Università degli Studi di Genova

scuola politecnica

dime

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

Analisi sperimentale e modellazione matematica di un sistema per l'*energy harvesting* da interazioni fluido-struttura

—

Tesi di Laurea

Relatori:
Chiar.mo Prof. A. BOTTARO
Chiar.mo Prof. C. BORAGNO

Correlatori:
Dr. S. OLIVIERI
Dr. G. BOCCALERO

Candidato:
STEFANO PICCINI

Anno Accademico 2015/2016

Analisi sperimentale e modellazione matematica di un sistema per *l'energy harvesting* da interazioni fluido-struttura

Sommario

La presente tesi si inquadra nell'ambito dell'*energy harvesting* da interazione fluido-struttura studiando un dispositivo innovativo finalizzato alla produzione di energia per reti di sensori di monitoraggio wireless. Il presente lavoro si propone di confrontare i risultati ottenuti dalla sperimentazione in galleria del vento con quelli ottenuti attraverso un modello fenomenologico quasi-stazionario. Questi è nello specifico definito da un sistema di equazioni differenziali ordinarie e si propone di avvicinarsi il più possibile alla realtà degli esperimenti. L'obbiettivo è quello di definire la cinematica del dispositivo tramite l'analisi: delle traiettorie, della frequenza e dell'ampiezza dell'oscillazione al variare della velocità del vento. Viene inoltre proposto lo studio delle forze in gioco ed infine, grazie alla comprensione del moto dell'ala, si pone uno sguardo alla potenziale estrazione energetica. Gli approcci sperimentale ed analitico risultano in ragionevole accordo, fornendo un utile contributo allo sviluppo del dispositivo.

Experimental analysis and mathematical modelling of an energy harvesting deviced based on fluid-structure interactions

Abstract

This thesis deals with energy harvesting from fluid-structure interactions, focusing on the development of an innovative device devoted to the powering of wireless sensor networks which can be employed for monitoring purposes. The present work aims to compare the results from wind tunnel experiments with those from a quasi-steady phenomenological model. This latter is defined by a system of ordinary differential equations and has been improved to get closer to the real device. We investigate the kinematics of the flapping wing through the analysis of trajectories, frequency and amplitude of the oscillation for different wind speeds. Furthermore, the aerodynamic forces are computed and a look is given to the potential energy extraction. The experimental and analytical approaches result in reasonable agreement, representing a useful contribution to the development of the device.

Ringraziamenti

Si ringraziano: i miei relatori, il Prof. A.Bottaro e il Prof. C.Boragno per la grande opportunità concessami nel poter svolgere la mia tesi in un così interessante ambito ingegneristico e per tutto il supporto fornitomi, sia teorico che pratico, durante il periodo di lavoro. I miei co-Relatori, il Dr. S.Olivieri, per la parte numerica, e il Dr. G.Boccalero, per la parte sperimentale, per avermi sopportato e supportato in questo lungo percorso con la loro disponibilità e con le loro competenze permettendomi di svolgere al meglio il mio lavoro. Un ringraziamento a tutto il corpo docenti del mio corso di studi in Ingegneria Meccanica, per aver stimolato e guidato le mie scelte, durante questa prima fase della mia carriera universitaria. Ringrazio i miei genitori, Daniele ed Eliana, che hanno permesso il mio studio in questi anni ed il cui supporto non è mai venuto meno. E tutti i miei famigliari che credono e hanno creduto in me: i miei nonni, i miei zii, i miei cugini. E tutti i miei migliori amici e i compagni e amici ingegneri con cui ho condiviso momenti tristi, felici e rinunce durante questi tre anni.

Indice

Sommario **i**

Abstract **i**

Ringraziamenti **ii**

1 Introduzione **1**
1.1 Interazione fluido struttura 3

2 Oggetto e Scopo **6**
2.1 FLEHAP 6
2.2 Scopo della tesi 9

3 La Fisica **10**
3.1 Cenni di aerodinamica 10
3.2 *Flutter* 12
3.3 Elastomeri 12
3.4 Potenze e rendimento 15

4 Modello Fenomenologico **16**
4.1 Equazioni del modello fenomenologico ideale) 16
4.2 Implementazione e *fitting* 18

5 Analisi in Galleria del Vento **20**
5.1 Galleria del vento 20
5.2 Telecamera 23
5.3 Altre strumentazioni 23
5.4 Setup sperimentale 24
5.5 Leggi della dinamica 27

6 Risultati **30**
6.1 La cinematica 30
6.1.1 Traiettorie *Pivot Point* e *Trailing Edge* 30
6.1.2 Ampiezza e Frequenza 34
6.1.3 Grafici di Lissajous 36
6.2 Risultati del modello 37
6.2.1 Coefficienti aerodinamici 37
6.2.2 Potenza e rendimento di Betz 39
6.3 Sommario 42

7 Conclusioni **43**
7.1 Prospettive future 43

A Metodo Risolutivo di Adams-Bashfort **47**

Elenco delle figure

1.1 *Wireless Sensor Network* (WSN) [3]. 2
1.2 Schema fisico di un sistema VIV tratto da [5] (a sinistra) e schema fisico di una bandiera in un flusso assiale tratto da [6] (a destra). 4
1.3 Rappresentazione schematica del sistema oscillante studiato da Bernitsas e Raghavan [7] (a sinistra) ed esempio di possibile accoppiamento per l'estrazione energetica (a destra). 5

2.1 Prototipo di FLEHAP in assenza del sistema di estrazione energetica (tratto da [8]). 6
2.2 Schematizzazione della struttura dell'ala e degli elastomeri. . . 7
2.3 Esempio di traiettorie del TE dell'ala al variare della velocita del vento (tratto da [9]). 8
2.4 *Rendering* del dispositivo con accoppiamento elettromagnetico (tratto da [10]). 9

3.1 Forze aerodinamiche di portanza e resistenza (a sinistra) e grafico relativo ai coefficienti di portanza e resistenza al variare dell'angolo d'attacco (a destra). 11
3.2 Oscillazione del ponte di Tacoma precedente alla sua rottura nel 1940 (a sinistra). Deformazione dell'ala di un aereo civile causata dal *flutter* (a destra). 13
3.3 Schematizzazione degli elastomeri. 13

4.1 Schematizzazione meccanica per la definizione delle equazioni dinamiche. 17

5.1 Tipologie di galleria del vento a circuito chiuso (sinistra) a circuito aperto (destra). 21
5.2 Rappresentazione schematica della galleria del vento e sue componenti. 22
5.3 Fastec IL3100-SM4. 23

5.4 Schematizzazione della struttura del foil e degli elastomeri. . . 24
5.5 Posizione zero *scatterer* (sinistra). Posizione reciproca struttura e ala con *low light* (destra). 26
5.6 Schematizzazione meccanica per la definizione delle equazioni dinamiche. 28

6.1 Traiettoria bidimensionale normalizzata alla corda C $[x/C;y/C]$ del PP (in rosso) e del TE (in blu) al variare della velocità del vento m/s ricavate dall'analisi numerica (fila in alto) e dalle prove sperimentali (fila in basso). 31
6.2 Spostamento verticale del PP, nella condizione a regime ricavato dalle prove sperimentali (rosso) e dai test numerici (blu). 33
6.3 Andamento dell'angolo θ [grad], misurato rispetto all'orizzontale, in funzione del tempo[s] nella condizione a regime ricavato dalle prove sperimentali (rosso) e dai test numerici (blu). . . . 33
6.4 Ampiezza dell'oscillazione del PP ricavata dalle prove sperimentali (rosso) e dai test numerici (blu) al variare della velocità del vento. 34
6.5 Frequenza di oscillazione del PP ricavata dalle prove sperimentali (rosso) e dai test numerici (blu) al variare della velocità del vento. 35
6.6 Fase tra PPY e θ ricavata dalle prove sperimentali (rosso) e dai test numerici (blu) al variare della velocirà del vento . . . 36
6.7 Diagrammi di Lissajous che mettono in relazione l'angolo di oscillazione dell'ala rispetto all'orizzontale e lo spostamento y del PP normalizzato alla corda C al variare della velocità del vento, ricavate dall'analisi numerica fila in alto e dalle prove sperimentali fila in basso 38
6.8 Coefficienti di Lift (blu) e Drag (rosso) al variare della velocità del vento, misurati all'interno di un ciclo di oscillazione dell'ala a regime t/T dove T è il periodo dell'oscillazione. 40
6.9 Potenza di *plunge* a regime in funzione del tempo per tre velocità caratteristiche, 3 m/s stato pre-transizione, 4 m/s dispositivo in transizione e 5 m/s stato post-transizione. 41
6.10 Potenza di *plunge* e potenza e rendimento di Betz al variare della velocità del vento U_∞. 41

Capitolo 1

Introduzione

La natura fornisce energia nelle forme più disparate tra le quali la solare e la termica. L'accesso a questa energia, diversamente da ciò che avviene con comuni combustibili fossili, è gratuita e libera, ma presenta problematiche notevoli negli impianti di estrazione. Per la loro progettazione e costruzione è necessario un grande dispendio di risorse ed inoltre, fino a poco tempo fa, tali impianti non erano in grado di ottenere potenze sufficientemente alte se paragonati con quelli basati su fonti di energia non rinnovabile.

L'*Energy Harvesting* (EH) o *Energy Scavenging* (letteralmente la raccolta o ricerca di energia) rappresenta una soluzione per poter sfruttare al meglio l'estrazione di quell'energia inutilizzata presente nell'ambiente che ci circonda. I dispositivi studiati per l'EH non hanno la pretesa, come gli impianti eolici o solari, di imporsi per la produzione e la grande distribuzione di energia elettrica. Sono volti a catturare e accumulare con elevata efficienza l'energia strettamente necessaria al funzionamento di strumentazioni dalle ridotte richieste energetiche, come sensori o circuiti di controllo, ad essi connesse. Le potenze in gioco variano da qualche nano-Watt a poche centinaia di milli-Watt.

Il sistema per l'estrazione energetica può essere direttamente collegato all'interno del dispositivo oppure può essere collegato esternamente e solitamente comprende un trasduttore, un dispositivo di stoccaggio temporaneo dell'energia, come un super-capacitore o una batteria, e un circuito condizionatore che adatta il voltaggio e la corrente generata al carico. A questo proposito esistono due grandi sottocategorie dell'EH:

- la prima, atta al recupero dell'energia che in altri modi verrebbe dissipata sotto forma di calore:
  - nelle applicazioni industriali (energia dei fumi di scarico);

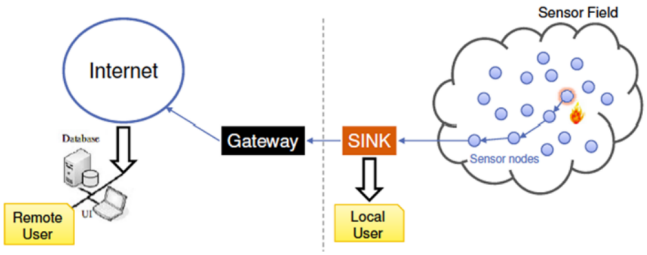

Figura 1.1: *Wireless Sensor Network* (WSN) [3].

  - attraverso, per esempio, dispositivi quali il *Kinetic Energy Recovery System* (KERS) per il funzionamento di sistemi di controllo e di circuiti di base; il KERS è stato recentemente introdotto dalla Head, nota casa produttrice di sci, all'interno dei suoi prodotti al fine di recuperare l'energia cinetica accumulata durante la fase di frenata in curva e restituirla in uscita per garantire una maggiore velocità [1];

- la seconda, che comprende i dispositivi che vengono realizzati al fine di estrarre energia da fonti rinnovabili per permettere il funzionamento di sensori, rilevatori o strumentazione di controllo che necessitano di una bassa potenza elettrica. Tra questi ricordiamo i *Wireless Sensor Networks* (WSN) [2] ovvero sistemi di sensori distribuiti sul territorio che cooperano tra loro al fine di acquisire informazioni sull'ambiente circostante. I WSN sono solitamente composti da una stazione base eventualmente connessa ad altre reti (*gateway*) e da un certo numero di sensori wireless (nodi) come illustrato in Fig. 1.1.

L'utilizzo di un dispositivo per l'auto-sostentamento di tali sensori ridurrebbe drasticamente i costi legati alla manutenzione.

A seconda della tipologia di energia che è necessario recuperare troviamo un adeguato sistema per l'EH corrispondente. Tra i più promettenti ricordiamo i sistemi in grado di catturare l'energia delle vibrazioni del moto di un fluido o del suono tramite l'uso di materiali piezoelettrici e quelli atti al recupero dell'energia termica dispersa attraverso l'uso di materiali piroelettrici o termoelettrici che generano una differenza di potenziale in risposta ad un cambiamento di temperatura.

I piezoelettrici sono materiali nei quali le celle elementari sono polarizzate e ad uno stato di deformazione corrisponde una variazione della distribuzione delle cariche, secondo la legge lineare:

$$q = K_{\mathrm{f}}\, F \tag{1.1}$$

(con K_f una costante dipendente dal materiale e dalla forma del piezoelettrico, misurata in pC/N).

Altri interessanti dispositivi sono in grado di sfruttare l'energia delle vibrazioni, forma di energia presente in molte applicazioni; essi sfruttano la legge di Faraday-Neumann tramite il moto reciproco di un magnete ed una bobina dovuto alle vibrazioni, oppure si possono utilizzare cristalli piezoelettrici che compressi ciclicamente, tra le piastre di un condensatore, sono in grado di generare energia. Per questo tipo di applicazioni si possono ottenere densità di potenza fino a 8 W/m^2.

La presente trattazione approfondirà sistemi di EH da interazione fluido-struttura, ovvero dispositivi in grado di produrre energia elettrica se immersi in un fluido in movimento.

1.1 Energy Harvesting da Interazione Fluido-Struttura

Parlare di interazioni fluido-struttura significa studiare l'accoppiamento tra le leggi relative ad un fluido in moto e le leggi della meccanica strutturale dell'elemento investito dal fluido. Lo studio di tali interazioni è fondamentale nell'ambito edile dove è sempre necessario dimensionare la struttura da costruire in base alle condizioni ambientali in cui si trova, come il vento in quota per la costruzione dei grattacieli o le correnti marine per strutture sommerse; sono altresì importanti nel campo aeronautico dove sia le palette del gruppo turbogetto sia le ali e la fusoliera del velivolo sono costantemente investite dall'aria. È proprio l'instabilità elastica che un fluido in moto può generare su di un solido che ha portato alla formulazione dell'ipotesi che la si possa sfruttare, accentuandola, per produrre energia elettrica.

