



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA

SCUOLA POLITECNICA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

**Modellizzazione e Studio Prestazionale di un
Sistema per l'Energy Harvesting da
Interazione Fluido-Struttura per
Accoppiamento Elettromagnetico**

—
TESI DI LAUREA

RELATORE:
Prof. A. BOTTARO

CORRELATORE:
Dr. S. OLIVIERI

CANDIDATI:
FILIPPO FERRANDO

DAVIDE TONELLI

ANNO ACCADEMICO 2015/2016

Abstract

This Thesis deals with an energy harvesting device by fluid-structure interactions, with possible applications with respect to wireless network sensors employed for monitoring purposes. The present work aims at developing a mathematical description, by means of a quasi-steady phenomenological model based on a system of ordinary differential equations, taking into account the extraction phase which exploits an electromagnetic coupling. This tool, complementary to wind-tunnel investigations, may suggest possible optimal configurations leading to further performance improvements. Specifically, we compare several situations: (i) no extraction, (ii) viscous damping law, (iii) R-L circuit modelled by adding a lumped-parameter equation. A parametric study is conducted in order to evaluate the influence of the main parameters on the system performance, identifying the optimal conditions for energy extraction. Our results are compared with similar and competitive devices in literature. Finally, possible design improvements and consequent modifications to the model formulation are suggested.

Sommario

L'ambito di ricerca della presente Tesi riguarda un dispositivo per l'energy harvesting da interazione fluido-struttura, con possibilità di applicazione nell'ambito innovativo delle reti di sensori wireless per finalità di monitoraggio in diversi campi. Il presente lavoro si propone di sviluppare una descrizione matematica, attraverso un modello fenomenologico quasi-stazionario costituito da un sistema di equazioni differenziali ordinarie, che tenga in conto l'effetto estrattivo realizzato attraverso un accoppiamento elettromagnetico. Tale strumento, complementare all'analisi in galleria del vento, può suggerire possibili configurazioni ottimali che possono portare a futuri incrementi prestazionali del dispositivo. Nello specifico, vengono descritte diverse tipologie di modelli a partire dalla condizione in assenza di estrazione, passando ad una modalità estrattiva attraverso smorzatore viscoso e quindi alla considerazione di una equazione aggiuntiva per la descrizione dell'accoppiamento elettromagnetico e del circuito elettrico di tipo resistivo-induttivo (R-L). Viene inoltre condotto uno studio al variare dei principali parametri in gioco al fine di valutare quale sia la loro influenza sulle prestazioni del dispositivo, individuando le condizioni ottimali per l'estrazione di energia. Si fornisce un inquadramento dei dati prestazionali ottenuti rispetto ad altri dispositivi di tipologie più o meno simili e si delineano infine le possibili evoluzioni progettuali e le consistenti estensioni dello stesso modello matematico.

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Interazioni fluido-struttura	1
1.2	Energy Harvesting	1
1.3	EH da interazioni fluido-struttura	3
1.4	Reti WINS	5
2	Oggetto e scopo	7
2.1	FLEHAP: Stato dell'arte	7
2.1.1	Metodi di ancoraggio ala	8
2.1.2	Caratterizzazione degli elastomeri	9
2.1.3	Metodi di conversione elettrica	10
2.2	Scopo della presente Tesi	12
3	Cenni di aerodinamica e FSI	14
3.1	Forze aerodinamiche	14
3.2	Flutter	16
3.3	Quasi-stazionarietà	18
4	Fenomeno elettromagnetico	19
4.1	Legge di Faraday-Neumann-Lenz	19
4.2	Circuito R	20
4.3	Circuito RL	21
5	Modello Fenomenologico	23
5.1	Modello in assenza di estrazione	24
5.2	Modello con smorzamento viscoso	28
5.3	Modello con estrazione elettromagnetica	29
5.3.1	Presenza di sola R	30
5.3.2	Presenza di R-L	30
5.4	Quantità valutate	31
5.4.1	Dati prototipo studiato	31

6 Risultati	34
6.1 Modello in assenza di estrazione	34
6.1.1 Potenza e Rendimento di Betz	34
6.1.2 Traiettorie di Leading e Trailing Edge	36
6.2 Estrazione meccanica: smorzamento viscoso	38
6.2.1 Potenza e Rendimento	38
6.2.2 Traiettorie di Leading e Trailing Edge	41
6.3 Modello con estrazione elettromagnetica	43
6.3.1 Carico solo resistivo	43
6.3.2 Carico resistivo e induttivo	46
6.3.3 Traiettorie di Leading e Trailing Edge	48
6.4 Influenza di C_{bl}	50
6.4.1 Potenza e Rendimento	50
6.5 Confronto traiettorie	53
7 Conclusioni	54
7.1 Prospettive future	55
A Metodo risolutivo di Adams-Bashfort	56
Bibliografia	58

Elenco delle figure

1.1	Modello utilizzato per energy harvesting da interazione fluido-struttura (<i>galloping</i>) [5]	4
2.1	Rappresentazione schematica dell'ala e dei suoi parametri principali di riferimento (tratto da [12]).	8
2.2	Sistemi di ancoraggio degli elastomeri (tratto da [12])	8
2.3	Comportamento degli elastomeri in prova di trazione (tratto da [12]).	9
2.4	Meccanismo base di un capacitore elastomerico (tratto da [12]).	10
2.5	Rappresentazione grafica dell'accoppiamento EM (tratto da [12]).	11
2.6	Disposizione dei magneti con polarità alternata (tratto da [12]).	12
2.7	Schema che descrive il modello di ala adottato. Gli elastomeri sono rappresentati da una coppia di molle di lunghezza l ancorate sull'ala nel punto E e alla struttura portante nei punti A_1 e A_2	13
3.1	Forze agenti su un'ala investita da un flusso	15
3.2	coefficienti di portanza e resistenza al variare dell'angolo di attacco	16
3.3	Oscillazione e crollo del ponte Tacoma nel 1940	17
4.1	Schema del circuito del sistema con solo resistore	21
4.2	Schema del circuito del sistema con resistore ed induttore . . .	21
5.1	Rappresentazione del sistema di riferimento relativo (x', y') co-rotante con l'ala nella rotazione intorno al centro di massa (CM), e sistema di riferimento assoluto (x, y)	24
5.2	Schema descrittivo del modello di smorzamento viscoso applicato all'ala. Viene messa in evidenza l'opposizione dei versi del vettore velocità di PP e del vettore forza di smorzamento .	29

5.3	Rappresentazione schematica dell'ala in cui i capi delle bobine fissate sull'ala costituiscono il generatore di tensione ideale (V_g) di un circuito elettrico con R_i resistenza interna ed R di un dispositivo a resistenza variabile dall'esterno. Il vettore F^{EL} rappresenta la forza di freno elettromagnetico agente nel PP	31
5.4	Rappresentazione schematica dell'ala in cui i capi delle bobine fissate sull'ala costituiscono il generatore di tensione ideale (V_g) di un circuito elettrico con R_i resistenza interna ed R di un dispositivo a resistenza variabile ed induttanza variabile controllata dall'esterno. Il vettore F^{EL} rappresenta la forza di freno elettromagnetico agente nel PP	32
6.1	Grafico qualitativo che descrive l'andamento della potenza di plunge, della potenza di Betz e del rendimento di Betz, ottenuto dal loro rapporto	35
6.2	Traiettorie di Leading Edge (rosso) e Trailing Edge (blu) nel caso di assenza di estrazione di energia	37
6.3	Potenza estratta al variare del coefficiente di smorzamento (D) e della velocità del fluido	38
6.4	Rendimento meccanico al variare del coefficiente di damping (D) valutato per diverse velocità del fluido	39
6.5	Rendimento globale al variare del coefficiente di damping (D) valutato per diverse velocità del fluido	40
6.6	Traiettorie di Leading Edge (rosso) e Trailing Edge (blu) nel caso di damping con D parametro interno insieme alla velocità e specifico del valore di massimo della potenza meccanica estratta	42
6.7	Potenza elettrica al variare della resistenza (R) e della velocità del fluido	43
6.8	Rendimento al variare della resistenza (R) e della velocità del fluido	44
6.9	Rendimento al variare della resistenza (R) e della velocità del fluido	45
6.10	Potenza elettrica al variare dell'induttanza (H) e della velocità del fluido	46
6.11	Rendimento elettromagnetico al variare dell'induttanza (H) e della velocità del fluido	47
6.12	Rendimento globale al variare dell'induttanza (H) e della velocità del fluido	48

6.13	Traiettorie di Leading Edge (rosso) e Trailing Edge (blu) nel caso di carico resistivo con R parametro interno insieme alla velocità e specifico del valore di massimo della potenza elettrica estratta per ciascuna velocità	49
6.14	Potenza elettrica al variare del coefficiente di accoppiamento C_{bl} per diverse velocità fissate del fluido	50
6.15	Rendimento elettromeccanico al variare del coefficiente di accoppiamento C_{bl} per diverse velocità fissate del fluido	51
6.16	Rendimento globale al variare del coefficiente di accoppiamento C_{bl} per diverse velocità fissate del fluido	52
6.17	Confronto delle traiettorie ottenute per U4.0 nel caso senza estrazione, con carico resistivo e con carico resistivo-induttivo	53
7.1	Confronto di dispositivi per la produzione di energia da interazione fluido-struttura (tratta da [14] e [15]). Il punto celeste rappresenta un prototipo di recente sperimentazione del dispositivo FLEHAP.	54

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Interazioni fluido-struttura

Lo studio della mutua interazione tra fluidi e oggetti elastici è un problema di fondamentale importanza in molti campi della scienza e applicazioni tecnologiche. Con l'avvento dei *supercomputer*, è diventata possibile la soluzione quantitativa di una varietà di problemi che vanno dall'interazione tra la pressione del sangue e le pareti dei capillari all'aerodinamica del volo di un insetto. È anche un argomento di crescente interesse in relazione alla possibilità di manipolare il flusso del fluido per migliorare prestazioni aerodinamiche dei corpi in esso immersi, senza contare l'influenza sull'aspetto progettuale, ad esempio di aerei e ponti. In questo caso la mancata considerazione degli effetti di tali interazioni può essere catastrofica: la riduzione di quest'ultimo meccanismo è un'esigenza fondamentale per il corretto funzionamento di molti sistemi di ingegneria [1].

