter energy converter for powering wireless sensors"

[14] Lei Zuo and Xiudong Tang, "Large-scale vibration energy harvesting" *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, in review, 2011.

[15]http://www.aero.polimi.it/~l070528b/bacheca/downloads/Misure_di_forza.pdf

[16] Bisplinghoff, R.L., Ashley, H. and Halfman, H., *Aeroelasticity*. Dover Science, 1996,