Per catturare l'energia delle correnti marine, del vento o di qualsiasi altro fluido in moto alcuni studiosi si sono ispirati alle pinne caudali dei pesci e dei mammiferi acquatici; queste particolari pinne possono assorbire l'energia dal distacco dei vortici generati dalla pinne dorsali e ventrali per generare propulsione. Riferendosi a tale fenomeno naturale è possibile sfruttare l'energia posseduta dal distacco dei vortici, generati dal moto di un fluido su di una superficie o un cilindro, per generare oscillazioni o vibrazioni da cui estrarre energia. A seconda del tipo di moto consentito esistono tre differenti categorie di sistemi basati su *ala battente* come descritto da Young, Lai e Platzer [4]:

- passivi, in cui tutti i movimenti sono generati direttamente dal moto del fluido sulla lastra;

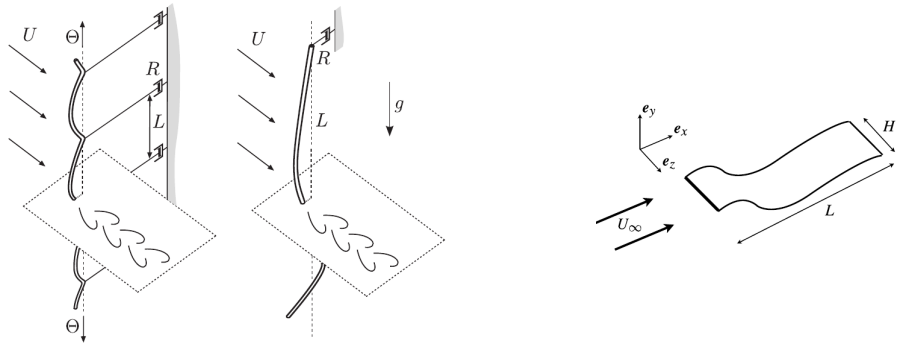

Figura 1.2: Schema fisico di un sistema VIV tratto da [5] (a sinistra) e schema fisico di una bandiera in un flusso assiale tratto da [6] (a destra).

- semi-passivi, in cui viene indotto o vincolato o il *pitching* (beccheggio) o il *plunging* (moto verticale) o almeno uno dei possibili movimenti del corpo:

- attivi, in cui vengo prescritti sia la fase sia l'ampiezza del *pitch* e del *plunge*.

Un'altra tipologia di *harvester* da interazione fluido struttura è costituita dai sistemi *Vortex Induced Vibration* (VIV) e *Vortex Induced Vibration Acquatic Clean Energy* (VIVACE). Tali dispositivi sono in grado di estrarre energia da un flusso geofisico, come le correnti marine o il vento, grazie ad un forte accoppiamento tra la dinamica del solido e le oscillazioni di scia che emette. I sistemi VIV [5], sono utilizzati e studiati nell'ingegneria *offshore* e sono costituiti da lunghi cavi immersi in un fluido e perpendicolari alla direzione della velocità; questi sono in grado di sfruttare l'energia a bassa densità (dell'ordine dei 500 W/m^2) per velocità del fluido che li attraversa non necessariamente elevate (tipicamente 10 m/s). Il cavo oscilla grazie alle onde indotte dai vortici ed è possibile, tramite un fenomeno di *lock-in*, sincronizzare tali oscillazioni con il *vortex shedding* per permettere una migliore estrazione che può avvenire lungo tutto il cavo o solo in porzioni di esso, per esempio con un accoppiamento elettromagnetico (fig. 1.2).

I sistemi VIVACE [7] sono stati studiati per sfruttare le correnti nei mari e nei fiumi e convertire la loro energia in energia elettrica; sono costituiti da un cilindro rigido montato su di un supporto elastico o flessibile, immerso trasversalmente rispetto al flusso di fluido, che oscilla per il principio dei sistemi VIV. L'accoppiamento può essere sia di tipo meccanico sia di tipo idraulico e permette di trasformare il moto oscillatorio del cilindro in un moto rotatorio per il funzionamento del generatore (fig. 1.3).

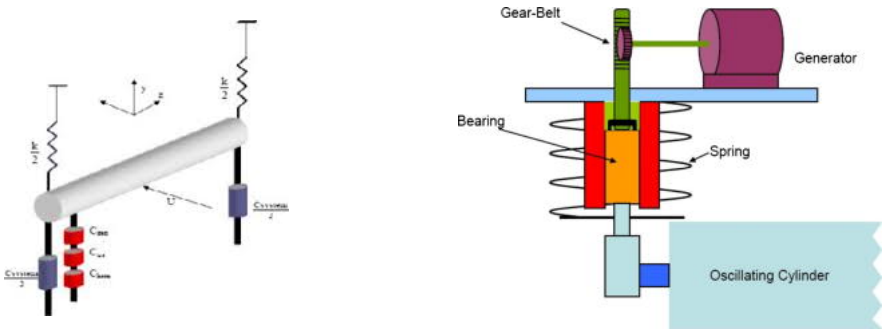

Figura 1.3: Rappresentazione schematica del sistema oscillante studiato da Bernitsas e Raghavan [7] (a sinistra) ed esempio di possibile accoppiamento per l'estrazione energetica (a destra).

Avvicinandoci a dispositivi molto più simili a quello studiato nella presente tesi troviamo differenti configurazioni di *foil* o dispositivi elastici (bandiere) che sono in grado di sfruttare l'instabilità elastica generata dall'energia del vortex shedding in corrispondenza del *leading edge* (LE). Michelin e Doarè [6] hanno studiato una bandiera flessibile inserita in un flusso assiale; questo dispositivo rispecchia il moto di qualsiasi bandiera e, come si può facilmente evincere, è di tipo semi-passivo in quanto viene bloccato il moto di *plunging*.

Al di sopra di una determinata velocità del flusso indisturbato la bandiera diviene instabile, poichè le forze di pressione superano le forze di resistenza del materiale, e assume un moto di *flapping* (fig. 1.2). Se ad essa viene accoppiato del materiale piezoelettrico, o essa stessa è composta di tale materiale, è possibile riuscire a sfruttare le deformazioni di compressione ed estensione della bandiera durante il *flapping*.

Il dispositivo studiato nella presente tesi, appartenente alla categoria di *harvester* composti da un'ala immersa in un flusso assiale, sfrutta il *vortex shedding* tra il LE e il *trailing edge* (TE) per generare sia il moto verticale sia il beccheggio che è semplicemente limitato tra due estremi ma non vincolato. Nei sistemi passivi la frequenza e l'ampiezza delle oscillazioni non viene determinata a priori, ma dipende dalla configurazione del dispositivo utilizzato.

Capitolo 2

Oggetto e Scopo

2.1 FLEHAP

FLEHAP (fig. 2.1), *Fluttering Energy Harvesting for Autonomous Powering*, è il dispositivo di *harvesting* attualmente in studio presso il dipartimento di Fisica (DIFI) ed il Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale (DICCA) dell'Università degli Studi di Genova. Il dispositivo mostrato in figura 2.1 è costituito da un'ala di polivinilacetato (PVAC) di densità 1.17 g/cm^3 spessa circa 0.1 mm. Esistono differenti dimensioni possibili dell'ala tra cui le più studiate presentano la corda (la lunghezza dell'ala) compresa tra i 20 e i 40 mm e lo *span* (la larghezza dell'ala) tra i 60 e i 90 mm. L'ala in esame è caratterizzata da corda di 20 mm e *span* di 70 mm.

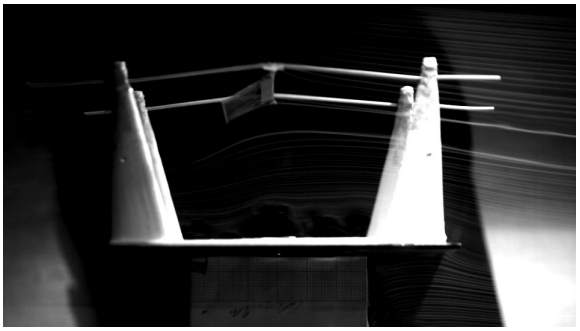

Figura 2.1: Prototipo di FLEHAP in assenza del sistema di estrazione energetica (tratto da [8]).

Un'asta metallica di diametro 1 mm (asse di color beige in figura 2.2) è incollata all'ala ed è libera di ruotare all'interno di due anellini sottili in filo di rame (arancioni in figura) che forniscono anche il punto di ancoraggio degli elastomeri; l'ala, solidale all'asta, è libera di ruotare rispetto agli anellini e

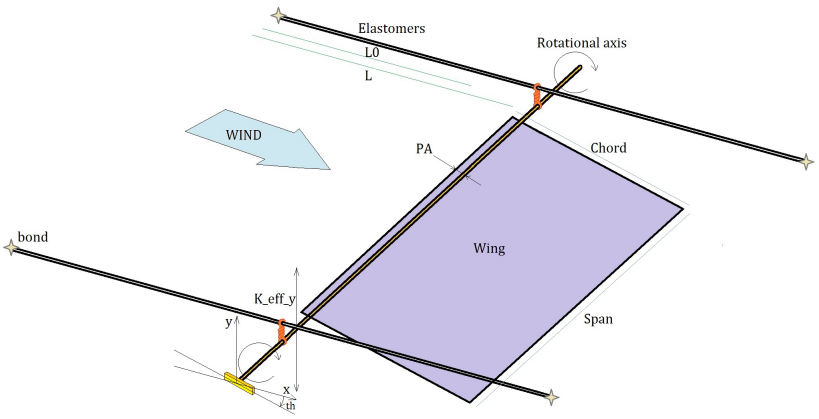

Figura 2.2: Schematizzazione della struttura dell'ala e degli elastomeri.

dovrà essere minimizzato, di conseguenza, l'attrito volvente. Gli elastomeri di poliuretano (PU) hanno sezione circolare e sono connessi ad un supporto di acrilonitrile-butadiene-stirene (ABS) ottenuto mediante stampa 3D grazie alla presenza di fori passanti sulle colonne della struttura di diametro leggermente inferiore; la struttura è a sua volta incollata su di una piastra d'acciaio.

Tra la nomenclatura utilizzata nella descrizione dell'ala ricordiamo:

- *leading edge* (LE), lo spigolo dell'ala che per primo viene a contatto con il fluido;
- *trailing edge* (TE), lo spigolo opposto;
- *pivot point* (PP), il centro dell'anima dell'asta di supporto attorno al quale l'asta ruota e punto a cui vengono collegati gli elastomeri; per questo motivo viene definito anche come punto d'attacco (PA).

Nel corso degli studi sul dispositivo sono state testate differenti configurazioni posizionando l'asta di metallo a diverse distanze dal LE al fine di far variare il PP ed il centro di massa (CM); nel caso in esame nella presente tesi l'asta di metallo è posta al limitare dell'ala per cui il PP risulta a 0.5 mm, raggio dell'asta, dal LE.

La configurazione utilizzata sfrutta quattro elastomeri, due per lato e perpendicolari all'ala, in modo tale da vincolare il più possibile l'oscillazione laterale e limitare il movimento orizzontale, che diventa trascurabile rispetto a quello verticale. Il TE assume quindi una traiettoria a *lemniscata* (fig. 2.3) la cui ampiezza aumenta all'aumentare della velocità del vento. Aumentando

ulteriormente la velocità del vento prima il dispositivo subisce la transizione tra due stati differenti del dispositivo (temi che verranno approfonditi nel capitolo 6); in seguito, per velocità del vento ancora superiori, l'ampiezza dell'oscillazione comincia a diminuire e l'ala si allinea con il flusso d'aria.

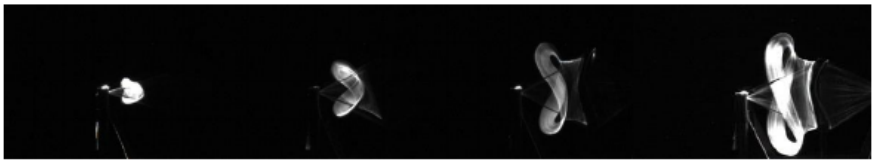

Figura 2.3: Esempio di traiettorie del TE dell'ala al variare della velocita del vento (tratto da [9]).

Il FLEHAP si propone di introdursi nell'ambito dell'*energy harvesting* come dispositivo a basso costo di realizzazione e gestione. Inoltre è in grado di produrre una quantità di energia competitiva rispetto alle sue ridotte dimensioni.

L'accoppiamento elettromagnetico (fig. 2.4) è effettuato grazie alla presenza di bobine, aventi 500 spire ed un diametro di 4 mm, poste sull'estremità laterali dell'asta centrate nel punto attorno alla quale ruota l'ala (PP) e sfruttano la variazione di flusso di campo magnetico, causata dal moto armonico verticale. Le due colonne da 5 magneti ciascuna di dimensioni $10 \times 10 \times 4\,\mathrm{mm}^3$ sono poste sulla struttura in opposizione alle bobine e sono composte da $Nd_2Fe_{14}B$. Sfruttando la legge di Faraday-Neumann-Lenz è possibile estrarre fino a $0.27\,\mathrm{mW/cm}^2$ definita come il rapporto tra la potenza elettrica e l'area captata (alla velocità $U_\infty = 4.5\,\mathrm{m/s}$). Con area captata si intende il prodotto $d \times c$ dove d è la maggiore ampiezza tra l'oscillazione del PP e del TE.

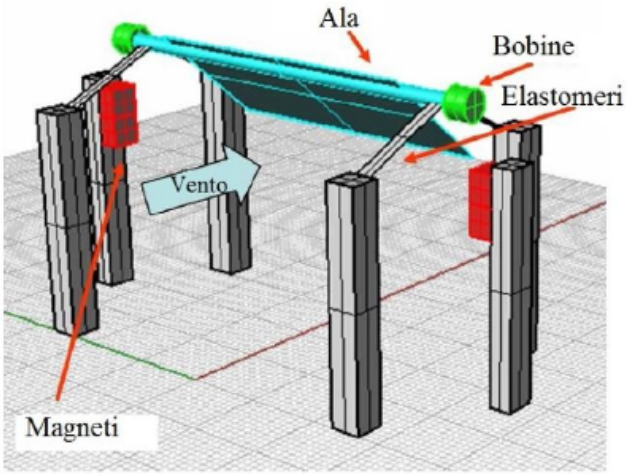

Figura 2.4: *Rendering* del dispositivo con accoppiamento elettromagnetico (tratto da [10]).

2.2 Scopo della tesi

La presente tesi si propone di studiare la cinematica e la dinamica di un'ala di polivinilacetato immersa in un flusso d'aria uniforme attraverso la sperimentazione in galleria del vento; i risultati sono poi confermati attraverso la programmazione di un modello fenomenologico a parametri concentrati per la risoluzione delle equazioni differenziali ordinarie della dinamica [11]. L'ala modellata è equivalente al prototipo sperimentale e viene considerata come un corpo rigido di dimensioni prefissate; la sua modellazione viene effettuata considerando una piastra 2D, data la simmetria rispetto allo span della dinamica del sistema. Nello specifico, nel modello sono stati introdotti gli effetti della gravità e dell'utilizzo degli elastomeri per il collegamento dell'ala con la struttura, inoltre si considera una configurazione del dispositivo, priva di estrazione energetica, particolarmente favorevole allo studio dei fenomeni di interazione fluido-struttura. Dall'analisi ci si propone di ottenere una descrizione completa delle traiettorie al variare della velocità del vento nonché un'analisi comparativa tempo-variante dei moti di *pitch* (beccheggio) e *plunge* (moto verticale). La dinamica del dispositivo, ancora oggetto di studio, viene descritta fornendo i coefficienti di portanza e resistenza ricavati dal modello numerico; in conclusione verranno esaminate la potenza di *plunge* e la potenza ed il rendimento di Betz al fine di delineare un quadro preciso delle capacità del dispositivo di estrarre energia.