D'altra parte, esistono situazioni in cui il fenomeno è desiderato al fine di generare vibrazioni auto-sostenute, possibilmente di grande ampiezza [2]. Questo è un requisito tipico per dispositivi che possano estrarre energia elettrica dal fluido in movimento tramite opportuni meccanismi di conversione. Nei paragrafi successivi verranno illustrati i principali sistemi per generare energia da dispositivi di *energy harvesting* e per quale motivo in alcune applicazioni si preferiscono rispetto all'alimentazione a batteria o direttamente alla rete elettrica.

1.2 Energy Harvesting

Il termine *Energy Harvesting* (EH) riassume tutte quelle tecniche utilizzate da dispositivi elettronici atte a ricavare l'energia necessaria al loro sostenta-

mento direttamente dall'ambiente in cui si trovano ad operare. In particolare può essere definita come la conversione dell'energia dispersa nell'ambiente come sottoprodotto di processi artificiali e naturali in energia elettrica [3].

Energy Harvesting in inglese significa “mietere/raccogliere energia” ed è un processo che può essere chiamato anche “power scavenging”, che significa “cercare l'energia tra i rifiuti”. L'energia inutilizzata o di scarto è presente ovunque nell'ambiente che ci circonda: luce, vento, differenze di temperatura, onde a radiofrequenze, energia cinetica dalle onde del mare, dalle vibrazioni meccaniche al movimento umano. La quantità di energia prodotta dagli Energy Harvester è tipicamente di piccola taglia, atta ad alimentare dispositivi elettronici a basso consumo.

In particolare, i dispositivi di Energy Harvesting possono essere utilizzati per alimentare reti di sensori wireless dislocati in zone remote [4]. L'utilizzo di batterie per tali sensori risulta particolarmente sconveniente perché necessitano di ricarica (o sostituzione) periodica, mentre i dispositivi di power scavenging garantiscono un funzionamento continuo e praticamente illimitato del sensore. Altri esempi ben conosciuti di dispositivi di Energy Harvesting sono gli orologi che si caricano con il movimento del braccio e le calcolatrici che ricevono l'energia elettrica necessaria al funzionamento tramite il piccolo pannello solare in esse integrato.

È possibile suddividere i dispositivi attualmente esistenti nelle seguenti categorie, in base al tipo di energia che viene convertita in elettricità:

Fotovoltaico Pannelli costruiti con semi-conduttori che generano l'effetto fotoelettrico quando esposti alla luce solare. Si ha una conversione diretta della luce in energia elettrica. Tale tecnologia è usata sia per dispositivi di Energy Harvesting (superficie dei pannelli ridotta), sia per produzione di grandi quantità di energia (centrali solari fotovoltaiche).

Termoelettrico Giunzione di due materiali differenti in presenza di un gradiente termico. Per effetto Seebeck si genera una *f.e.m.* proporzionale al gradiente di temperatura. Valori tipici sono dell'ordine di $100[\mu\text{V}/\text{K}]$. Tale effetto è alla base del funzionamento delle termocoppie per la misura di temperatura in applicazioni industriali, ma collegando in serie più giunzioni si possono ottenere maggiori output elettrici.

Eolico Turbine eoliche di dimensione molto ridotta o sistemi che sfruttano fenomeni aeroelastici di natura periodica come il flutter. In entrambi i casi l'elettricità viene ottenuta dalla conversione dall'energia cinetica del vento. A differenza delle turbine eoliche tradizionali che hanno una velocità del vento di *cut-in* di almeno $5 - 6 [\text{m/s}]$, i dispositivi di

Energy Harvesting funzionano con una velocità della corrente d'aria di soli $2 - 3$ [m/s].

Piezoelettrico Alcuni cristalli o fibre particolari generano una *f.e.m.* quando sottoposti ad una deformazione meccanica. Per stimolare il materiale in modo da produrre l'effetto fotoelettrico si possono usare le vibrazioni di un motore, così come la pressione della suola di una scarpa sul terreno o il passaggio di un veicolo su un determinato tratto di una strada.

Rectenna (antenna rettificante) Particolare antenna che sfrutta le onde radio per produrre energia elettrica.

1.3 EH da interazioni fluido-struttura

L'interazione tra un fluido in movimento, normalmente acqua o aria, e una struttura genera delle forze che, in base a come essa è vincolata, possono garantirne il moto. Esempi quotidiani di questo fenomeno sono gli aerei che sfruttano la forza di portanza che si genera sulle ali per vincere la forza di gravità, o le barche a vela che utilizzano la forza che si genera dall'interazione tra il vento e la vela per muoversi sull'acqua.

I casi appena descritti riescono quindi a sfruttare l'interazione fluido-struttura ottenendo energia meccanica e cinetica, ma non vi è la possibilità di conversione in energia elettrica. Affinché questo sia possibile è necessario che il moto del corpo indotto dal fluido sia periodico. In particolare si possono suddividere i dispositivi per la produzione di energia tramite interazione fluido-struttura in due categorie principali: moto rotatorio e moto oscillatorio.

I turbogeneratori sfruttano l'interazione fluido-struttura per far ruotare un rotore composto da pale con un profilo particolare atto a massimizzare l'energia prelevata dal fluido. Il moto del rotore è solidale al moto di un albero il quale è collegato ad un alternatore che converte l'energia meccanica in elettricità. I principali sistemi che generano energia in questo modo sono le pale eoliche, ad asse sia verticale che orizzontale, e le turbine marine. Questi dispositivi sono normalmente utilizzati per la produzione di energia su larga scala, ma è comunque possibile fare un "descaling" per adattarli come Energy Harvester. In generale il costo è più elevato rispetto ad altri sistemi e necessitano di maggiore manutenzione.

I sistemi di Energy Harvesting che sfruttano il moto rettilineo alternato sono molto vari [5, 6, 7, 8], ma il principio di funzionamento di base è lo stesso. A titolo di esempio, si consideri lo schema illustrato nella figura 1.1. Il sistema

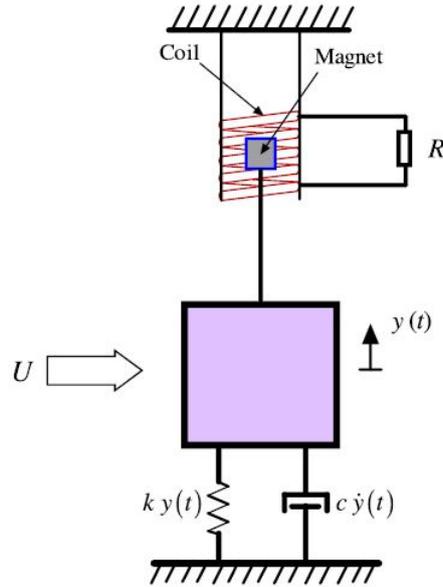


Figura 1.1: Modello utilizzato per energy harvesting da interazione fluido-struttura (*galloping*) [5]

meccanico è composto da un solido sul quale avviene l'interazione fluido-struttura, uno smorzatore, una molla e un magnete il cui moto è solidale a quello del solido. Il magnete si muove all'interno di una bobina, la quale è collegata tramite un circuito ad una resistenza elettrica.

Il movimento del fluido che investe il solido genera un moto oscillatorio verticale (o prevalentemente verticale). Il moto del magnete all'interno della bobina genera quindi una *f.e.m.* proporzionale alla velocità del sistema. Inoltre il sistema elettromagnetico assorbe energia meccanica dal sistema e quindi agisce da freno. È necessario fare in modo che la velocità del fluido sia tale per cui il sistema non risulti smorzato e quindi che tenda a fermarsi (condizione nella quale non produce energia) o che sia risonante e in tal caso si avrebbe un effetto distruttivo.

La maggiore differenza tra i dispositivi di questo tipo è il modo in cui vengono generate le forze sul solido. A seconda della forma dell'oggetto è possibile generare forze di portanza che imprimono il movimento verticale, ma altri sistemi sfruttano la spinta di galleggiamento o il moto ondoso presente negli oceani. In generale questi dispositivi ottengono una potenza relativamente piccola, hanno un costo basso e non necessitano di manutenzione quindi sono appropriati come sistemi di Energy Harvesting.