Capitolo 3

La Fisica

3.1 Cenni di aerodinamica

Un fluido in quiete esercita, su un corpo immerso in esso, solo forze di pressione dirette punto per punto secondo la normale alla superficie; se il corpo ed il fluido sono in moto relativo, invece, a causa della condizione di aderenza delle particelle fluide alla superficie per attrito, si generano anche componenti tangenziali alla superficie. Integrando lo sforzo di pressione ($p\mathrm{d}A$) e lo sforzo tangenziale ($\tau\mathrm{d}A$), per unità di superficie, sull'intera area del profilo si ottiene una forza risultante che può essere scomposta in due componenti, come mostrato in figura 3.1 (a sinistra):

- *lift* o portanza (F_L), è la componente perpendicolare alla direzione del moto della risultante degli sforzi normali e tangenziali e tende a far muovere il corpo in tale direzione:

$$F_\mathrm{L} = \frac{1}{2} C_\mathrm{L} \rho A U^2; \tag{3.1}$$

- *drag* o resistenza (F_D), è la componente nella direzione del moto della risultante degli sforzi normali (resistenza di forma) e tangenziali (resistenza d'attrito) che il fluido esercita sul corpo:

$$F_\mathrm{D} = \frac{1}{2} C_\mathrm{D} \rho A U^2; \tag{3.2}$$

dove C_D è il coefficiente di resistenza aerodinamica, C_L è il coefficiente di portanza e il termine comune ad entrambe le forze $\frac{1}{2}\rho U^2$, con ρ e U rispettivamente la densità e la velocità del fluido, rappresenta la pressione dinamica esercitata dal fluido sull'area A. Tali forze inoltre generano momenti che

tendono a far ruotare il corpo; il momento attorno alla direzione del moto (*momento di rollio*), il momento attorno alla direzione della portanza (*momento di imbardata*), e il momento attorno alla direzione laterale (*momento di beccheggio*). Soffermandoci sul coefficiente di resistenza esso dipende anche dalla velocità del fluido e quindi dal regime di moto che si rispecchia nel numero di Reynolds (Re); infatti per corpi tozzi il contributo della resistenza d'attrito diventa sempre meno marcato fino ad annullarsi per Re molto alti. Gli aerei di linea raggiunta la quota di crociera diminuiscono la superficie dell'ala mantenendo la portanza strettamente necessario a vincere il peso del velivolo e minimizzando il coefficiente d'attrito. La resistenza di forma diviene preponderante quando, per velocità elevate, il fluido non è in grado di seguire la curvatura del corpo. Nel caso in esame nella presente tesi il FLEHAP è dotato di un'ala semplice costituita da un lastra piana di forma rettangolare; considerando un angolo d'attacco piccolo, il fluido incomprimibile e l'ala rigida si può definire il rapporto tra i coefficienti di portanza e resistenza, verificato anche sperimentalmente:

$$\frac{C_{\mathrm{D}}}{C_{\mathrm{L}}} = \tan\alpha. \tag{3.3}$$

Come si evince dalla figura 3.1 (a destra) entrambi i coefficienti aumentano all'aumentare dell'angolo d'attacco α con andamento monotono crescente; per $15° < \alpha < 20°$ si raggiunge la massima portanza e aumentando ancora tale valore si incorre nello stallo, fenomeno per cui avviene la separazione della vena fluida dal profilo dell'ala con conseguente perdita di portanza, mentre C_D continua ad aumentare. Il recupero da una situazione di stallo è spesso impossibile a meno di non essere in grado, come negli aerei militari, di aumentare la velocità a tal punto da permettere un rapido aumento della portanza per riportare l'aereo in condizioni di volo stabile.

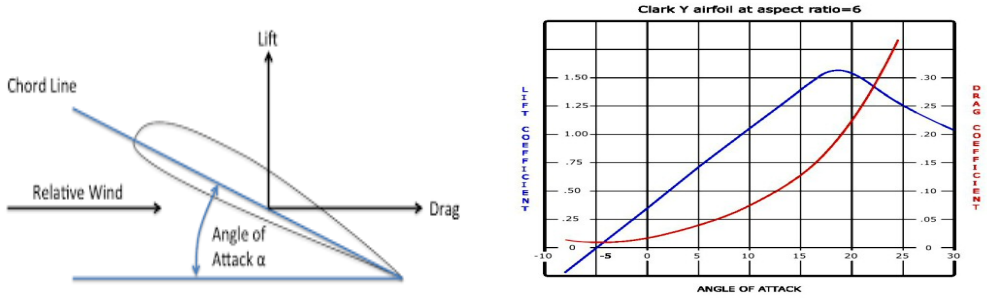

Figura 3.1: Forze aerodinamiche di portanza e resistenza (a sinistra) e grafico relativo ai coefficienti di portanza e resistenza al variare dell'angolo d'attacco (a destra).

3.2 *Flutter*

Studiare l'aeroelasticità significa studiare le interazioni fluido-struttura dovute alle forze aerodinamiche, inerziali ed elastiche su di un corpo investito da una corrente fluida. Il *flutter* è uno tra i fenomeni aeroelastici studiati e consiste in un particolare tipo di instabilità dinamica; esso si verifica quando una struttura o un dispositivo non è in grado di opporsi alla deflessione elastica indotta dal moto relativo con il fluido. Tale deflessione modifica l'angolo d'attacco della struttura e di conseguenza vengono modificate le forze elastiche che a loro volta modificano la deflessione inizialmente prodotta. Questo ciclo di eventi può avere un risvolto drasticamente negativo se le forze fluidodinamiche esercitate sulla struttura e la deflessione prodotta entrano in fase e provocano una vibrazione auto-eccitata che genera tensioni molto elevate nella struttura portandola al collasso. Uno degli esempi più eclatanti di *flutter* distruttivo è stato il crollo del ponte di Tacoma dovuto proprio alle oscillazioni autoeccitate e crescenti generate dal vento. In figura 3.2 viene comparato il *flutter* distruttivo del 1940 con il *flutter* controllato a cui sono soggette le ali degli aerei. Nel caso studiato nella presente tesi non si guarda al *flutter* come ad un fenomeno distruttivo ma lo si interpreta come un fenomeno da cui è possibile estrarre energia. Si è visto come l'instabilità si manifesti nel dispositivo solo per un preciso interallo di velocità del vento.

Per U_∞ basse l'ala o rimane ferma o tende ad allinearsi con il flusso; per velocità molto elevate l'ala tende nuovamente ad allinearsi con il vento. Nell'interallo di velocità comprese tra la velocità di innesco del *flutter* e la velocità per cui l'ala si allinea nuovamente con il vento è possibile estrarre energia in quanto l'ala autoeccitata compie oscillazioni di ampiezza finita e frequenza costante.

3.3 Elastomeri

Come descritto nel capitolo 2.1 l'ala è vincolata ad effettuare un moto di traslazione verticale (*plunging*) grazie alla presenza di 4 elastomeri connessi ai 4 supporti della base e a due a due agli estremi dell'asta di metallo su cui ruota l'ala.

Figura 3.2: Oscillazione del ponte di Tacoma precedente alla sua rottura nel 1940 (a sinistra). Deformazione dell'ala di un aereo civile causata dal *flutter* (a destra).

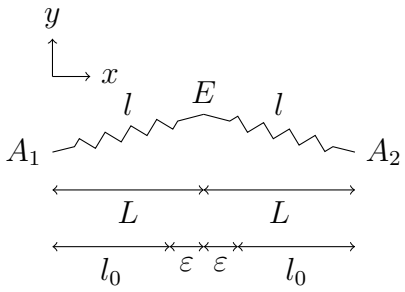

Figura 3.3: Schematizzazione degli elastomeri.

Considerando la figura 3.3 sia L la lunghezza iniziale degli elastomeri, opportunatamente pretensionati, e l_0 la lunghezza a riposo si può definire il *pre-streching*:

$$\varepsilon = L - l_0, \tag{3.4}$$

parametro fondamentale nello studio dell'innesco del *flapping* [12]. Inoltre è importante definire il modulo della forza esercitata dal singolo elastomero [13], essendo G il modulo di elasticità tangenziale e A_0 l'area della sezione iniziale dell'elastomero a riposo:

$$|F^{\mathrm{el}}| = GA_0 \left[\frac{l}{l_0} - \frac{l_0^2}{l^2} \right]. \tag{3.5}$$

Considerando la forza lungo y risultante dai 4 elastomeri ed essendo $sin(\theta) =$

$\frac{y}{\sqrt{L^2+y^2}}$ avremo:

$$|F_y^{\mathrm{el}}| = 4GA_0 \left[\frac{\sqrt{L^2+y^2}}{l_0} - \frac{l_0^2}{L^2+y^2} \right] \frac{y}{\sqrt{L^2+y^2}}. \tag{3.6}$$

Per piccoli angoli $y << l_0 < L$, quindi $L^2 + y^2 = l^2$ e *pre-stretching* piccolo rispetto alla lunghezza a riposo, $\varepsilon << l_0$, si può definire il coefficiente efficace di elasticità lungo y:

$$K_y^{\mathrm{eff}} = \frac{4GA_0}{L} \left[\frac{l}{l_0} - \frac{l_0^2}{l^2} \right], \tag{3.7}$$

coefficiente per cui si può scrivere

$$F_{\mathrm{y}} = K_y^{\mathrm{eff}} y. \tag{3.8}$$

Tramite la determinazione della K_y^{eff} è possibile calcolare la frequenza di oscillazione naturale del sistema ala-elastomeri:

$$\omega_{\mathrm{nat}} = \sqrt{K_y^{\mathrm{eff}}/m_{\mathrm{tot}}}, \tag{3.9}$$

e quindi regolare l_0 in modo tale da avere forze e ω_{nat} il più possibile equivalenti per ogni prova. Analogamente per quanto riguarda la F^{el} relativa allo spostamento orizzontale lungo l'asse x essa dipenderà dal pretensionamento e dalla componente orizzontale dell'allungamento degli elastomeri; è necessario ricordare però che a differenza del precedente, gli elastomeri esercitano forze contrapposte a due a due, per cui:

$$|F_x^{\mathrm{el}}| = 2GA_0 \left[\frac{L-x}{l_0} - \frac{l_0}{L-x}^2 \right] - 2GA_0 \left[\frac{L+x}{l_0} - \frac{l_0}{L-x}^2 \right]. \tag{3.10}$$

È possibile quindi dedurre per deformazioni molto minori di l_0:

$$K_x^{\mathrm{eff}} = \frac{4GA_0}{10L^3}(L^3 + 2l_0^2). \tag{3.11}$$

Da queste considerazioni è facile notare che la frequenza naturale associata alle oscillazioni verticali è molto maggiore di quella relativa alle oscillazioni orizzontali che inoltre risulteranno molto limitate.

$$\frac{K_y}{K_x} = \frac{\epsilon}{l_0} << 1. \tag{3.12}$$

È possibile infine definire la tensione σ [MPa] dividendo l'equazione (3.5) per la sezione dell'elastomero considerato. È necessario dimensionare il sistema in modo tale da mantenere la tensione e la deformazione inferiori a quelle relative allo stato plastico, altrimenti vengono meno tutte le proprietà di tale materiale.

3.4 Potenze e rendimento

Per calcolare la potenza estraibile dal dispositivo nella presente tesi si è fatto riferimento a quelle di *plunge* e di Betz poiché permettono di ricavare, rispettivamente, l'energia meccanica posseduta dal dispositivo e quella totale effettivamente posseduta dal fluido. La potenza di Betz viene comunemente usata per i dispositivi che producono energia da un fluido in moto come per esempio le pale eoliche. La prima rappresenta l'effettiva potenza trasferita dal fluido al dispositivo ed infatti dipende strettamente dalla velocità del Pivot Point (v_{pp}) e dalla forza di portanza esercitata sul dispositivo:

$$P_{\text{plunge}} = F_L v_{\text{PP}}. \tag{3.13}$$

La potenza di Betz, derivata dall'omonima legge, fornisce la massima energia che si può ricavare per unità di tempo tramite un dispositivo di *energy harvesting* da un fluido in moto ad una data velocità all'interno del volume di controllo definito dal dispositivo in esame. Affinché sia possibile applicare tale legge è necessario effettuare alcune ipotesi per il fluido all'interno del volume di controllo:

- fluido incomprimibile;
- velocità uniforme;
- moto assiale in ingresso ed in uscita dal dispositivo;
- nessuna interazione tra il fluido all'interno e quello all'esterno del volume di controllo;
- flusso indisturbato a monte e a valle del dispositivo.

È possibile quindi applicare l'equazione di continuità tra monte e valle del dispositivo per ottenere l'energia e quindi la potenza cercata. La potenza di Betz risulta quindi:

$$P_{\text{Betz}} = \frac{1}{2}\rho_f A U_\infty^3 \frac{d}{C}, \tag{3.14}$$

con ρ_f la densità fluido, A la superficie dell'ala, d la maggiore ampiezza tra l'oscillazione del PP e del TE, C la corda dell'ala e U_∞ la velocità del vento. Il rendimento di Betz è l'indice di quanta energia il dispositivo è effettivamente in grado di estrarre dal fluido, definito come:

$$\eta_{\text{Betz}} = \frac{\bar{P}_{\text{plunge}}}{P_{\text{Betz}}}. \tag{3.15}$$

dove con $\bar{P}_{\text{plunge}}$ viene indicata la potenza di *plunge* media prodotta per quella determinata velocità del vento.

Capitolo 4

Modello Fenomenologico

Il modello fenomenologico ha l'obbiettivo di fornire una conferma numerica ai dati sperimentali ottenuti in laboratorio e definire le equazioni del moto in modo tale da prevedere e determinare il valore di una variabile osservabile in un preciso esperimento. Per la stesura delle equazioni della dinamica si è fatto riferimento alla rappresentazione schematizzata dell'ala, mostrata in figura 4.1, in cui si presenta la conformazione meccanica bidimensionale del sistema; con L si intende la lunghezza degli elastomeri pretensionati, come mostrato nel capitolo 3.3, θ è l'angolo dell'ala rispetto all'orizzontale e U_{inf} la velocità del vento. La descrizione completa delle caratteristiche dell'ala modellata è riportata nella tabella 5.1.

4.1 Equazioni del modello fenomenologico ideale)

Il modello fenomenologico semi-empirico è costituito dalle equazioni differenziali ordinarie (ODEs) proposte da Andersen, Pesavento e Wang [11] tramite cui viene modellata la dinamica bidimensionale dell'ala. È Importante sottolineare che si applica l'approssimazione di modello quasi-stazionario nella quale le forze del fluido sono espresse in termini delle variabili cinetiche esclusivamente dell'ala; tale approssimazione permette di considerare la soluzione delle equazioni indipendentemente dalla storia del fenomeno. Il modello prevede inoltre le seguenti ipotesi semplificative:

- fluido incomprimibile (ρ = costante);
- flusso uniforme (campo di velocità costante nel tempo e nello spazio);

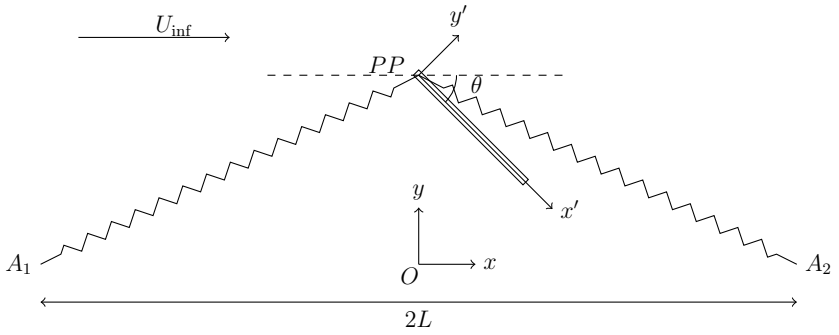

Figura 4.1: Schematizzazione meccanica per la definizione delle equazioni dinamiche.

- modello a parametri concentrati (ala assunta come corpo rigido e azione delle forze esterne puntuale);
- sistema bidimensionale (effetti di bordo trascurabili).

Analogamente all'analisi sperimentale si sono mantenuti regimi di Reynolds contenuti, Re compreso fra 10^2 e 10^3, considerando la velocità del vento $2.5\,\text{m/s} < U_\infty < 5\,\text{m/s}$. Di seguito sono riportate le equazioni differenziali ordinarie della dinamica considerando il sistema di riferimento x' e y' co-rotante con l'ala:

$$(m + m_{11})\dot{v}_{x'} = (m + m_{22})\dot{\theta}v_{y'} + F^{\text{el}}_{x'} - \rho_{\text{f}}\Gamma\tilde{v}_{y'} - F^{\nu}_{x'} \tag{4.1}$$

$$(m + m_{22})\dot{v}_{y'} = -(m + m_{11})\dot{\theta}v_{x'} + F^{\text{el}}_{y'} + \rho_{\text{f}}\Gamma\tilde{v}_{x'} - F^{\nu}_{y'} \tag{4.2}$$

$$(I_G + I_{\text{a}})\ddot{\theta} = (m_{11} - m_{22})v_{x'}v_{y'} + crF^{\text{el}}_{y'} + C_\Gamma l_\tau \rho_{\text{f}}\Gamma\tilde{v}_{x'} - \tau^{\nu} \tag{4.3}$$

$$\frac{\text{d}x'_G}{\text{d}t} = v_{x'} + \dot{\theta}y'_G \tag{4.4}$$

$$\frac{\text{d}y'_G}{\text{d}t} = v_{y'} - \dot{\theta}x'_G \tag{4.5}$$

$$\frac{\text{d}\theta}{\text{d}t} = \dot{\theta} \tag{4.6}$$

dove $v_{x'}$ e $v_{y'}$ denotano la velocità del centro di massa, $\tilde{v}_{x'} = (v_{x'} - U\cos\theta)$ e $\tilde{v}_{y'} = (v_{y'} + U\sin\theta)$ sono le velocità relative al flusso imperturbato, m è la massa dell'ala, I_G è il momento d'inerzia riferito al CM, r rappresenta la distanza tra il CM e il PP normalizzati con la corda, x'_G e y'_G sono le coordinate del CM, θ è l'angolo di beccheggio, $\mathbf{F}^{\text{el}}$ è la forza elastica, $\rho_{\text{f}}\Gamma\tilde{v}_{y'}$ è la forza associata alla circolazione Γ e $l_\tau = c/4\cos\theta$ è il braccio del momento

generato dalla circolazione. I coefficienti di massa aggiunta m_{11}, m_{22} e I_{a} sono espressi per un'ala a sezione trasversale rettangolare come definito da Huang *et al.* [14]: $m_{11} = (3\pi/8)\rho_{\mathrm{f}}\delta^2$, $m_{22} = (3\pi/8)\rho_{\mathrm{f}}c^2$, $I_{\mathrm{a}} = (5\pi/256)\rho_{\mathrm{f}}(c^2 - \delta^2)^2$.

La circolazione Γ, la forza viscosa $\mathbf{F}^{\nu}$ e il momento torcente dissipativo τ^{ν} sono espressi semi-empiricamente utilizzando alcuni parametri indipendenti [15]:

$$\Gamma = -C_T c \frac{\tilde{v}_{x'}\tilde{v}_{y'}}{\sqrt{\tilde{v}_{x'}^2 + \tilde{v}_{y'}^2}} + \frac{1}{2}C_R c^2 \dot{\theta}, \tag{4.7}$$

$$\mathbf{F}^{\nu} = \frac{1}{2}\rho_{\mathrm{f}} c \left[C_D(0)\,\tilde{v}_{x'}^2 + C_D(\pi/2)\,\tilde{v}_{y'}^2\right] \frac{\sqrt{\tilde{v}_{x'}^2 + \tilde{v}_{y'}^2}}{\tilde{v}_{x'}^2 + \tilde{v}_{y'}^2}\,(\tilde{v}_{x'}, \tilde{v}_{y'}), \tag{4.8}$$

$$\tau^{\nu} = C_{\tau}\rho_{\mathrm{f}}\dot{\theta}\left(\frac{|\tilde{v}_{y'}|c^3}{24} + \frac{|\dot{\theta}|c^4}{64}\right), \tag{4.9}$$

dove C_T e C_R sono, rispettivamente, i coefficienti traslazionali e rotazionali di portanza, $C_D(0)$ e $C_D(\pi/2)$ sono i coefficienti di resistenza definiti per $\theta = 0$, ala parallela al flusso d'aria, e per $\theta = \pi/2$, ala perpendicolare al flusso d'aria; C_{τ} è il coefficiente di dissipazione relativo al momento torcente. Per permettere al programma di avanzare per istanti successivi e quindi risolvere le equazione per istanti successivi si è optato per un'integrazione del terzo ordine di Adams-Bashfort (Appendice A).

4.2 Implementazione e *fitting*

È stato necessario riscrivere le equazioni della dinamica per poter introdurre nel programma già esistente:

- La gravità nel sistema di riferimento 2D (F_{gx}, F_{gy})=($m_{tot}g\sin\theta$; $m_{tot}g\cos\theta$) con m_{tot} la massa totale del dispositivo;
- L'implementazione della forza elastica esercitata dagli elastomeri come descritto nel capitolo 3.3, che nel modello originale era approssimata a quella di una molla ideale.

I momenti considerati nell'equazione(4.3) sono riferiti al CM pertanto risulterà nullo il momento generato dalla forza di gravità applicata in tale punto, a differenza di quello generato dalle forze elastiche che risulta fondamentale. Le equazioni rielaborate risultano quindi:

$$(m + m_{11})\dot{v}_{x'} = (m + m_{22})\dot{\theta}v_{y'} - F_{1x'}^{\mathrm{el}} - F_{2x'}^{\mathrm{el}} - \rho_{\mathrm{f}}\Gamma\tilde{v}_{y'} - F_{x'}^{\nu} - F_{\mathrm{gx}}, \tag{4.10}$$

	Valore
C_{T}	2.1
C_{R}	1.5
C_{D0}	0.1
$C_{\mathrm{D}\pi 2}$	8.0
C_{τ}	8.25
C_{Γ}	1.5

Tabella 4.1: Coefficienti del modello

$$(m + m_{22})\dot{v}_{y'} = -(m + m_{11})\dot{\theta}v_{x'} - F^{\mathrm{el}}_{1y'} - F^{\mathrm{el}}_{2y'} + \rho_{\mathrm{f}}\Gamma\tilde{v}_{x'} - F^{\nu}_{y'} - F_{\mathrm{gy}}, \quad (4.11)$$

$$(I_G + I_{\mathrm{a}})\ddot{\theta} = (m_{11} - m_{22})v_{x'}v_{y'} + cr(F^{\mathrm{el}}_{1y'} + F^{\mathrm{el}}_{2y'}) - C_{\Gamma}l_{\tau}\rho_{\mathrm{f}}\Gamma\tilde{v}_{x'} - \tau^{\nu}. \quad (4.12)$$

Il modello fenomenologico, come descritto precedentemente, è un modello semi-empirico che dipende da coefficienti ottenuti mediante l'analisi sperimentale; pertanto è necessario effettuare una complessa calibrazione o *fitting* di tali coefficienti, che sono:

- C_{T} coefficiente empirico relativo alla circolazione;
- C_{R} coefficiente di portanza rotazionale;
- C_{D0} coefficiente di resistenza per $\theta = 0$;
- $C_{\mathrm{D}\pi 2}$ coefficiente di resistenza per $\theta = \pi/2$;
- C_{τ} coefficiente di dissipazione relativo al momento torcente;
- C_{Γ} coefficiente reativo al momento della forza associata alla circolazione;

L'obbiettivo finale del *fitting* effettuato è stato proprio quello di calibrare il modello in modo tale da avere un buon accordo con i risultati sperimentali. Nella tabella 4.1 sono riportati i valori finali assunti dai coefficienti a seguito della calibrazione del modello.

Capitolo 5

Analisi in Galleria del Vento

Lo studio sul sistema in esame è stato effettuato mediante l'utilizzo di opportune apparecchiature sperimentali in grado di caratterizzare la dinamica e la cinematica del movimento dell'ala e del fluido in funzione di parametri significativi. Nel presente capitolo viene presentata la descrizione dei dispositivi utilizzati.

5.1 Galleria del vento

Le gallerie del vento sono condotti di differenti sezioni all'interno della quale scorre un flusso a densità e velocità note, tipicamente il flusso d'aria è ottenuto mediante ventilatori. La galleria è studiata in modo da riprodurre al meglio il campo di moto attorno al corpo in esame e le condizioni delle prove. Tutte le gallerie del vento si basano sul principio di relatività galileiana per il quale le leggi di una teoria fisica risultano essere valide per sistemi di riferimento in moto a velocità costante gli uni rispetto agli altri e sulla similitudine dinamica necessaria per il dimensionamento della camera o del corpo in esame se riprodotto in scala.

È importante tenere conto, per il dimensionamento della camera di prova, del bloccaggio aerodinamico della vena fluida; esso varia in funzione delle dimensioni della camera di prova rapportate alla sezione frontale del corpo investito. Le gallerie, come mostrato in figura 5.1, possono essere a circuito aperto, in cui il fluido viene aspirato direttamente dall'atmosfera (P_{atm}), inviato alla camera di prova e infine rimesso in atmosfera, o a circuito chiuso dove il fluido dopo essere passato nella camera di prova viene rimesso in circolo con un unico condotto di ritorno.

Vengono sottolineate le seguenti grandezze adimensionali per la definizione del flusso nella camera:

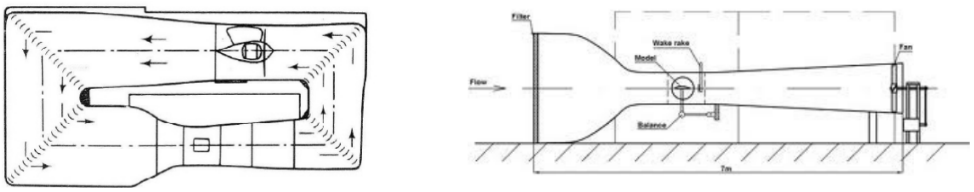

Figura 5.1: Tipologie di galleria del vento a circuito chiuso (sinistra) a circuito aperto (destra).

- Numero di Reynolds $Re = \frac{\rho V L}{\mu}$ applicato per fluidi viscosi;
- Numero di Mach $Ma = \frac{V}{\sqrt{kRT}}$ che permette di definire il campo di velocità del fluido con $k = C_\mathrm{p}/C_\mathrm{v}$ e R la costante del gas considerato (287.05 J/kgK per aria secca);

Le scale ρ, V, μ sono la densità, la velocità e la viscosità del fluido; L è la lunghezza di riferimento, nel caso di un profilo alare $L = \text{corda alare}\,(C)$. La galleria del vento utilizzata è ad aspirazione a ciclo aperto e appartiene alla tipologia subsonica in quanto Ma < 0.3; grazie a questo dato possiamo considera il fluido che scorre al suo interno incomprimibile commettendo un errore trascurabile. Risulta così valida l'equazione di continuità per i fluidi incomprimibili:

$$\int_A v_\mathrm{n} dA = 0, \tag{5.1}$$

con A la sezione del volume di controllo delimitato dalla galleria. La portata volumetrica risulta quindi:

$$Q = S_1 v_1 = S_2 v_2. \tag{5.2}$$

Di seguito viene brevemente schematizzato il design della galleria: la sezione è quadrata e le componenti mostrate in fig. 5.2 sono:

A *Convergnete*: la parte convergente del tunnel, in esso l'aria accelera riducendo contemporaneamente il livello di turbolenza e lo spessore dello strato limite sulle pareti. È composto da acciaio spesso 2mm.

B *Camera di prova*: parte in cui l'aria raggiunge la v_max; è il luogo dove vengono testati i modelli di interesse. Bisogna conoscere parametri come Re, il livello di turbolenza, la temperatura e l'umidità che possono caratterizzare la prova. È importante che il modello abbia una sezione frontale molto piccola rispetto alla sezione della condotta, onde evitare fenomeni di

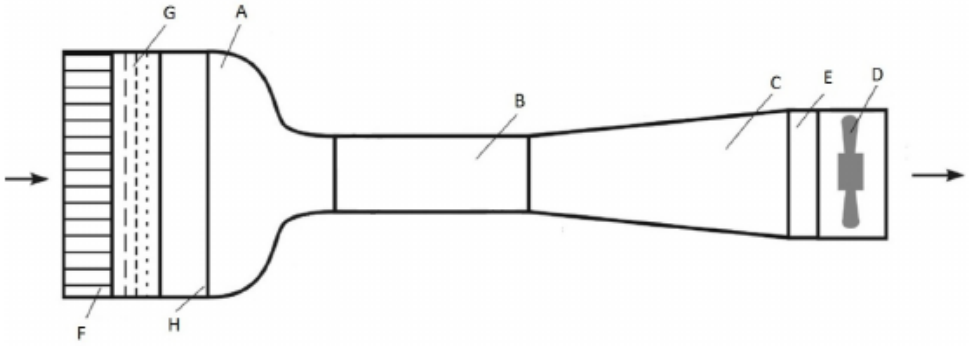

Figura 5.2: Rappresentazione schematica della galleria del vento e sue componenti.

bloccaggio della vena fluida e interferenze di parete. Composta in acciaio, con due finestre in plexiglass, una su cui si affaccia la telecamera e una dove viene posizionata la fonte luminosa e due pannelli di compensato, posti uno come supporto per il posizionamento dell'ala e l'altro necessario per migliorare l'acquisizione video.

C *Diffusore*: componente in cui l'aria viene decelerata non superando mai angoli di divergenza di 2° o 3° in quanto il gradiente di pressioni positivo è sfavorevole e provoca il distacco della vena fluida;

D *Ventola*: composta da un motore trifasico a regolazione di potenza con ventola coassiale, le cui pale sono progettate per garantire la massima aspirazione. È montata alla fine del diffusore sullo *Shape Adapter*;

E *Shape Adapter*: apertura circolare a partire dalla sezione quadrata del diffusore, idonea ad ospitare il diametro effettivo della ventola.

F *Honeycomb*: pannello a nido d'ape posizionato prima del convergente con la funzione di direzionare il flusso, orientandolo in piccoli filetti d'aria; i suoi canali in policarbonato sono paralleli tra loro e al flusso d'aria.

G *Reti antiturbolenza*: una serie di strati di differente larghezza di trama, posizionati a debita distanza, che spezzano il flusso d'aria ottenendo una corrente più uniforme. È un ulteriore strategia per diminuire la turbolenza del flusso d'aria in ingresso.

H *Setting Chamber*: è l'estensione del convergente, atto a ottimizzare la canalizzazione del fluido, parte che però non è presente nella galleria utilizzata in quanto le dimensioni risulterebbero eccessive;

Figura 5.3: Fastec IL3100-SM4.

La velocità del vento all'interno della camera di prova è determinata mediante un parametro di conversione in relazione alla tensione applicata ai capi del motore:

$$V = 1.62T, \tag{5.3}$$

stabilita mediante misurazione con sonda Cobra e confermata dall'acquisizione video, dove V si misura in m/s e T si misura in V.

5.2 Telecamera

Per acquisire i moti dell'ala è stato necessario l'utilizzo di un' opportuna telecamera ad alte prestazioni la Fastec IL3100-SM4 (fig. 5.3).

Lo strumento è montato su un supporto rigido fissato alla galleria del vento in maniera tale da posizionarlo al centro del vetro in Plexiglass che si affaccia sulla camera di prova. Per lo studio del moto puro, senza la visualizzazione dei vortici, l'inquadratura è tale da permettere la messa a fuoco dell'ala e dello scatterer, semplice elemento costituito da nastro adesivo bianco con la funzione di diffusione del fascio laser che lo colpisce. Se sono necessarie riprese dettagliate la macchina dispone di *shutter* elettronico regolabile tra 2 μs e i 41.667 ms.