1.4 Reti WINS

Negli ultimi decenni i progressi dell'elettronica digitale sono stati caratterizzati non solo da un continuo aumento della potenza di calcolo, ma anche da una diminuzione dei consumi energetici [4]. Inoltre l'abbattimento del costo dell'elettronica ha reso economicamente fattibili le Wireless Integrated Sensor Networks (WINS), reti composte da una moltitudine di nodi atti alla misurazione e con la capacità di comunicare via etere tra loro e/o con una stazione centrale gerarchicamente superiore. Ogni dispositivo elettronico necessita di una fonte di energia che lo alimenti, e questo compito è stato storicamente svolto dalla rete elettrica o da batterie che richiedono una ricarica periodica. Quando si pensa però ad una rete di centinaia o migliaia di nodi dispersi in un ambiente difficile da raggiungere, si può comprendere come entrambe queste soluzioni diventino sia economicamente svantaggiose che fisicamente difficili da attuare. I sistemi di Energy Harvesting rappresentano un'ottima soluzione per l'alimentazione di queste reti in quanto sono compatti ed economici. Inoltre combinando più sistemi di Energy Harvesting, per esempio abbinando ad una microturbina eolica un pannello solare, si possono ottenere dei dispositivi che riescono a fornire costantemente l'apporto energetico necessario.

Le Wireless Integrated Network Sensors (WINS), conosciute anche con l'acronimo WSN, sono reti wireless densamente composte da piccoli nodi sensore a basso costo, che raccolgono e diffondono dati ambientali. Le WINS permettono il monitoraggio e il controllo di ambienti fisici da postazioni remote con una precisione migliore rispetto ad altri sistemi di monitoraggio noti, come il telerilevamento. Questi minuscoli snodi sfruttano l'idea di una rete di sensori basata sulla collaborazione di un gran numero di nodi, rappresentando però un miglioramento significativo rispetto ai tradizionali sensori. Un nodo gerarchicamente superiore raccoglie i dati ricevuti dai nodi vicini ed invia un pacchetto sintetizzato alla stazione base, evitando di inviare pacchetti individuali. Ciò garantisce di minimizzare la comunicazione, comportando un risparmio energetico. Così, i nodi-sensore collaborano insieme per raccogliere le informazioni desiderate dall'ambiente mediante una rete di elaborazione e aggregazione dati (diffusione dei dati).

Le applicazioni principali delle WINS spaziano dal monitoraggio ambientale alla mappatura della biodiversità fino all'utilizzo negli edifici intelligenti per verificare le condizioni termiche e igrometriche. Un campo di utilizzo in via di sviluppo, ma certamente degno di nota è l'utilizzo di queste reti nella gestione delle calamità. In caso di rischio di esondazione dei fiumi i sensori possono essere disposti lungo l'argine in modo da controllare il livello del corso d'acqua e segnalare immediatamente un'eventuale inondazione. In caso

di incendio boschivo opportuni nodi-sensore dotati di termometri e capaci di determinare la loro posizione reciproca vengono distribuiti in tutta l'area 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.

Capitolo 2

Oggetto e scopo

2.1 FLEHAP: Stato dell'arte

L'oggetto della presente Tesi consiste nella modellizzazione e studio del dispositivo FLEHAP, acronimo di “FLutter Energy Harvesting for Autonomous Power”, in sviluppo presso il Dipartimento di Fisica (DIFI) dell'Università di Genova con la collaborazione del Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale (DICCA) [9, 10, 11]. Tale sistema si basa sulle interazioni fluido-struttura ed in particolare sul fenomeno del flutter aeroelastico, come verrà delineato nei capitoli successivi.

L'elemento principale del dispositivo è un'ala in polivinil acetato il cui foil ha dimensioni di circa 0.1 mm di spessore (δ), corda (c) compresa tra i 20 ed i 40 mm e span (s) tra i 60 e 90 mm. I valori presentati di corda e span, entrambi compresi all'interno di un range ottimale, sono tra i principali parametri che sono stati studiati nelle diverse campagne sperimentali. In particolare lo studio di seguito presentato si basa sulla considerazione di un prototipo con $s = 70\text{mm}$, $c = 20\text{mm}$ e $\delta = 0.1\text{mm}$.

Il foil è fissato ad un supporto cilindrico in acido polilattico (elemento realizzato tramite stampante 3D) e anima in rame di 1 mm di diametro con lunghezza sempre superiore a quella di span (75 mm con span di 65 mm). La parte libera dell'asta cilindrica, data dalla differenza di lunghezza tra i due elementi, viene sfruttata per ancorare l'ala alle estremità degli elastomeri, a loro volta fissati ad appoggi fissi. Infatti è l'asta di rame ad ospitare l'asse rispetto alla quale il sistema possa effettuare una completa rotazione.

Lo span (s) e la corda (chord, c) rappresentano rispettivamente la larghezza e la lunghezza dell'ala da cui può essere definito l'aspect ratio ($A.R.$), parametro molto rilevante dal punto di vista fluidodinamico:

$$A.R. = \frac{s}{c} \quad (2.1)$$

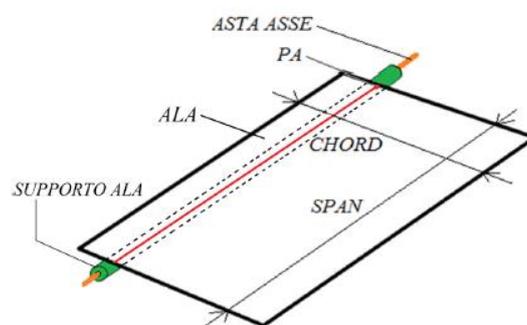


Figura 2.1: Rappresentazione schematica dell'ala e dei suoi parametri principali di riferimento (tratto da [12]).

Si definisce inoltre leading edge (LE) lo spigolo dell'ala colpita per prima dal vento e trailing edge (TE) lo spigolo opposto. Il punto di attacco P.A. è dato dalla distanza tra asse di rotazione e LE ($x_{a.r.}$) adimensionalizzata con la lunghezza di corda:

$$P.A. = \frac{x_{a.r.}}{c} \quad (2.2)$$

Molto spesso nella trattazione si farà riferimento al pivot point (PP) che corrisponde al centro dell'anima dell'asta di supporto, quindi posto ad una distanza dal LE pari a ($x_{a.r.}$).

2.1.1 Metodi di ancoraggio ala

In fase di studio sono state prese in considerazione due tipologie di ancoraggio dell'ala, presentate in figura 2.2.



Figura 2.2: Sistemi di ancoraggio degli elastomeri (tratto da [12])

La prima configurazione (Fig. 2.2a) sfrutta due soli elastomeri disposti, nella condizione di equilibrio (assenza di vento), parallelamente al cilindro

di supporto e collegati alle sue estremità. Questa tipologia di collegamento conferisce al cilindro due gradi di libertà, dal momento che la forza esercitata dagli elastomeri agisce essenzialmente nella sola direzione longitudinale rispetto alla span. Date le caratteristiche del moto, un accoppiamento di tipo elettromagnetico risulterebbe svantaggioso. Con questa configurazione si effettua quindi estrazione di energia tramite capacitori elastomerici, di cui si forniscono i dettagli nel paragrafo 2.1.2.

La seconda configurazione (Fig. 2.2b) sfrutta invece quattro elastomeri, disposti perpendicolarmente all'asta di supporto nella condizione di equilibrio. La conseguenza di un collegamento di questo tipo è la rimozione di un grado di libertà dal momento che il movimento orizzontale diventa irrilevante rispetto a quello verticale, come evidente dalle traiettorie presentate nel Capitolo 6. Questa condizione risulta molto vicina a quella ideale caratterizzata da un moto del cilindro di supporto di tipo oscillatorio armonico ed unidirezionale (verticale nel caso specifico). Viene pertanto utilizzata effettuando una estrazione di energia tramite accoppiamento elettromagnetico, di cui si forniscono i dettagli nel Capitolo 4.

2.1.2 Caratterizzazione degli elastomeri

Gli elastomeri utilizzati sono costituiti da materiale polimerico ed una loro caratterizzazione può essere effettuata tramite analisi con macchina di trazione, effettuando prove a velocità di deformazione costante. Si può quindi ottenere, analogamente a quanto si effettua per i materiali metallici, la curva di tensione-deformazione.

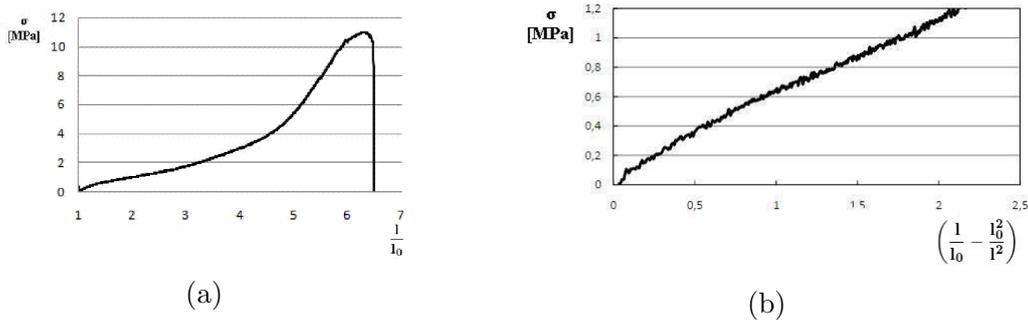


Figura 2.3: Comportamento degli elastomeri in prova di trazione (tratto da [12]).