La camera è in grado di effettuare riprese ad alta risoluzione fino ad un massimo di $1280 * 1040$ pixels e ad un elevato numero di *Frame Per Second* (FPS) 500 FPS_{max}. L'illuminazione della camera di prova per le riprese è stata effettuata con un faro LED da 1700 lumen 220 V - 20 W che emette un fascio luminoso permanente sia nell'angolo sia nella profondità di illuminazione.

5.3 Altre strumentazioni

L'alimentazione della strumentazione viene effettuata tramite un banco digitale IPS2303S della ISO-TECH da 180 W che permette, mediante l'inter-

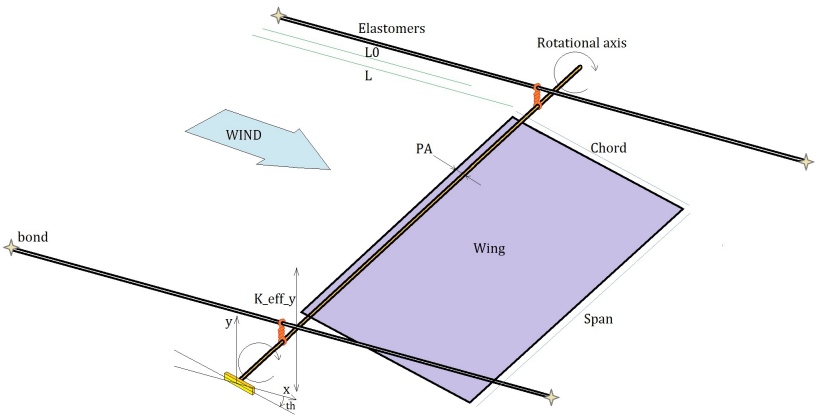

Figura 5.4: Schematizzazione della struttura del foil e degli elastomeri.

faccia con un pannello digitale, l'uso di due canali di collegamento separati dotati di 4 set di memorie di configurazione differenti a risoluzione elevata (1 mV e 1 mA) con uscita pulita e stabile. Il laboratorio è altresì dotato di una cella di carico, per le misure delle forze di portanza e resistenza, in grado di fornire valori della forza su tre assi perpendicolari con capacità massima di 10 N e frequenza di acquisizione di 250 Hz. Un software dedicato si occupa del segnale in uscita. Per la corretta visualizzazione dei vortici ci si è affidati ad un generatore di fumo non convenzionale, una pompa peristaltica che immette olio medicinale, in maniera proporzionale alla tensione applicata. Le gocce di liquido percorrono un filo metallico verticale posto all'ingresso della camera di prova che viene riscaldato mediante effetto Joule, essendo connesso ad un generatore di corrente. Vengono così generati una serie di filetti di fum11o densi che incontrano l'ala circa ad un quarto dello *span* di distanza dallo *scatterer*.

5.4 Setup sperimentale

Come descritto nel capitolo 2.1 l'ala è costituita da Polivinilacetato (PVAC) avente densità $\rho = 1.17\,\mathrm{g/cm^3}$ e avente *Pivot Point* (PP) circa coincidente con il *Leading Edge* (LE) per permettere una correlazione diretta con le simulazioni del modello numerico.

Come mostrato in figura 5.4 un'asta di metallo è fissata mediante adesivo all'ala, il sitema asta-ala risulta quindi un sistema rigido; gli elastomeri invece non sono direttamente collegati all'ala ma sono connessi alla parte inferiore di un doppio anello di rame a forma di 8; l'asta di metallo si inse-

	Valore	UdM
Span (S)	70	mm
Corda (C)	20	mm
Punto d'attacco (PA)	0.05C	mm
Raggio elastomeri a riposo	0.6	mm
Sezione elastomeri a riposo	1.13097	mm^2
lunghezza elastomeri a riposo(l_0)	49.29000	mm
Modulo di elasticità tangenziale (G)	0.534	MPa
Massa ala	0.185	g
Massa adesivo	0.045	g
Massa asta	0.400	g
Massa adesivo per variazione CM	0.210	g
Massa totale (m_{tot})	0.840	g
Centro di massa	0.1869C	mm
$K_{\text{y}}^{\text{eff}}$	5.72143	N/m
Frequenza naturale calcolata	13.13610	Hz
Frequenza naturale misurata	13.02800	Hz

Tabella 5.1: Caratteristiche del sistema studiato

risce perfettamente in quello superiore ed è libera di ruotare con un basso coefficiente di attrito, che altrimenti avrebbe un effetto smorzante importante. Inoltre viene trascurato il momento che si crea a causa della distanza $d = 22.1705\,\text{pixels}$ ($1.76\,\text{mm}$) tra il punto di attacco reale degli elastici e il centro dell'asta poiché molto esiguo. Di seguito viene fornita la descrizione precisa del modello mostrato, le cui dimensioni sono riportate nella tabella 5.1.

Gli studi sono stati effettuati per velocità del vento relativamente basse $2.5\,\text{m/s} < U_\infty < 5\,\text{m/s}$ per rimanere in regimi di Reynolds e Mach contenuti cercando di valutare i moti per frequenze e ampiezze a cavallo della transizione, dove con transizione viene definita la condizione per la quale avviene una variazione del regime di *flapping* come descritto nel capitolo 6. Inoltre, le ridotte velocità comportano frequenze di oscillazione minore e quindi una miglior acquisizione dei moti da parte della telecamera e un calcolo delle forze più preciso. Per effettuare le misurazioni è stato necessario disporre l'ala sopra un supporto di legno, esattamente al centro della camera di prova, per mantenere il flusso d'aria uniforme minimizzando così l'effetto viscoso dello strato limite di parete. La vena fluida deformata dal dispositivo non interferisce con le pareti. Queste considerazioni permettono di avere un comportamento il più possibile similare a quello che avrebbe l'ala se fosse posizionata

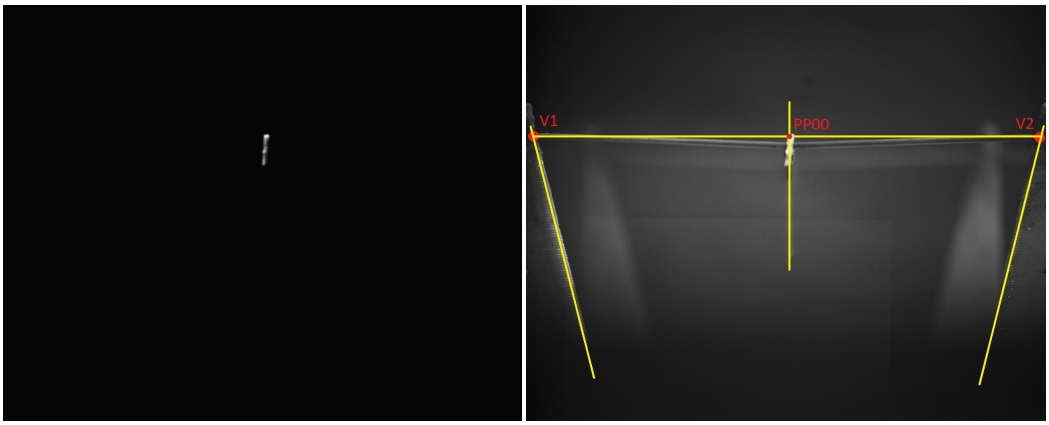

Figura 5.5: Posizione zero *scatterer* (sinistra). Posizione reciproca struttura e ala con *low light* (destra).

in atmosfera libera. La telecamera è stata disposta ad una distanza tale da avere una corretta visualizzazione dello *scatterer* e della struttura portante del dispositivo necessaria per definire le posizioni di riferimento iniziali. Al codice, elaborato in linguaggio matlab per il calcolo dei moti e delle forze, sono fornite le immagini acquisite dalla telecamera dello *scatterer*, illuminato solamente dalla luce del fascio laser spegnendo ogni altra fonte luminosa nella stanza. La procedura standard adottata per ciascuna misura è di seguito riportata:

1. Si posiziona lo *scatterer* con un angolo di inclinazione piccolo θ_{corr} rispetto all'ala per permettere una sua migliore illuminazione.

2. Si controlla la corretta illuminazione dello *scatterer* in ogni posizione del suo moto e della messa a fuoco della camera.

3. Si acquisiscono preliminarmente i parametri di correzione dei vettori posizione e angolo in condizioni di riposo, assenza vento, e senza modificare la posizione della telecamera per evitare errori di parallasse e di riferimento:

   (a) Posizione zero (fig. 5.5 a sinistra) ovvero la posizione dello *scatterer* per ala perfettamente verticale e calcolo tramite software del θ_{corr}.

   (b) Acquisizione della struttura utilizzando la feature (*low light*), che permette di catturare immagini con scarsa luce, per la definizione delle coordinate, in pixel, dei punti di vincolo tra gli elastici e la struttura, punti V_1 e V_2, e le coordinate di PP00 intersezione tra la

retta passante per il punto di equilibrio dell'ala e perpendicolare alla congiungente V_1 e V_2 e la congiungente V_1 e V_2 (fig. 5.5 a destra); inoltre la distanza in mm tra V_1 e V_2 è stata misurata in precedenza pertanto è possibile determinare la conversione pixel in mm semplicemente dividendo il valore in pixel appena determinato per il corrispondente valore in mm (pixel in mm=12.6930).

4. Acquisizione video del moto dell'ala.

Il PP00 definito nel punto 3b è di fondamentale importanza in quanto risulta essere il punto di equilibrio del sistema ala-elastomeri in assenza di gravità, definita la sua posizione è possibile stabilire con precisione dove posizionare il centro O(0;0) del sistema di riferimento (x;y) utilizzato poiché l'oscillazione assunta dal sistema risulterà in buona approssimazione simmetrica rispetto a tale punto; si può notare infatti come in assenza di gravità il PP risulterebbe coincidente con il PP00 mentre nel caso reale $PP\mathrm{y} < 0$ per cui gli elastomeri subiranno un'ulteriore deformazione; viene così determinata la lunghezza di pre-stretching in presenza della gravità Ls' con $Ls' > L$. Per il calcolo delle traiettorie e dei moti si sceglie l'intervallo di fotogrammi da analizzare, il programma analizzerà fotogramma per fotogramma cercando tutte le zone con tonalità di bianco superiore alla soglia stabilita; all'interno della zona così definita si identifica un rettangolo di una dimensione simile a quello determinato analogamente con la posizione zero e per ognuno si calcola il centro e l'angolo di orientazione. Per ottenere i vettori posizione e quindi il displacement in pixel del PP lungo gli assi x, y e l'angolo di rotazione dell'ala θ è necessario introdurre le correzioni determinate con i punti 3a e 3b precedentemente descritti.

Variata la velocità del vento viene poi ripetuta l'acquisizione video.

5.5 Leggi della dinamica

Prima di procedere con i risultati è necessario comprendere la dinamica del sistema sperimentale.

Le equazioni che regolano il moto sono derivabili dalle equazioni di Lagrange:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0 \tag{5.4}$$

dove L è la Lagrangiana ovvero una funzione che per i sistemi meccanici ne caratterizza la dinamica che risulta essere la differenza tra l'energia cinetica e l'energia potenziale di un corpo, con q_i e $\dot{q}_\mathrm{i} \in \Re^n$ rispettivamente le coordinate generalizzate del sistema e le rispettive derivate prime nel tempo (velocità).

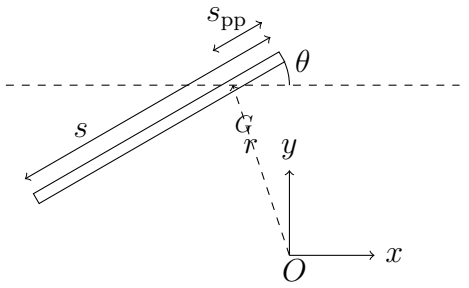

Figura 5.6: Schematizzazione meccanica per la definizione delle equazioni dinamiche.

Nel caso in esame si avrà $i = 1, 2, 3$, $q_1 = x$, $q_2 = y$ e $q_3 = \theta$ dove le coordinate x e y sono definite dalla posizione del PP rispetto all'origine, $r = (x, y)$ mentre θ è l'angolo che l'ala assume rispetto all'orizzontale come mostrato in figura 5.6. L'energia potenziale del sistema viene semplificata dei termini relativi alle forze fluidodinamiche ed elastiche considerandole come esterne al sistema, di fatto stiamo determinando la Lagrangiana dell'ala e non del sistema; pertanto rimane solo il contributo della forza di gravità:

$$U = m_{\mathrm{t}} g y_{\mathrm{CM}} \tag{5.5}$$

dove $\mathrm{g\,m/s^2}$ è l'accelerazione di gravità e y_{CM} la coordinata y del centro di massa,

$$y_{\mathrm{CM}} = \frac{m_{\mathrm{a}} y + m_{\mathrm{w}}[y - (\frac{1}{2}c - s_{\mathrm{pp}})\,\sin\theta]}{m_{\mathrm{a}} + m_{\mathrm{w}}} = y - \frac{m_{\mathrm{w}}}{m_{\mathrm{a}} + m_{\mathrm{w}}} \frac{1}{2} c\,\sin\theta. \tag{5.6}$$

Se $s_{\mathrm{pp}} = 0$ considerando m_{a} la massa dell'asta m_{w} la massa dell'ala, si ha:

$$U = y m_{\mathrm{t}} g - m_{\mathrm{w}} g \frac{\mathrm{c}}{2}\,\sin\theta. \tag{5.7}$$

La trattazione dell'energia cinetica risulta leggermente più complessa; si deve considerare sia il termine legato al moto dell'ala sia quello dell'asta che non possono essere ritenuti come un corpo unico poiché hanno moti differenti. Le coordinate di un punto P generico risultano essere:

$$P = (x; y) = (x; y)_{\mathrm{PP}} + (S - S_{\mathrm{PP}})(\cos\theta; \sin\theta), \tag{5.8}$$

$$\dot{P}_{\mathrm{x}} = (\dot{x}; \dot{y}) = (\dot{x}; \dot{y})_{\mathrm{PP}} - (S - S_{\mathrm{PP}})(\dot{\theta}\,\sin\theta), \tag{5.9}$$

$$\dot{P}_{\mathrm{y}} = (\dot{x}; \dot{y}) = (\dot{x}; \dot{y})_{\mathrm{PP}} + (S - S_{\mathrm{PP}})(\dot{\theta}\,\cos\theta). \tag{5.10}$$

Per cui l' energia cinetica dell'asta risulta essere:

$$T_1 = \frac{1}{2} m_{\mathrm{a}} (\dot{x}^2 + \dot{y}^2), \tag{5.11}$$

mentre per l'ala è determinata integrando tra 0 e la lunghezza della corda C l'energia del generico punto P:

$$T_2 = \frac{1}{2} \int_0^{\mathrm{c}} \rho[(\dot{x} - (s - s_{\mathrm{pp}})\dot{\theta}\, \sin\theta)^2 + (\dot{y} + (s - s_{\mathrm{pp}})\dot{\theta}\, \cos\theta)^2] ds \tag{5.12}$$

dove ρ è la densità dell'ala, s è la variabile di integrazione definita lungo l'ala ed s_{pp} è la distanza del PP dal LE.

La Lagrangiana risulta essere $L = T_1 + T_2 - U$, per cui:

$$L = \frac{1}{2} m_{\mathrm{a}} (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} m_{\mathrm{w}} c \dot{\theta} (\dot{x} \sin\theta + \dot{y}\, \cos\theta) - m_{\mathrm{t}} g y + \frac{1}{2} m_{\mathrm{w}} c g\, \sin\theta; \tag{5.13}$$

pertanto derivando secondo la (5.4) si ottengono le tre equazioni di Eulero-Lagrange cercate e considerando le forze di portanza (L) e resistenza (D), la forza elastica lungo x e y e i momenti (M) che provocano la rotazione, otteniamo il bilancio complessivo delle forze lungo gli assi x e y e dei momenti:

$$\begin{cases} m_{\mathrm{t}} \ddot{x} + \frac{1}{2} m_{\mathrm{w}} c[\ddot{\theta}\, \sin\theta + \dot{\theta}^2\, \cos\theta] - F_{\mathrm{el_x}} = D, \\ m_{\mathrm{t}} \ddot{y} - \frac{1}{2} m_{\mathrm{w}} c[\ddot{\theta}\, \cos\theta - \dot{\theta}^2\, \sin\theta\theta] - F_{\mathrm{el_y}} + m_{\mathrm{t}} g = L, \\ I\ddot{\theta} + \frac{1}{2} m_{\mathrm{w}} c[\ddot{x} \sin\theta - \ddot{y}\, \cos\theta + g\, \cos\theta] = M. \end{cases} \tag{5.14}$$

Capitolo 6

Risultati

In questo capitolo vengono presentati i risultati ottenuti a seguito dell'analisi numerica e sperimentale; viene proposto uno studio del comportamento del dispositivo al variare della velocità del vento.

6.1 La cinematica

Come punto di partenza si propone l'analisi delle traiettorie del *Pivot Point* (PP) e del *Trailing Edge* (TE) al variare della velocità del vento.

6.1.1 Traiettorie *Pivot Point* e *Trailing Edge*

Come si nota dalla figura 6.1, relativa alle prove numeriche (fila in alto) e sperimentali (fila in basso) dove il vento soffia da sinistra verso destra, il PP ed il TE hanno due moti molto differenti; il primo descrive una traiettoria a *lemniscata*, ovvero a forma di otto, mentre il PP compie oscillazioni verticale di moto armonico. Il PP per velocità superiori alla velocità di innesco del *flapping*, $U_\infty > 2.5\,\mathrm{m/s}$, non ha un moto perfettamente verticale ma presenta lievi oscillazioni laterali dovute alla risultante delle forze aerodinamiche che in ogni istante agisce sull'ala. I quattro elastomeri hanno il compito di mantenere il più possibile verticale lo spostamento del PP senza però vincolarlo completamente; in questo modo il dispositivo risulta essere di tipo passivo, come descritto nel capitolo 1.1, ed inoltre si massimizza il *plunging*. Il moto del TE presenta un'oscillazione orizzontale, responsabile della caratteristica forma ad otto, che non dipende da una deflessione dell'ala, considerata come un corpo rigido, ma dalla combinazioni dei moti di *pitch* e di *plunge*.

Per velocità prossime alla velocità di innesco del *flapping*, $U_\infty = 2.5\,\mathrm{m/s}$, si nota come la forza di gravità tenda a trascinare la traiettoria del TE verso

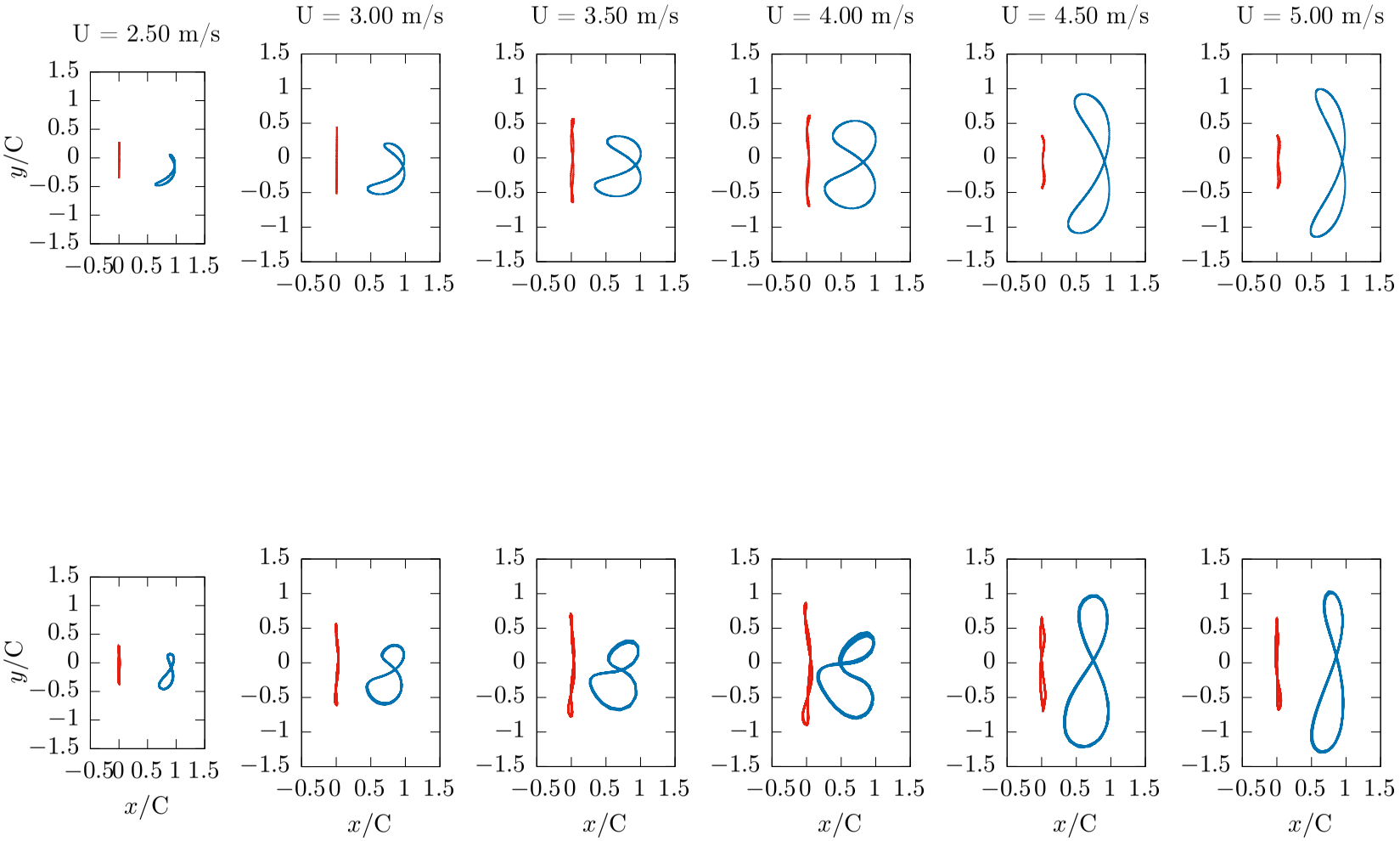

Figura 6.1: Traiettoria bidimensionale normalizzata alla corda C $[x/C;y/C]$ del PP (in rosso) e del TE (in blu) al variare della velocità del vento m/s ricavate dall'analisi numerica (fila in alto) e dalle prove sperimentali (fila in basso).

il basso; l'oscillazione che avviene per y negative è molto più marcata di quella per y positive, ciò accade in quanto la portanza non è ancora sufficiente ad eguagliare il peso del dispositivo. Il PP presenta un'oscillazione non molto ampia e quasi simmetrica rispetto allo zero grazie alla presenza degli elastomeri; il PP risente della forza di gravità ma in maniera meno pronunciata. Incrementando la velocità del vento si intensificano le forze fluidodinamiche agenti sul dispositivo, lo spostamento del PP aumenta progressivamente e la traiettoria a lemniscata del TE assume una conformazione ad otto sempre più marcata e simmetrica rispetto allo zero. L'ampiezza dell'oscillazione del PP aumenta fino ad un massimo che, come mostrato in figura 6.1, si ottiene per un intorno di $U_\infty = 4\,\mathrm{m/s}$; a questa velocità la traiettoria del TE è perfettamente simmetrica rispetto allo zero e lo spostamento lungo y ha un'ampiezza di poco inferiore a quella del moto lungo y del PP. Al di sopra di questa velocità si ha transizione dello stato del dispositivo.

Con *transizione* si definisce quello stato del dispositivo in cui la traiettoria del PP inizia a ridursi e l'otto spaziato dal TE assume una forma allungata, lo spostamento lungo x si riduce ed aumenta quello lungo y che risulta più ampio dello spostamento y del PP. Durante la transizione i fenomeni legati all'interazione fluido-struttura raggiungono il loro apice, per cui risultano massime le forze aerodinamiche agenti sul dispositivo.

Per velocità superiori ai $4.5\,\mathrm{m/s}$ la differenza tra le ampiezze aumenta notevolmente fino a quando l'ala si allinea perfettamente con il vento azzerando sia il moto di *plunging* che quello di *pitching*.

È importante soffermarsi sulle oscillazioni del PP e dell'angolo θ, misurato rispetto all'orizzontale, in quanto essi rappresentano rispettivamente i moti di *plunging* e di *pitching* caratteristici del dispositivo studiato.

L'andamento armonico del PP appena descritto è reso ancora più chiaro dallo studio dello spostamento y, come mostrato in figura 6.2, a regime, condizione che si verifica a circa un secondo dall'innesco del *flapping*; il PP, infatti, oscilla con andamento quasi sinusoidale tra due valori estremi. Per velocità del vento basse si nota la leggera influenza della gravità sul PP; infatti esso raggiunge, durante la discesa, valori negativi delle y leggermente superiori ai valori positivi raggiunti nella fase di risalita. All'aumento della U_∞ la simmetria diventa sempre più marcata e l'ampiezza dell'oscillazione aumenta fino al suo valore massimo nell'istante precedente la transizione. Nella figura 6.2 si nota inoltre come a seguito della transizione cambi lo stato del dispositivo portando ad una diminuzione notevole dello spostamento y del PP.

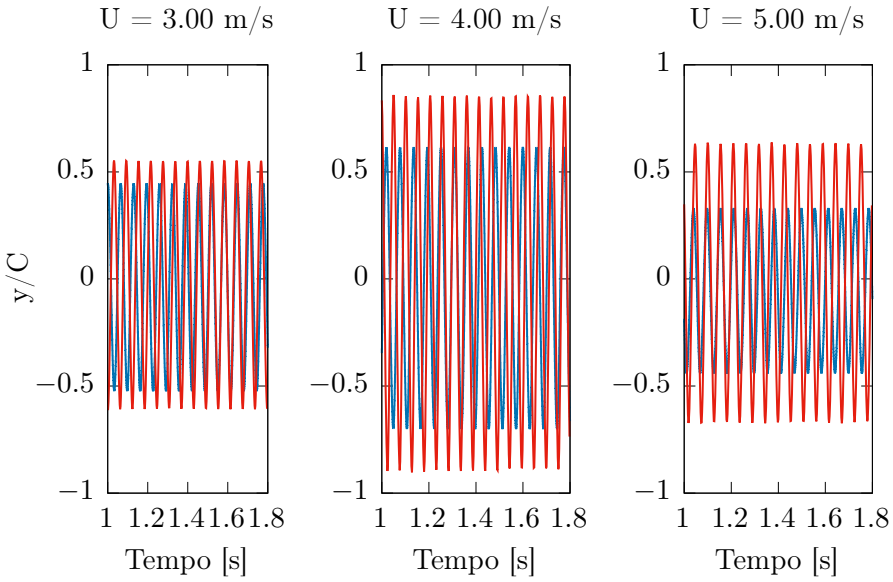

Figura 6.2: Spostamento verticale del PP, nella condizione a regime ricavato dalle prove sperimentali (rosso) e dai test numerici (blu).

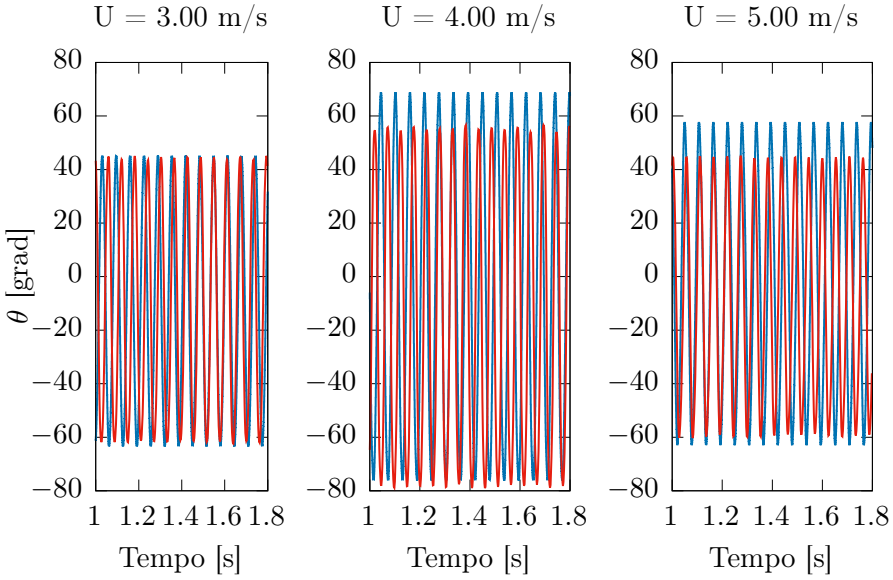

Figura 6.3: Andamento dell'angolo θ [grad], misurato rispetto all'orizzontale, in funzione del tempo[s] nella condizione a regime ricavato dalle prove sperimentali (rosso) e dai test numerici (blu).

L'andamento dell'angolo θ (fig. 6.3), a regime, è quasi sinusoidale e presenta lo stesso comportamento, al variare della velocità del vento, dello spostamento del PP. L'angolo θ assume valori negativi, con TE rivolto verso l'alto, molto più marcati rispetto a quelli positivi, che presentano TE rivolto verso il basso, per velocità del vento vicine alla velocità critica inferiore; all'aumento della velocità del vento corrisponde un incremento dell'oscillazione di θ fino alla condizione di massimo in transizione. Per $U_\infty > 4.5\,\mathrm{m/s}$ anche l'oscillazione di θ subisce una brusca diminuzione che, come avviene per lo spostamento del PP, è causata dalla variazione del regime di *flapping*. Grazie all'analisi del grafico 6.2 è possibile definire l'ampiezza e la frequenza dell'oscillazione del PP.

6.1.2 Ampiezza e Frequenza

L'ampiezza dell'oscillazione verticale è stata ricavata sia sperimentalmente che numericamente come la differenza tra i punti di massimo, positivo, e di minimo, negativo, raggiunti dal PP. Come definito precedentemente essa varia al variare della velocità del vento con andamento a massimo. Nella figura 6.4 si nota come per velocità del vento $2.5\,\mathrm{m/s} < U_\infty < 4\,\mathrm{m/s}$ l'ampiezza dello spostamento y del PP aumenta con andamento quasi lineare, mentre, a seguito della transizione, si riduce bruscamente per poi assumere un andamento decrescente fino ad azzerarsi. Il punto ad ampiezza massima risulta pertanto essere verificato per $U_\infty \cong 4\,\mathrm{m/s}$ quando il dispositivo risulta in transizione.