Bisogna specificare che in tutte le condizioni di utilizzo del dispositivo si è sempre rimasti al di sotto di $\frac{l}{l_0} = 2$ e che si suppone il comportamento dell'elastomero indipendente dalla velocità di sollecitazione, ipotesi valida

nelle nostre condizioni di utilizzo. Risulta inoltre che l'andamento reale di σ sia molto prossimo a quello calcolabile teoricamente attraverso l'ipotesi di conservazione del volume in fase di deformazione. Da quest'ultima si ricava:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} = G \left(\frac{l}{l_0} - \frac{l_0^2}{l^2} \right) \quad (2.3)$$

dove l e l_0 sono rispettivamente la lunghezza variabile durante il moto e a riposo degli elastomeri. Gli stessi sono dislocati con un opportuno tensionamento tale che la lunghezza iniziale sia maggiore rispetto a quella di riposo (pari a un *prestretching* ϵ). Compaiono inoltre G , modulo elastico a taglio e A_0 , sezione a riposo dell'elastomero. Nella corrente Tesi i parametri elastomerici sono fissati come segue: $G = 5.34 \times 10^5 \text{Pa}$, $d = 1.2 \text{mm}$ (cosicché $A_0 = \pi d^2/4$), $l_0 = 4.73 \text{cm}$, $\epsilon = 1.9 \text{mm}$.

2.1.3 Metodi di conversione elettrica

In questa sezione viene descritto il sistema di accoppiamento elettromagnetico del dispositivo volto all'estrazione di energia elettrica.

Con l'avanzare della ricerca che è stata portata avanti su questo dispositivo sono state adottate diverse soluzioni per ottenere la più efficiente estrazione di energia elettrica dal Fluttering aeroelastico. Sostanzialmente possiamo evidenziare due principali modalità: l'utilizzo di capacitori elastomerici che assolvano sia una funzione di sostegno elastico sia di capacitori ed un accoppiamento elettromagnetico (EM) attraverso bobine e magneti permanenti.

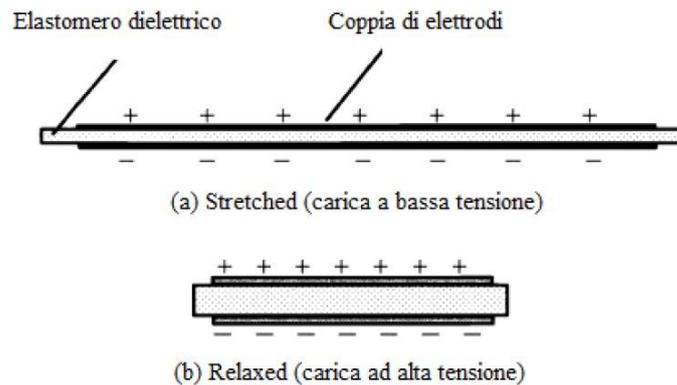


Figura 2.4: Meccanismo base di un capacitore elastomerico (tratto da [12]).

Capacitori elastomerici

Un capacitore elastomerico è un materiale composito che sfrutta le proprietà dielettriche ed elastiche di un elastomero e le proprietà elettriche di due conduttori i quali sono accoppiati ad esso per ottenere un capacitore. Viene quindi sfruttata la variazione di capacità che è conseguenza della variazione di spessore dell'elastomero provocata dal suo allungamento e accorciamento di cui il moto dell'ala ne è la causa. Si ottiene pertanto un potenziale ed una capacità elettrica così legata alle grandezze fisiche dell'elastomero:

$$\frac{\Delta E}{E} \approx \frac{\Delta C}{C} \approx \frac{\Delta L}{L} \quad (2.4)$$

dove ΔE è il campo elettrico prodotto dalla variazione della distanza tra le armature, ΔC la variazione della capacità, ΔL la variazione di lunghezza dell'elastomero rispetto ad L_0 , lunghezza a riposo del capacitore elastomerico.

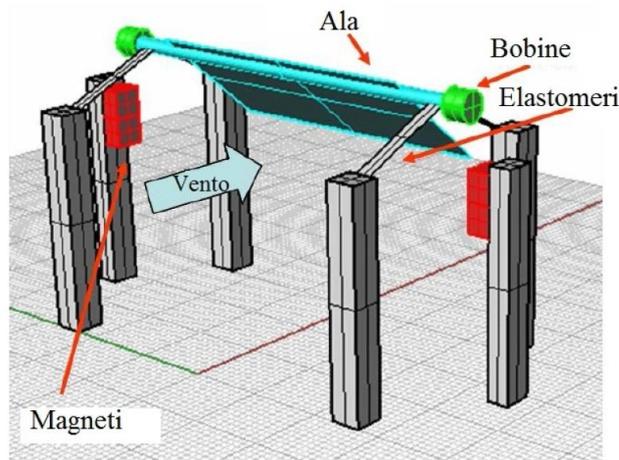


Figura 2.5: Rappresentazione grafica dell'accoppiamento EM (tratto da [12]).

Accoppiamento elettromagnetico

L'accoppiamento EM viene realizzato applicando due bobine alle estremità laterali dell'ala in corrispondenza del suo asse di rotazione (centrate nel pivot point (PP)) il quale percorre un moto oscillatorio armonico verticale. Possiamo ottenere una variazione di flusso magnetico all'interno della bobina inserendo dei magneti su opportuni supporti in corrispondenza del moto oscillatorio verticale del PP. In particolare si adotta la configurazione di

magneti a polarità alternate con lo scopo di sfruttare la legge di Faraday-Neumann-Lenz di cui in seguito si descrive la particolare applicazione al funzionamento del dispositivo (vedi par. 4.1). Una soluzione di questo tipo permette di ottenere in uscita una corrente alternata, direttamente correlata al moto del PP. Il picco massimo di tensione si ha quando le bobine passano a velocità massima sul bordo del magnete centrale mentre si ha valore nullo in corrispondenza dei magneti alle estremità, in cui si ha inversione del moto del PP.

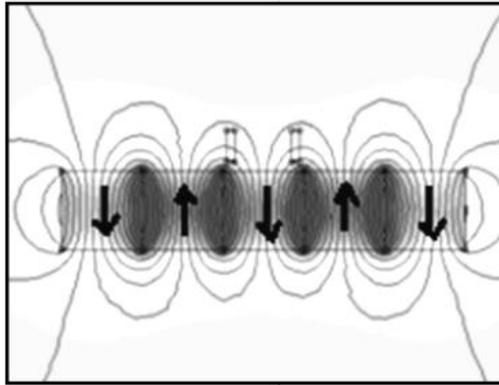


Figura 2.6: Disposizione dei magneti con polarità alternata (tratto da [12]).

I magneti utilizzati sono composti da $Nd_2Fe_{14}B$ con campo magnetico massimo nominale di 40 MGOe, e di dimensioni $10 \times 10 \times 4 \text{ mm}^3$ posti in modo da formare due colonne di 5 magneti ciascuna. Le bobine sono in rame, possiedono 500 avvolgimenti e un diametro di 4 mm e nella loro condizione di riposo, vale a dire in assenza di vento, risultano posizionate sul magnete centrale, vedendo quindi linee di forza del campo magnetico unidirezionali.

2.2 Scopo della presente Tesi

Il lavoro che sta al centro della presente Tesi prende le mosse dai risultati sperimentali, con lo scopo di fornire un modello di studio alternativo per poter prevedere le configurazioni potenzialmente ottimali del dispositivo. Nello specifico, il lavoro è stato incentrato sulla modalità di accoppiamento elettromagnetico e la relativa capacità di estrazione di energia elettrica.

Il modello utilizzato tratta il moto dell'ala attraverso la teoria dei corpi rigidi. Questa viene modellizzata come una piastra di dimensioni e peso

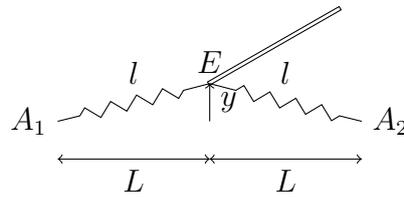


Figura 2.7: Schema che descrive il modello di ala adottato. Gli elastomeri sono rappresentati da una coppia di molle di lunghezza l ancorate sull'ala nel punto E e alla struttura portante nei punti A_1 e A_2

prefissati e descritta come un sistema bidimensionale, data la simmetria, rispetto allo span, con cui si manifesta la dinamica del sistema.

I risultati trovati dagli esperimenti effettuati sul prototipo sono stati confrontati con quelli ottenuti dal modello matematico in modo da garantire che il modello fenomenologico fornisse risultati plausibili con quelli reali. Successivamente è quindi stato possibile simulare con il calcolatore l'estrazione di energia elettrica in diverse condizioni. In particolare si è studiata l'estrazione al variare di parametri costruttivi come il coefficiente di accoppiamento elettromagnetico, che dipende dalla configurazione dei magneti, e anche l'effetto di variabili indipendenti dal sistema come la velocità del vento.

Tale studio ha quindi permesso di determinare il range di funzionamento del dispositivo FLEHAP e di tracciare una mappa prestazionale che determina le configurazioni che permettono il massimo output di potenza elettrica.