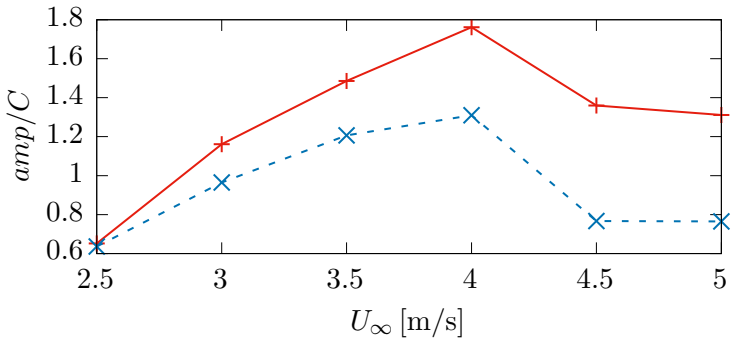

Figura 6.4: Ampiezza dell'oscillazione del PP ricavata dalle prove sperimentali (rosso) e dai test numerici (blu) al variare della velocità del vento.

La frequenza dell'oscillazione è definita come l'inverso del tempo impiegato dal PP per compiere un'oscillazione completa. Si noti che per velo-

cità appena sufficienti ad innescare il *flapping*, $U_\infty = 2.5\,\mathrm{m/s}$, il dispositivo possiede una frequenza vicina a quella naturale, definita come il numero di oscillazioni al secondo che il dispositivo manifesta a seguito di una perturbazione esterna in assenza di vento. Aumentando la U_∞ si ha una crescita importante della velocità y del PP e di conseguenza un notevole aumento della frequenza; anche in questo caso il punto di massimo si ha nell'istante antecedente la transizione per $U_\infty \cong= 4\,\mathrm{m/s}$.

A seguito della transizione, a differenza dell'ampiezza che decresce fino ad azzerarsi, dopo una brusca diminuzione la frequenza torna ad aumentare leggermente.

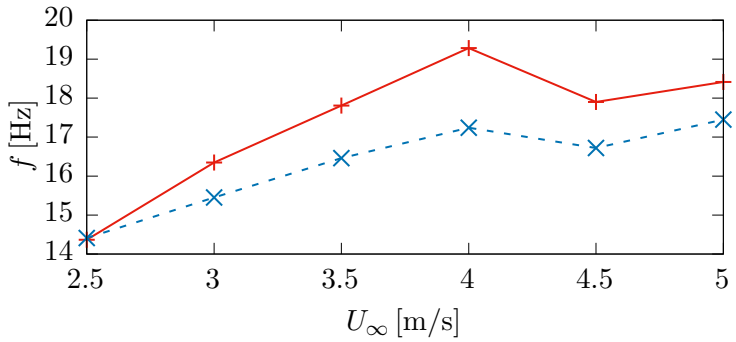

Figura 6.5: Frequenza di oscillazione del PP ricavata dalle prove sperimentali (rosso) e dai test numerici (blu) al variare della velocità del vento.

Mettendo in relazione i due differenti moti del PP e di θ si può determinare infine la fase tra le due sinusoidi. Dalla figura 6.6 si nota come per velocità del vento vicine all'innesco del *flapping*, il *pitching* ed il *plunging* presentino uno sfasamento ridotto; incrementando la velocità del vento tale sfasamento aumenta con andamento lineare quasi costante fino alla condizione in cui avviene la transizione per cui i moti di *pitching* e di *plunging* si sfasano bruscamente risultando in quadratura per velocità prossime ai $4.5\,\mathrm{m/s}$. Una volta avvenuta la transizione invece la fase continua ad oscillare per valori superiori alla quadratura.

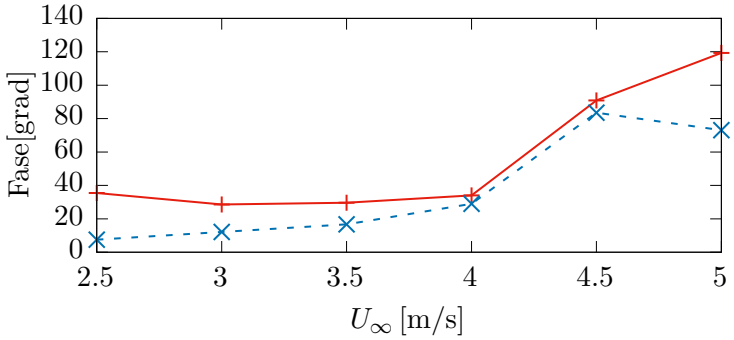

Figura 6.6: Fase tra PPY e θ ricavata dalle prove sperimentali (rosso) e dai test numerici (blu) al variare della velocirà del vento

6.1.3 Grafici di Lissajous

Dato il caratteristico moto armonico sia del PP che dell'angolo θ è interessante studiare la relazione che sussiste tra loro; per tale studio si fa riferimento ai diagrammi di Lissajous. Tali grafici, studiati dal fisico Jules Antoine Lissajous, rappresentano curve generate da un set di equazioni parametriche sinusoidali fortemente dipendenti dalle ampiezze, dalle frequenze e dalla fase tra le grandezze considerate; in questo modo è possibile riassumere tutte le considerazioni precedentemente effettuate per valutare i moti di *pitching* e *plunging* (fig. 6.7); nel caso in esame tali grafici sono generati dalle armoniche relative al moto lungo y del PP e di θ rispetto all'orizzontale.

Successivamente all'innesco del *flapping* si nota, guardando la prima immagine da sinistra, come *pitch* e *plunge* siano fortemente sfasati e le rispettive ampiezze ridotte, il grafico assume una forma ad ellisse schiacciata con asse maggiore inclinato positivamente.

Mano a mano che la velocità del vento viene incrementata, scorrendo la figura da sinistra verso destra, si nota come l'area spaziata dall'ellisse e l'inclinazione del suo asse maggiore aumentano progressivamente, poiché:

- l'area aumenta come conseguenza dell'aumento dell'ampiezza delle oscillazioni del PP;
- l'inclinazione dell'asse maggiore dell'ellisse aumenta come conseguenza dell'aumento delle dimensioni degli angoli spaziati dall'ala.

Entrambi gli effetti appena citati sono indice della sfasatura tra le oscillazioni del *pitch* e del *plunge*.

In geometria l'ellisse ha come caso particolare la circonferenza, che si verifica nel momento in cui risulta avere gli assi di ugual lunghezza; allo

stesso modo l'ellisse caratteristica dei diagrammi di Lissajous tende ad una circonferenza quando le due grandezze si trovano in fase o in quadratura.

Aumentando ancora la U_∞ nella fase post transizione si nota come il grafico ritorni ad assumere una forma ad ellisse schiacciata con asse maggiore però inclinato negativamente; queste evidenze riassumono come, a seguito della transizione, il dispositivo abbia completamente cambiato il proprio regime di *flapping*.

Nel caso in esame il *pitch* e il *plunge* si trovano in quadratura esattamente per $U_\infty = 4.5\,\mathrm{m/s}$ e quindi è possibile dedurre come essa sia il punto limite tra i due stati del dispositivo:

- il primo in cui *pitch* e *plunge* passano da essere in fase a sfasarsi fino a raggiungere la quadratura;
- il secondo in cui, sfasandosi oltre la quadratura, il *pitch* ed il *plunge* tendono ad oscillare in una condizione intermedia tra la quadratura e la controfase.

6.2 Risultati del modello

L'analisi delle forze e dei coefficienti aerodinamici, dal punto di vista sperimentale, è ancora oggetto di studi e si stanno ricercando nuovi metodi per la loro determinazione. Attualmente il calcolo delle forze è derivato dalle equazioni di Lagrange, come descritto nel capitolo 5.5; i risultati non sono confrontabili con il modello in quanto è ancora in fase di sviluppo il processo matematico e sperimentale per la loro deduzione. In futuro si cercheranno nuove strade per completare lo studio della dinamica anche sperimentalmente. Di seguito si presentano alcuni risultati interessanti ottenuti unicamente con il modello fenomenologico.

6.2.1 Coefficienti aerodinamici

Per quanto riguarda le forze aerodinamiche di seguito vengono presentati i coefficienti di portanza C_L e resistenza C_D, ricavati rispettivamente dalle equazioni (3.1) e (3.2), al variare della velocità del vento; i valori sono visualizzati all'interno di un ciclo di oscillazione dell'ala a regime. Dal grafico 6.8 si noti come il C_D oscilli tra valori maggiori rispetto al a C_L e sia il C_D che il C_L aumentano con l'aumentare della velocità fino a transizione. Per velocità maggiori di $4\,\mathrm{m/s}$ il C_L presenta un minimo ed un massimo molto marcati e si noti come a seguito della transizione oscilli tra 3 e -3, valori di massimo e

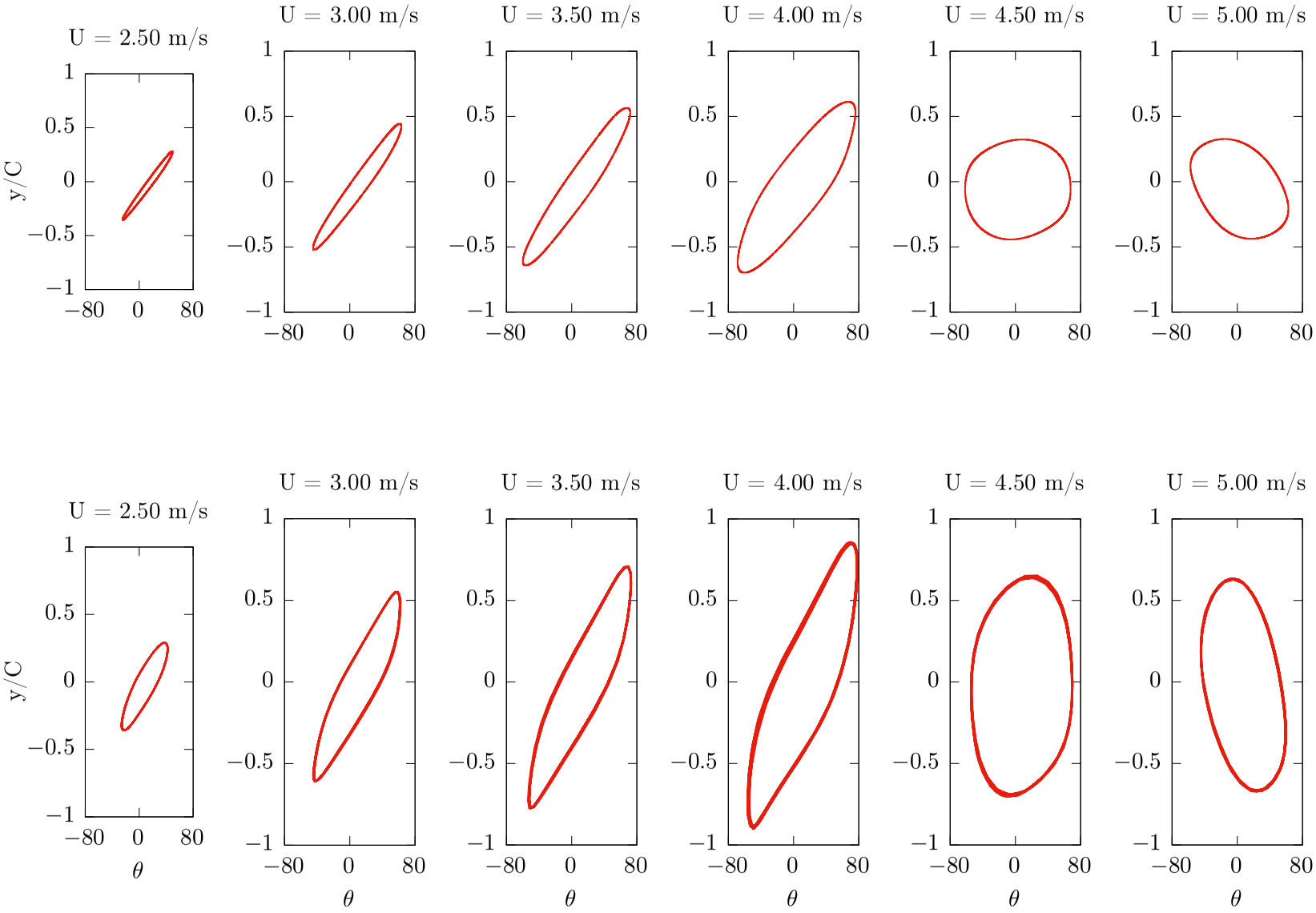

Figura 6.7: Diagrammi di Lissajous che mettono in relazione l'angolo di oscillazione dell'ala rispetto all'orizzontale e lo spostamento y del PP normalizzato alla corda C al variare della velocità del vento, ricavate dall'analisi numerica fila in alto e dalle prove sperimentali fila in basso

minimo raggiunti in fase di transizione. Il C_D presenta massimi e minimi che crescono all'aumentare della velocità del vento, a seguito della transizione, a differenza del C_L, si rileva una leggera diminuzione di tali valori. È interessante notare come sia per il C_D che per il C_L per $2.5\,\mathrm{m/s} < U_\infty < 4.0\,\mathrm{m/s}$ le rispettive curve abbiano andamento similare tra loro; per $U_\infty = 4.0\,\mathrm{m/s}$ tale andamento cambia in maniera importante mostrando come la transizione causi una variazione del regime di *flapping* e dei fenomeni fluidodinamici. Per velocità ancora superiori, stabilizzato il nuovo regime di *flapping*, le curve tornano ad essere di nuovo simili tra loro.

6.2.2 Potenza e rendimento di Betz

Per lo studio della potenza effettivamente catturata dal dispositivo facciamo riferimento alla potenza di *plunge* (eq. 3.13) definita nel capitolo 3.4. La figura 6.9 mostra come a regime, dopo un secondo dall'innesco del *flapping*, la potenza istantanea assuma un andamento periodico; un aumento della velocità del vento comporta un aumento della potenza in quanto come visto in precedenza aumentano sia la portanza che la velocità del PP. I valori massimi in termini di output di potenza si raggiungono esattamente in transizione per $U_\infty = 4\,\mathrm{m/s}$ mentre la potenza media continua a crescere. A seguito della transizione si nota un calo importante dei valori di massimo e minimo della potenza meccanica istantanea e, a seguito della variazione del regime di *flapping* e della conseguente diminuzione dei fenomeni di interazione fluido-struttura, un calo del rendimento di Betz. Quanto appena affermato si può notare in maniera più chiara dalla figura 6.10, dove vengono presentate al variare della velocità del vento la potenza ed il rendimento di Betz, equazioni (3.14) e (3.15) descritte nel capitolo 3.4 e la potenza di *plunge*.