Capitolo 3

Cenni di aerodinamica e interazioni fluido-struttura

3.1 Forze aerodinamiche

Le forze aerodinamiche nascono dall'interazione tra il flusso e il profilo che viene investito da tale flusso, e dipendono dalla distribuzione di pressione (p) e lo sforzo tangenziale (τ) sulla superficie del corpo, entrambi dovuti alla presenza di un fluido che lambisce il profilo. Ambedue hanno come dimensioni una forza su unità d'area. La distribuzione di pressione ha come direzione di azione sempre la normale alla superficie in ogni punto, mentre lo sforzo tangenziale ha direzione tangenziale al corpo in ogni suo punto. Se si integrano queste grandezze su tutta la superficie del profilo, si ottiene una forza risultante (R), avente due componenti: portanza o *lift* (L) che è la componente perpendicolare alla velocità del flusso indisturbato, resistenza o *drag* (D) che è la componente parallela alla velocità del flusso indisturbato.

$$F_D = C_D \frac{\rho A U^2}{2} \quad (3.1)$$

$$F_L = C_L \frac{\rho A U^2}{2} \quad (3.2)$$

F_D = forza di Drag

F_L = forza di Lift

C_D = coefficiente di resistenza aerodinamica (Drag)

C_L = coefficiente di portanza (Lift)

ρ = densità del fluido

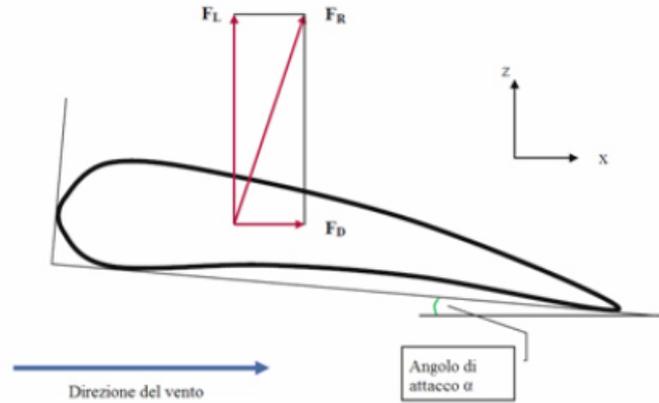


Figura 3.1: Forze agenti su un'ala investita da un flusso

A = superficie dell'ala

U = velocità del flusso imperturbato

Per quanto riguarda il dispositivo FLEHAP l'ala che viene considerata è una superficie piana di forma rettangolare e spessore trascurabile, chiamata *airfoil*. La forza generata dal vento risulta essere la pressione che esso esercita sulla superficie e può essere scomposta nella direzione ortogonale (lift) e parallela (drag) al flusso d'aria. La forza complessiva, essendo una pressione su una certa area, è ortogonale alla superficie stessa e in queste condizioni si ricavano dunque le seguenti relazioni:

$$F_D = F_R \cos(90 - \alpha) = F_R \sin(\alpha) \quad (3.3)$$

$$F_L = F_R \sin(90 - \alpha) = F_R \cos(\alpha) \quad (3.4)$$

Con le dovute semplificazioni, quali angolo di attacco piccolo, fluido incomprimibile e ala rigida, si può quindi esplicitare il seguente legame tra C_D e C_L

$$\frac{C_D}{C_L} = \tan(\alpha) \quad (3.5)$$

Tale legame risulta verificato anche sperimentalmente. Nell'immagine successiva sono presentati i valori di C_D e C_L calcolati sperimentalmente per un'ala al variare di α . Si noti che mentre il coefficiente di resistenza ha un andamento monotono crescente per valori positivi dell'angolo di attacco, il coefficiente di portanza ha un andamento a massimo per un valore di $\alpha \approx 20^\circ$. Oltre tale valore si verifica il fenomeno dello stallo aerodinamico e la

portanza diminuisce notevolmente. Tale fenomeno è voluto in dispositivi che sfruttano il moto rettilineo periodico dell'ala, mentre in altre applicazioni come l'aviazione civile la condizione di stallo deve essere assolutamente evitata in quanto comporta la caduta dell'aereo. Esistono tuttavia alcuni aerei militari che incorrono volontariamente nelle condizioni di stallo per manovre acrobatiche o per evitare armi balistiche. Tali veicoli sono di dimensioni ridotte rispetto agli aerei civili e sono equipaggiati con motori che permettono un rapido incremento della velocità, che determina un aumento della forza di portanza, riportando l'aereo nelle condizioni di volo stabile.

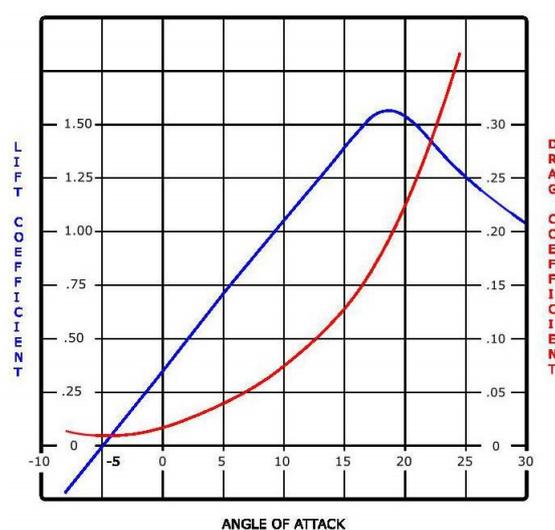


Figura 3.2: coefficienti di portanza e resistenza al variare dell'angolo di attacco

3.2 Flutter

L'aeroelasticità è lo studio della mutua interazione tra le forze inerziali, elastiche ed aerodinamiche agenti su di un corpo esposto ad una corrente fluida. Un fenomeno aerolastico molto comune e di indagine attuale in aerodinamica è il flutter. Si verifica quando il foil non è in grado di opporsi alla flessione o torsione dovuta a una corrente fluida che lo investe, facendo variare l'angolo di attacco della struttura con conseguente modifica delle forze aerodinamiche. Nel caso che lo smorzamento della struttura non risulti sufficientemente elevato, il flutter può diventare un fenomeno distruttivo se la deflessione del corpo e la forza esercitata dal fluido diventano in fase fra loro, facendo andare in risonanza la struttura. Un esempio di flutter distruttivo fu il crollo del

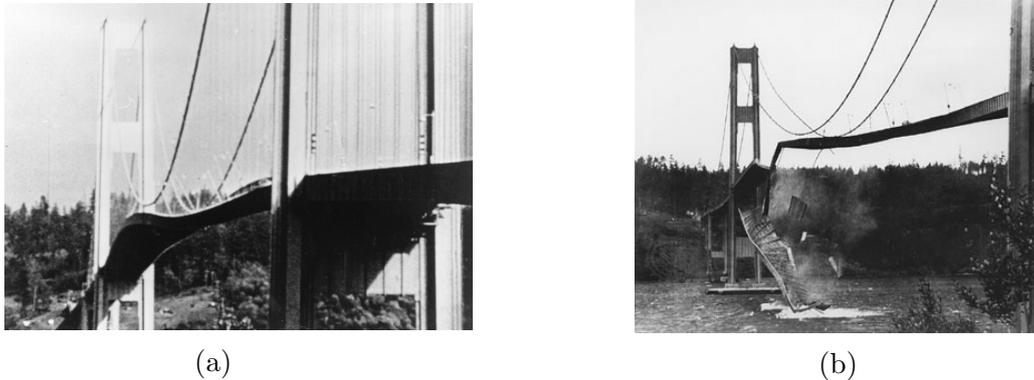


Figura 3.3: Oscillazione e crollo del ponte Tacoma nel 1940

ponte Tacoma Narrow nel 1940. L'incidente avvenne a causa delle vibrazioni aeroelastiche autoeccitate. La forza del vento influì sul moto della struttura che a sua volta modificò l'azione del flusso, causando deformazioni al ponte per torsione e flessione. Si raggiunsero condizioni tali che le oscillazioni divennero instabili e crescenti fino a portare alla distruzione del ponte.

Ci sono altri campi di interesse, come quello dell'Energy Harvesting, in cui il fenomeno è desiderato: l'instabilità induce in questo caso oscillazioni autosostenute e di ampiezza finita, con la conseguente possibilità di estrarre energia.

Quello che si osserva nel dispositivo FLEHAP è che sotto una certa intensità del vento l'ala resta ferma e parzialmente allineata con esso. Superata questa velocità critica, l'instabilità aeroelastica inizia a manifestarsi, con oscillazioni dapprima alla frequenza naturale, poi a frequenze maggiori con il crescere della velocità del vento. L'ala torna a fermarsi quando la velocità del vento supera una seconda velocità critica superiore, allineandosi con il vento.

Il fenomeno, comune a molti campi della fisica, è, come già accennato, quello della risonanza: il sistema viene perturbato da una forza esterna e si mette in moto quando questa ha la sua stessa frequenza. In questo caso tuttavia la frequenza della forza esterna è determinata dall'interazione con il corpo stesso. Un vento costante infatti non possiede una sua frequenza caratteristica, ma quando investe un corpo, di qualsiasi forma, genera forze aerodinamiche come descritto precedentemente che posso determinare un moto dell'ala, variando l'angolo di attacco e quindi modificando le forze stesse.

3.3 Quasi-stazionarietà

Nel caso generale, un problema di interazione fluido-struttura richiede la soluzione simultanea e pienamente accoppiata della dinamica del fluido e del solido, tipicamente affrontato tramite simulazioni numeriche onerose e di complessa implementazione. Tuttavia possono esserci alcune condizioni in cui sono lecite alcune approssimazioni. Se ad esempio i tempi caratteristici della struttura e del flusso sono fortemente differenti, l'accoppiamento risulterà *debole* e sarà possibile una soluzione approssimata di una sola componente.

Similmente, una possibile semplificazione è rappresentata dall'ipotesi di *quasi-stazionarietà*. In questo caso, si trascura la dipendenza dalla storia del sistema e da effetti di memoria, risolvendo nel tempo una successione di stati stazionari ed ipotizzando che le forze aerodinamiche che agiscono sulla struttura dipendano dal solo stato istantaneo. L'approccio del presente lavoro si basa su tale assunzione fondamentale. Si considera valida questa ipotesi dal momento che nelle condizioni trattate in questo studio non vi sono rilevanti interazioni tra le vorticità prodotte dal moto dell'ala e l'ala stessa.