Dal grafico si nota come le due potenze presentino un ordine di grandezza di differenza in quanto l'energia effettivamente captata dal dispositivo è quella utilizzata per la generazione dei moti di *pitch* e *plunge*; inoltre il fluido a valle del dispositivo possiede ancora una parte rilevante dell'energia iniziale. Le due potenze possiedono un andamento monotono crescente, la potenza di Betz infatti dipende dal cubo della velocità e quindi è ragionevole pensare che il dispositivo possa estrarre più energia all'aumentare di essa. Il rendimento definito dalla 3.15 invece è massimo, circa il 15%, proprio in transizione per $U_\infty = 4\,\mathrm{m/s}$ in quanto i fenomeni legati all'interazione fluido-struttura raggiungono l'apice e il dispositivo è in grado di estrarre dal fluido una quota parte di energia maggiore che nello stato precedente o successivo alla transizione. Per velocità superiori, benché il dispositivo sia in grado di estrarre più energia, l'efficienza non risulta essere così alta in quanto la po-

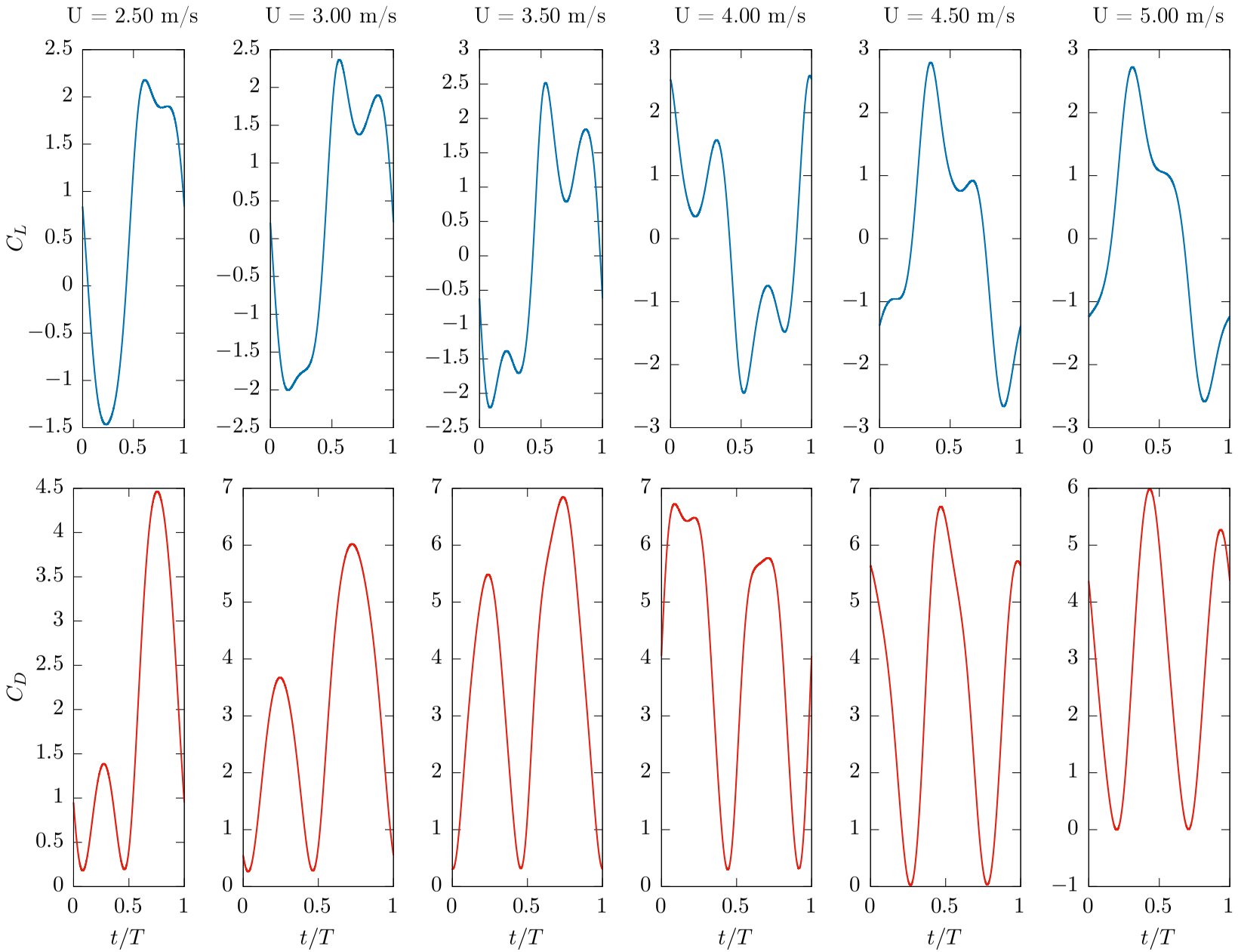

Figura 6.8: Coefficienti di Lift (blu) e Drag (rosso) al variare della velocità del vento, misurati all'interno di un ciclo di oscillazione dell'ala a regime t/T dove T è il periodo dell'oscillazione.

tenza di Betz aumenta con andamento cubico mentre la potenza di *plunge*, quella effettivamente estraibile, cresce con andamento lineare.

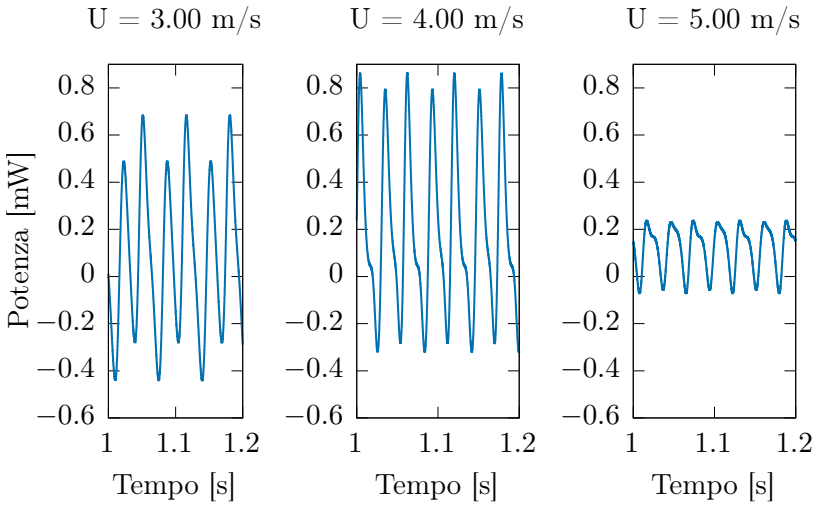

Figura 6.9: Potenza di *plunge* a regime in funzione del tempo per tre velocità caratteristiche, 3 m/s stato pre-transizione, 4 m/s dispositivo in transizione e 5 m/s stato post-transizione.

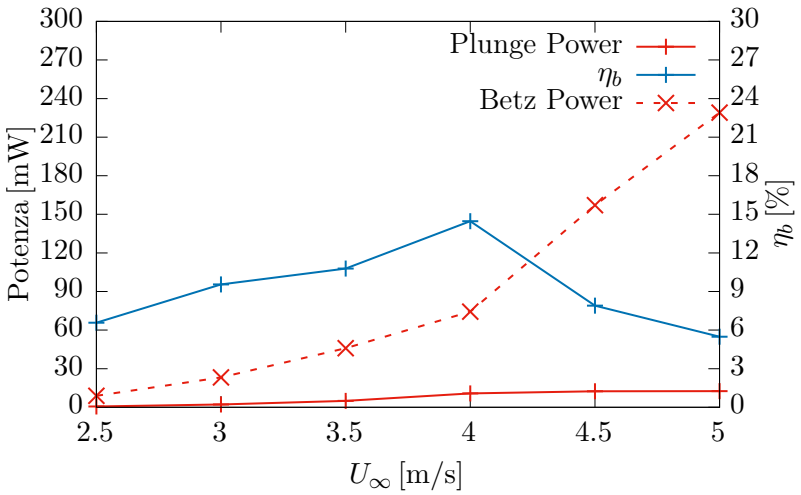

Figura 6.10: Potenza di *plunge* e potenza e rendimento di Betz al variare della velocità del vento U_∞.

6.3 Sommario

Lo studio della transizione risulta di fondamentale importanza poichè, noti i parametri fluidodinamici principali e la velocità del vento che la innesca, si può determinare la velocità del vento per cui il PP ha spostamento massimo e la condizione di massimo rendimento. La transizione infatti rappresenta lo stato di massimo assoluto per tutte le grandezze che influiscono sul dispositivo, poiché l'interazione tra il fluido e la struttura è massimizzata e di conseguenza il dispositivo è in grado di catturare molta più energia dal fluido; sono escluse solamente, da quanto appena affermato, le potenze medie di *plunge* e di Betz che continuano a crescere con l'aumentare della velocità.

Il modello replica in buona approssimazione gli esperimenti nel riprodurre le traiettorie e gli andamenti qualitativi delle principali grandezze relative al moto dell'ala, come lo spostamento verticale del PP; è interessante notare come pur essendo un modello matematico semplificato, basato su equazioni differenziali ordinarie, riesca a prevedere gli andamenti di tutte le grandezze fisiche concorrenti alla cinematica e alla dinamica del dispositivo.

Capitolo 7

Conclusioni

La presente tesi mostra le ricerche effettuate sul dispositivo FLEHAP; l'innovativo sistema di *energy harvesting* da interazione fluido-struttura, basato sul principio del *flutter* aeroelastico, brevettato dal Dipartimento di Fisica dell'Università di Genova.

È stato implementato un modello matematico semi-empirico in grado di risolvere le equazioni della dinamica del dispositivo; nello specifico sono state introdotte la forza di gravità e le forze elastiche esercitate dagli elastomeri, che ancorano l'ala alla struttura, al fine di avvicinarsi maggiormente ai test effettuati in laboratorio. Sulla medesima ala modellata sono stati effettuati test sperimentali in galleria del vento con l'obiettivo di definire e caratterizzare la cinematica e la dinamica del dispositivo potendo avere un riscontro costante con i test numerici. È importante sottolineare come procedendo parallelamente con lo sviluppo del modello e i test in laboratorio si è arrivati alla condizione in cui la predizione numerica è in buon accordo con i risultati sperimentali nello studio della cinematica del dispositivo e permetta anche di definirne la dinamica ed i principali parametri elettrici.

7.1 Prospettive future

La ricerca sul dispositivo FLEHAP è tutt'altro che conclusa, pertanto gli obbiettivi da raggiungere nel prossimo futuro riguardano:

- l'implementazione del modello relativa ai fenomeni legati all'estrazione elettrica;
- il proseguimento dello studio della dinamica completando le tematiche irrisolte sia dal punto di vista numerico che sperimentale;

- lo studio di nuove tecnologie e materiali da implementare nel dispositivo per migliorarne le caratteristiche. Tra i nuovi materiali oggetto di studio troviamo i capacitori elastomerici da integrare con l'accoppiamento elettromagnetico, per aumentare l'output di energia;

- uno studio approfondito sull'accoppiamento del dispositivo FLEHAP con le reti di sensori WINS; quindi studiare specificatamente un sistema di trasferimento dell'energia prodotta ai sensori che permetta il mantenimento di un elevato rendimento;

- l'utilizzo di più dispositivi FLEHAP, contemporaneamente, è uno dei possibili metodi di impiego considerati; pertanto sarebbe interessante studiare dispositivi per l'accoppiamento tra FLEHAP massimizzare la produzione di energia elettrica.

Bibliografia

[1] HEAD. *Tecnologia Kers*. Disponibile in rete. URL: `http://head.com.cgi-labs.de/ski/technologies/skis/?region=it&id=330`.

[2] P. Rawat, K.D. Singh, H. Chaouchi e J.M. Bonnin. "Wireless sensor networks: a survey on recent developments and potential synergies". In: *The Journal of Supercomputing* 68.1 (2014), pp. 1–48.

[3] La Malfa S. *Wireless sensor networks*. Disponibile in rete. URL: `http://www.dees.unict.it/users/bando/files/wsn.pdf`.

[4] J. Young, J.C.S. Lai e M.F. Platzer. "A review of progress and challenges in flapping foil power generation". In: *Progress in Aerospace Sciences* 67 (2014), pp. 2–28.

[5] C. Grouthier, S. Michelin, R. Bourguet, Y. Modarres-Sadeghi e E.D. Langre. "On the efficiency of energy harvesting using vortex-induced vibrations of cables". In: *Journal of Fluids and Structures* 49 (2014), pp. 427–440.

[6] S. Michelin e O. Doaré. "Energy harvesting efficiency of piezoelectric flags in axial flows". In: *Journal of Fluid Mechanics* 714 (2013), pp. 489–504.

[7] Michael M. Bernitsas, K. Raghavan, Y. Ben-Simon e E.M. Garcia. "VIVACE (Vortex Induced Vibration Aquatic Clean Energy): A new concept in generation of clean and renewable energy from fluid flow". In: *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* 130.4 (2008), pp. 1–15.

[8] L. Travaglini. "Misure di forze fluidodinamiche su un dispositivo di Energy Harvesting". Tesi di Laurea in Ingegneria Meccanica. Università degli Studi di Genova, Scuola Politecnica, 2015.

[9] L.M. Brunenghi. "Analisi forze su dispositivo FLEHAP". Tesi di Laurea in Ingegneria Meccanica, Università degli Studi di Genova, Scuola Politecnica, 2014.

[10] G.Boccalero. "Sviluppo di sistemi di Energy Harvesting da vento". Tesi magistrale in Scienze e Ingegneria dei Materiali. Università degli Studi di Genova, Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali, 2014.

[11] A. Andersen, U. Pesavento e Z.J. Wang. "Analysis of transitions between fluttering, tumbling and steady descent of falling cards". In: *Journal of Fluid Mechanics* 541 (2005), pp. 91–104.

[12] G.Boccalero. *Developing of a new Energy Harvester through innovative polimeric materials*. Report interno. Università degli Studi di Genova, Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali, 2015.

[13] C. Boragno, R. Festa e A. Mazzino. "Elastically bounded flapping wing for energy harvesting". In: *Applied Physics Letters* 100.25, 253906 (2012).

[14] W. Huang, H. Liu, F. Wang, J. Wu e H.P. Zhang. "Experimetal study of a freely falling plate with an inhomogeneous mass distribution". In: *Physical Review* 88.5 (2013), pp. 1–7.

[15] A. Andersen, U. Pesavento e Z.J. Wang. "Unsteady aerodynamics of fluttering and tumbling plates". In: *Journal of Fluid Mechanics* 541 (2005), pp. 65–90.

Appendice A

Metodo Risolutivo di Adams-Bashfort

Per la risoluzione delle equazioni differenziali ordinarie, al più del secondo ordine, si è adottato il metodo risolutivo di Adams-Bashfort di ordine tre che presenta una risoluzione numerica lineare di tipo *multistep*. Tale metodo utilizza una combinazione lineare dei valori assunti dalla funzione e dalle sue derivate negi passi precedenti; inoltre si adottano i coefficienti $b_1 = \frac{23}{12}$ $b_2 = -\frac{4}{3}$ $b_3 = \frac{5}{12}$ che nell'equazione risolutiva risultano:

$$y_{n+3} = y_{n+2} + \Delta t(b_1 f(t_{n+2}, y_{n+2}) + b_2 f(t_{n+1}, y_{n+1}) + b_3 f(t_n, y_n)), \quad \text{(A.1)}$$

ove n è un numero naturale che identifica il passo temporale a cui corrisponde il valore, approssimato, della funzione all'istante $t_n = n\Delta t$. Applicando la risoluzione numerica a ciascuna delle tre equazioni cardinali si ottiene l'evoluzione temporale delle velocità lineari ed angolari del CM rispetto al sistema di riferimento co-rotante.

Dalle equazioni (4.10), (4.11) e (4.12) risulta:

$$f_1(t_n, y_n) = \dot{\omega} \quad \text{(A.2)}$$

$$f_2(t_n, y_n) = \dot{v}_{x'} \quad \text{(A.3)}$$

$$f_3(t_n, y_n) = \dot{v}_{y'}. \quad \text{(A.4)}$$

Infine si risale alla posizione tempovariante (x', y') imponendo:

$$f_1(t_n, y_n) = \dot{x'} \quad \text{(A.5)}$$

$$f_2(t_n, y_n) = \dot{y'} \quad \text{(A.6)}$$

$$f_3(t_n, y_n) = \dot{\theta}. \quad \text{(A.7)}$$