Capitolo 4

Fenomeno elettromagnetico

In questo capitolo vengono descritti i principali fenomeni fisici su cui si basa l'estrazione di energia elettrica ed modello utilizzato per il relativo studio.

4.1 Legge di Faraday-Neumann-Lenz

La legge di Faraday-Neumann-Lenz, nella sua forma più generale, può essere riassunta dalla seguente equazione:

$$e(t) = - \frac{d\varphi_c}{dt} = - \frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot \vec{n} dS \quad (4.1)$$

ovvero ai capi di una spira soggetta ad una variazione del flusso del campo magnetico concatenato alla sua superficie S , viene indotta una forza elettromotrice $e(t)$ proporzionale all'intensità della variazione stessa. Il segno meno è significativo del fatto che la f.e.m. determina una corrente elettrica secondaria all'interno della spira il cui campo magnetico indotto sarà tale da opporsi a quello presente, andando quindi a limitare il flusso del campo magnetico complessivo e limitando in definitiva la sua variazione, quindi la f.e.m. prodotta. Questo aspetto è una evidente conseguenza del principio di conservazione dell'energia e sottolinea la necessità di una potenza esterna affinché la forza elettromotrice $e(t)$ possa essere sfruttata per l'estrazione di energia elettrica.

Contestualizzando l'applicazione di questo principio alla modalità di estrazione elettromagnetica del dispositivo, ai capi di ogni bobina si ottiene una forza elettromotrice così definita:

$$f.e.m. = N e(t) = -N \frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot \vec{n} dS \quad (4.2)$$

dovuta al fatto che si utilizzano bobine di N spire.

In questo contesto la potenza esterna che permette il mantenimento della *f.e.m.* è data dalle oscillazioni autosostenute dell'ala. Considerando il flusso del campo magnetico delle bobine (Φ), definito come $N\varphi_c$, si può evidenziare la sua dipendenza dalla posizione delle bobine, quindi del PP:

$$\Phi = f(x'_{PP}(t), y'_{PP}(t)) \quad (4.3)$$

Tuttavia, dal momento che nel moto del PP gli spostamenti in direzione orizzontale risultano trascurabili, si può evidenziare la sua sola dipendenza da y' :

$$\Phi = f(y'_{PP}(t)) \quad (4.4)$$

Un possibile modello semplificato, recentemente proposto da Dai *et al.* [5], assume che il gradiente del flusso magnetico concatenato sia costante nel tempo. In formule:

$$f.e.m. = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{\partial\Phi}{\partial t} \dot{y}_{PP} = C_{bl} \dot{y}_{PP} \quad (4.5)$$

dove è stata utilizzata la derivata di funzioni composte (4.4) ed introdotto il coefficiente di accoppiamento elettromagnetico C_{bl} . In virtù della corrente che si genera nel circuito, si manifesta sull'ala una forza che ostacola il moto (freno elettromagnetico), esprimibile in modulo come:

$$F^e = C_{bl} i \quad (4.6)$$

Si sottolinea che nel modello studiato è stato utilizzato un valore di C_{bl} costante e sempre di valore unitario, con eccezione dell'analisi prestazionale al variare del coefficiente di accoppiamento elettromagnetico.

L'entità della corrente dipende dal tipo di circuito realizzato ai capi delle bobine. Nello specifico si è considerato un circuito costituito da generatore di potenza e resistore (R) oppure generatore, resistore ed induttore (R-L).

4.2 Circuito R

La V_g della figura 4.1 rappresenta la *f.e.m.* sopra trattata, qui modellizzata con un generatore di tensione alternata. L'equazione che descrive il circuito è:

$$V_g = -\frac{d\Phi}{dt} = R_{eq} i \quad (4.7)$$

nella quale R_{eq} è dato dalla somma di R_i ed R ovvero la somma della resistenza interna costante e quella di un resistore, variabile dall'esterno, come nel caso di un reostato.

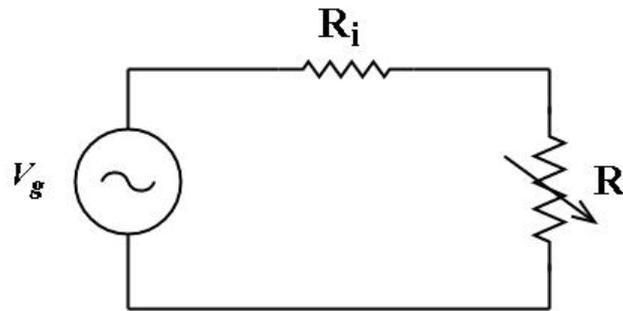


Figura 4.1: Schema del circuito del sistema con solo resistore

4.3 Circuito RL

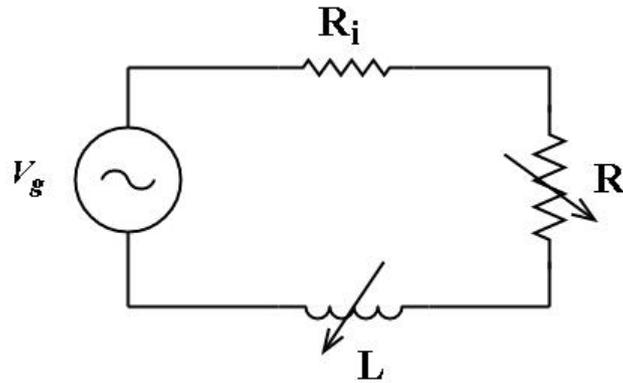


Figura 4.2: Schema del circuito del sistema con resistore ed induttore

Un modello alternativo e più accurato del precedente, prende in considerazione un circuito elettrico costituito da resistenza variabile (R), resistenza costante interna (R_i) ed induttanza variabile dall'esterno (L). Il circuito è descritto dalla seguente equazione:

$$V_g = R_{eq} i + L \frac{di}{dt} \quad (4.8)$$

la cui soluzione analitica che descrive la variazione della corrente tra un istante t ed il successivo $(t + dt)$ è:

$$i(t + dt) = i(t) e^{-\frac{R}{L} dt} + \frac{V_g(t)}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L} dt}) \quad (4.9)$$

La dinamica relativa alle forze che intervengono sulla spira rimane immutata, fatta eccezione per l'andamento di corrente e tensione che dipendono

ora dal tempo caratteristico $\tau = \frac{L}{R}$ del circuito. Nello studio di un sistema di questo tipo al variare di R o di L , risulta fondamentale valutare come varia τ dal momento che la corrente ha un andamento asintotico rispetto al valore $i_{max} = \frac{V_g}{R}$ di cui si raggiunge circa il 98% solo con $dt = 4\tau$, valutandolo con $i(t) = 0$.

Capitolo 5

Modello Fenomenologico

Al fine di descrivere matematicamente il moto dell'ala, è stato adottato e propriamente modificato un modello fenomenologico quasi stazionario originariamente sviluppato per lo studio di lastre in caduta da Andersen *et al* [13]. Tale modello è costituito da un sistema di equazioni differenziali ordinarie che governano la dinamica e la cinematica dell'ala.

Come anticipato, le ipotesi di base che vengono effettuate consistono nel valutare l'ala come un corpo rigido il cui volume è dato dall'estrusione, per una lunghezza pari allo span, del rettangolo di dimensioni $\delta \times c$. Questa considerazione permette inoltre di trattare la modalità di azione delle diverse forze in gioco attraverso un modello a parametri concentrati. Inoltre si considera il flusso di aria come un flusso costante e monodimensionale con direzione ortogonale rispetto all'asse di rotazione dell'ala, quindi del leading e del trailing edge, e rispetto alla traiettoria verticale dell'asta stessa. Infine si sottolinea l'assunzione di quasi stazionarietà, già descritta nella sezione 3.3

Poste queste premesse, la dinamica dell'ala viene studiata in un caso bidimensionale, in cui il corpo presenta tre soli gradi di libertà, due di traslazione ed uno di rotazione.

Sistema di riferimento

Alla base dell'impostazione delle equazioni del moto, vi è la definizione del sistema di riferimento utilizzato. Date le caratteristiche del moto studiato e fissato un sistema di riferimento assoluto, è risultato più agevole sfruttare un sistema di riferimento relativo che fosse co-rotante con l'ala rispetto al suo centro di massa, ma non co-traslante con esso. Di seguito verranno pertanto distinte le grandezze fisiche riferite al sistema relativo (x', y') e quello assoluto (x, y) rappresentati nella figura 5.1. Si può esplicitare il legame che vige tra

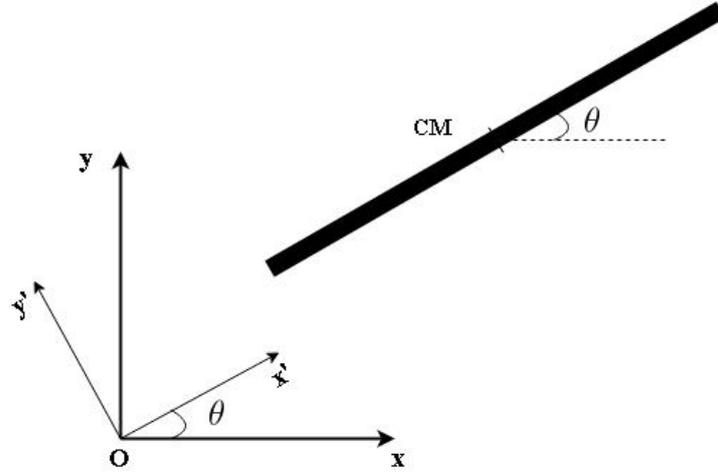


Figura 5.1: Rappresentazione del sistema di riferimento relativo (x', y') co-rotante con l'ala nella rotazione intorno al centro di massa (CM), e sistema di riferimento assoluto (x, y)

i due sistemi di riferimento:

$$x' = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (5.1)$$

$$y' = y \cos \theta - x \sin \theta \quad (5.2)$$

È da notare che il sistema di riferimento definito è centrato nel centro di massa, di conseguenza tutte le variabili usate descrivono il solo moto di un punto collocato nel centro di massa.

Tuttavia, dal momento che l'estrazione di energia è totalmente incentrata sul moto di plunge del pivot point (PP), si esplicita la componente della velocità del PP rispetto all'asse delle ordinate del sistema assoluto:

$$v_y^{PP} = v_y - \omega d \cos \theta \quad (5.3)$$

in cui d rappresenta la distanza tra CM e PP e in cui compare la componente verticale della velocità assoluta del centro di massa:

$$v_y = v_{x'} \sin \theta + v_{y'} \cos \theta \quad (5.4)$$

5.1 Modello in assenza di estrazione

Il modello più semplice che viene realizzato, punto di partenza per lo studio dell'estrazione di energia, si pone l'obiettivo di descrivere il moto della sola ala, valutando come forze esterne la gravità, la forza di resistenza, di

portanza e la forza elastica degli elastomeri. Dalla sovrapposizione dei vettori relativi ad ogni forza, scomposti nelle rispettive componenti del sistema relativo otteniamo le tre equazioni:

$$(I_G + I_a) \ddot{\theta} = (m_{11} - m_{22}) v_{x'} v_{y'} + \tau^{el} - \tau^\nu + \tau^\Gamma \quad (5.5)$$

$$(m + m_{11}) \ddot{x}' = (m + m_{22}) \dot{\theta} v_{y'} - F_{x'}^{el,a} - F_{x'}^{el,b} + L_{x'} - F_{x'}^\nu - F_{x'}^g \quad (5.6)$$

$$(m + m_{22}) \ddot{y}' = -(m + m_{11}) \dot{\theta} v_{x'} - F_{y'}^{el,a} - F_{y'}^{el,b} + L_{y'} - F_{y'}^\nu - F_{y'}^g \quad (5.7)$$

Compaiono I_G ed m rispettivamente momento di inerzia baricentrico e massa dell'ala, I_a , m_{11} ed m_{22} rispettivamente momento di inerzia aggiunto e masse aggiunte dipendenti dalle dimensioni dell'ala, $v_{x'}$ e $v_{y'}$ componenti della velocità del centro di massa. Tra le forze: $F_{x'}^{el,a}$ ed $F_{x'}^{el,b}$ componenti della forza esercitata dagli elastomeri posti davanti e dietro l'ala, $L_{x'}$ ed $L_{y'}$ proiezioni della forza di lift, $F_{x'}^\nu$ e $F_{y'}^\nu$ componenti della forza di drag ed infine $F_{x'}^g$ e $F_{y'}^g$ componenti della forza di gravità. Tra i momenti: τ^{el} determinato dagli elastomeri, τ^ν determinato dalle forze di natura viscosa, τ^Γ associato alla forza di lift. Le tre seguenti componenti derivano invece dall'adozione di un sistema di riferimento co-rotante ma non co-traslante col centro di massa: $(m_{11} - m_{22}) v_{x'} v_{y'}$, $(m + m_{22}) \dot{\theta} v_{y'}$, $(m + m_{11}) \dot{\theta} v_{x'}$. Si tralascia il procedimento di proiezione delle forze agenti sull'ala e si rimanda alla sezione sul fenomeno aerodinamico (3) per i dettagli sulle forze di lift, di drag e degli elastomeri.

Dal momento che viene utilizzato un metodo risolutivo che permette la risoluzione di equazioni di primo ordine (metodo di Adams-Bashfort, spiegato dettagliatamente in Appendice A), si definiscono le equazioni tratte dalla meccanica razionale che determinano la derivata temporale della posizione del centro di massa nel sistema co-rotante:

$$\dot{x}' = v_{x'} + \omega y' \quad (5.8)$$

$$\dot{y}' = v_{y'} - \omega x' \quad (5.9)$$

$$\dot{\theta} = \omega \quad (5.10)$$

La presenza all'interno di queste equazioni della velocità angolare ($\omega = \dot{\theta}$) non deve stupire, in quanto associata alla particolare definizione del sistema di riferimento relativo.

Massa ed inerzia aggiunta

I termini m ed I_G sono stati utilizzati per definire la massa ed il momento di inerzia baricentrico propri dell'ala. La loro espressione teorica, calcolata per

un parallelepipedo di dimensioni $c \times s \times \delta$ di densità ρ_a immerso in un fluido di densità ρ_s , considerata l'influenza della forza di galleggiamento, sarebbe:

$$m^{th} = (\rho_a - \rho_f) c s \delta \quad (5.11)$$

$$I_G^{th} = \rho_a c s \delta \left(\frac{c^2 + s^2}{12} + e^2 \right) \quad (5.12)$$

dove e è la distanza tra centro geometrico e baricentro dell'ala. Tuttavia, dal momento che la geometria dell'ala risulta più complessa di un solido elementare e dal momento che la maggior parte degli studi condotti sono stati di natura sperimentale, nel modello si è direttamente fatto riferimento alle masse dei singoli componenti, misurate su prototipo per indagini sperimentali:

$$m = m_{foil} + m_{asta} + m_{cong} + m_{add} \quad (5.13)$$

di cui $m_{foil} = 0.185 \text{ g}$, $m_{asta} = 0.38 \text{ g}$, $m_{cong} = 0.07 \text{ g}$ (del materiale di connessione foil-asta), $m_{add} = 0.21 \text{ g}$ (del materiale adesivo per spostare il centro di massa).

Di conseguenza il momento di inerzia baricentrico diventa:

$$I_G = I_G^{th} + m_{asta} (x_{asta} - x_{CM})^2 + m_{add} (x_{add} - x_{CM})^2 \quad (5.14)$$

dove x_{CM} rappresenta la posizione del centro di massa, x_{asta} e x_{add} dell'asta e del materiale aggiunto, rispetto al pivot point (PP).

Con i termini m_{11} , m_{22} , I_a si fa riferimento alla massa ed all'inerzia aggiunta, legate alla presenza del fluido viscoso intorno al corpo. Esse vengono considerate dal momento che l'ala in accelerazione o decelerazione deve spostare una certa quantità di volume del fluido in cui è immersa. Maggiore è la differenza tra le due densità, minore è l'effetto determinato dalla massa aggiunta. Esso è generalmente trascurabile rispetto alla forza di resistenza ed alle altre forze fluidodinamiche in gioco. Nel nostro caso in particolare la massa aggiunta lungo x' è ulteriormente poco rilevante perchè il volume di fluido spostato è molto minore rispetto a quello dovuto al moto lungo y' : le due superfici infatti sono molto differenti. Analogamente si definisce un'inerzia aggiunta I_a tale da prendere in considerazione l'effetto del fluido circostante sulla rotazione dell'ala. Questa viene sommata al momento di inerzia baricentrico I_G :

$$m_{11} = \frac{3\pi}{8} \rho_f s^2 b \quad (5.15)$$

$$m_{22} = \frac{3\pi}{8} \rho_f c^2 b \quad (5.16)$$

$$I_a = \frac{5\pi}{256} \rho_f (c^2 - s^2)^2 \quad (5.17)$$

con $\delta = 0.1 \text{ mm}$ spessore, $c = 20 \text{ mm}$ corda e $s = 70 \text{ mm}$ lunghezza di span dell'ala. Queste definizioni sono state utilizzate in letteratura per stimare i coefficienti di massa aggiunta di un parallelepipedo e ottenuti dalla media dei coefficienti di due cilindri ellittici con sezione inscritta e circoscritta al rettangolo di base.

La circolazione Γ , la forza viscosa \mathbf{F}^ν e la coppia viscosa τ^ν sono espresse attraverso una relazione semi-empirica che fa uso di alcuni coefficienti liberi [13]:

$$\Gamma = -C_T c \frac{\tilde{v}_{x'} \tilde{v}_{y'}}{\sqrt{\tilde{v}_{x'}^2 + \tilde{v}_{y'}^2}} + \frac{1}{2} C_R c^2 \dot{\theta} \quad (5.18)$$

$$\mathbf{F}^\nu = \frac{1}{2} \rho_f c \left[C_D(0) \tilde{v}_{x'}^2 + C_D(\pi/2) \tilde{v}_{y'}^2 \right] \frac{\sqrt{\tilde{v}_{x'}^2 + \tilde{v}_{y'}^2}}{\tilde{v}_{x'}^2 + \tilde{v}_{y'}^2} (\tilde{v}_{x'}, \tilde{v}_{y'}) \quad (5.19)$$

$$\tau^\nu = C_\tau \rho_f \dot{\theta} \left(\frac{|\tilde{v}_{y'}| c^3}{24} + \frac{|\dot{\theta}| c^4}{64} \right) \quad (5.20)$$

dove C_T e C_R sono associati rispettivamente alla traslazione ed alla rotazione, $C_D(0)$ e $C_D(\pi/2)$ sono rappresentativi di coefficienti di resistenza e C_τ è associato.

I valori dei coefficienti scelti sono stati determinati attraverso un procedimento di adattamento per far sì che la traiettoria ottenuta dal modello coincidesse il più possibile con quella misurata sperimentalmente: $C_T = 2.1$, $C_R = 1.5$, $C_D(0) = 0.1$, $C_D(\pi/2) = 8$ e $C_\tau = 8.25$.

5.2 Modello con smorzamento viscoso

Di seguito si descrive un primo modello di studio degli effetti sull'ala conseguenti l'estrazione di energia. Come già effettuato in altri studi relativi all'energy harvesting, è possibile approssimare l'effetto di freno sul dispositivo ad un'azione di tipo meccanico. In particolare si può adottare uno smorzatore viscoso che dissipi un quantitativo di energia paragonabile a quello che sarebbe ottenuto dall'estrazione elettromagnetica ed eserciti una forza sul corpo corrispondente alla forza frenante dovuta all'induzione di un campo magnetico secondario.

Prendendo in considerazione le equazioni 4.5 e 4.6 e tenendo presente la legge di Ohm in un circuito privo di induttanza, si ottiene una forza associata al freno elettromagnetico pari a:

$$F = \frac{C_{bl}^2}{R} \dot{y}_{PP} \quad (5.21)$$

Dal momento che tutti i parametri in gioco, ad eccezione della velocità \dot{y}_{PP} sono costanti durante il modo dell'ala (al più vi è una variazione anche di R , ma tramite controllo esterno e non continuo), è l'espressione stessa a suggerire la compatibilità del modello con l'adozione di uno smorzatore viscoso ideale (damping) la cui caratteristica esterna è:

$$F = D \dot{y}_{PP} \quad (5.22)$$

dove D in questo caso assume il valore di $\frac{C_{bl}^2}{R}$ e viene denominato coefficiente di damping. Attraverso una trattazione di questo tipo diventa possibile valutare efficacemente la forza che interviene sull'ala e l'energia estraibile dal moto dell'ala. Ne consegue una modifica delle equazioni che descrivono il modello, attraverso l'introduzione nel membro di destra delle equazioni 5.5, 5.6, 5.7 dei tre seguenti componenti:

$$M^D = -D e \dot{y}_{PP} \cos(\theta) \quad (5.23)$$

$$F_{x'}^D = -D \dot{y}_{PP} \sin(\theta) \quad (5.24)$$

$$F_{y'}^D = -D \dot{y}_{PP} \cos(\theta) \quad (5.25)$$

dove nuovamente con e si definisce la distanza tra pivot point e centro di massa. Si sottolinea che la velocità presente è quella del pivot point dal momento che il freno elettromagnetico si manifesta in prossimità delle bobine centrate appunto nel PP

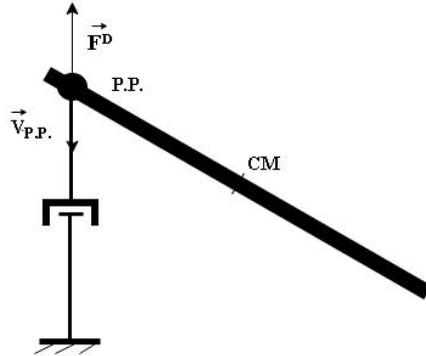


Figura 5.2: Schema descrittivo del modello di smorzamento viscoso applicato all'ala. Viene messa in evidenza l'opposizione dei versi del vettore velocità di PP e del vettore forza di smorzamento

5.3 Modello con estrazione elettromagnetica

Affinchè il dispositivo estragga energia è necessario che sia abbinato ad un circuito elettrico. Il modello con estrazione elettromagnetica prevede quindi che l'ala si comporti da generatore di tensione. Questo modello differisce dal modello precedente in quanto lo smorzatore viene sostituito da circuito elettrico, che genera un freno elettromagnetico sull'ala, la cui entità è stata precedentemente quantificata dall'equazione 4.6.

La *f.e.m.* generata dall'ala in un determinato istante dipende da C_{bl} e da \dot{y}_{PP} . C_{bl} è un parametro fisso che dipende dai magneti e che viene definito in fase di costruzione del dispositivo. Quindi si può affermare che ci sia un rapporto di proporzionalità diretta tra la velocità dell'ala e la *f.e.m.* generata.

Sono state modellizzate due tipologie di circuito, una con un solo carico resistivo e l'altra sia con il carico resistivo che con l'induttanza. La tipologia di circuito influenza non solo l'estrazione di energia, ma anche il moto dell'ala in quanto varia l'effetto di freno che la parte elettrica genera.

La forza in gioco, già anticipata precedentemente, è:

$$F_{freno} = F^e = C_{bl} i \quad (5.26)$$

la quale viene quindi aggiunta nel membro di destra delle equazioni 5.5, 5.6 e 5.7 al posto della forza di smorzamento sopra illustrata (5.23,5.24,5.25) nelle tre componenti:

$$F_{x'}^e = -C_{bl} i \sin \theta \quad (5.27)$$

$$F_{y'}^e = -C_{bl} i \cos \theta \quad (5.28)$$

$$M^e = -C_{bl} i e \quad (5.29)$$

dove nuovamente con e si definisce la distanza tra pivot point e centro di massa.

Per quanto riguarda la possibilità di variare C_{bl} vale il discorso precedente, quindi risulta corretto affermare che la corrente e il freno elettromagnetico siano direttamente proporzionali. Inoltre all'aumentare di i , cresce anche la potenza elettrica, ovvero aumenta la potenza che viene estratta dall'ala per effetto elettromagnetico. Risulta quindi coerente che all'aumentare della corrente aumenti la forza frenante sul sistema, in quanto viene assorbita più potenza da quest'ultimo.

5.3.1 Presenza di sola R

Il modello con estrazione elettromagnetica più semplice considera la presenza di una sola resistenza che comprende la resistenza intrinseca del cavo (R_i) più il carico resistivo collegato al circuito. Essendo $R \gg R_i$ possiamo scrivere, commettendo una piccola approssimazione, $R_{eq} \approx R$.

Nel caso in cui $R \rightarrow +\infty$, il valore della corrente tende a 0 e quindi il circuito risulta essere un circuito aperto. In questo caso non vi è estrazione elettrica e la trattazione è analoga al caso descritto al paragrafo 5.1.

Nel caso in cui $R \rightarrow 0$, il valore della corrente tende a ∞ e di conseguenza la forza frenante tende a ∞ . Questa condizione corrisponde al cortocircuito, ma non è una condizione operativa dell'ala. Al contrario, la condizione di carico resistivo di valore elevato permette ugualmente il corretto funzionamento del dispositivo. L'equazione che lega corrente, resistenza e *f.e.m.* in un circuito di questo tipo è la legge di Ohm, già discussa al paragrafo 4.2, che viene richiamata qui di seguito:

$$V = iR \quad (5.30)$$

5.3.2 Presenza di R-L

Infine si considera il modello con circuito elettrico costituito da resistore più induttore, come presentato nei capitolo 4. La presenza dell'induttanza comporta la necessità di risolvere l'equazione differenziale 4.8 che descrive il circuito. Come anticipato, da essa si ricava l'equazione analitica della corrente, che viene richiamata qui di seguito:

$$i(t + dt) = i(t) e^{-\frac{R}{L} dt} + \frac{V_g(t)}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L} dt}) \quad (5.31)$$

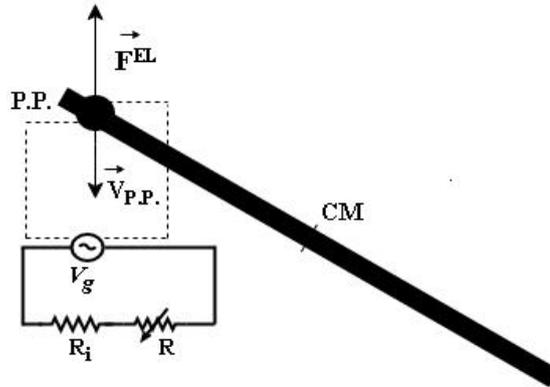


Figura 5.3: Rappresentazione schematica dell'ala in cui i capi delle bobine fissate sull'ala costituiscono il generatore di tensione ideale (V_g) di un circuito elettrico con R_i resistenza interna ed R di un dispositivo a resistenza variabile dall'esterno. Il vettore F^{EL} rappresenta la forza di freno elettromagnetico agente nel PP

È questa l'unica differenza rispetto al circuito con sola R a livello di soluzione delle equazioni che permettono di studiare il sistema.

5.4 Quantità valutate

In questa sezione vengono introdotte le quantità che sono state valutate tramite il modello descritto nei paragrafi precedenti.

5.4.1 Dati prototipo studiato

Caso senza estrazione: sono stati valutati, tramite l'ausilio del calcolatore, il rendimento e la potenza, definiti come segue:

$$\eta_{Betz} = \frac{P_{plunge}}{P_{fluido}} \quad (5.32)$$

Il rendimento così calcolato è un rendimento istantaneo, in quanto sia P_{plunge} che P_{fluido} variano istante per istante. Tale rendimento ha però poco senso ingegneristico e per questo motivo si è valutato un rendimento medio definito come la media dei rendimenti istantanei su un ciclo completo dell'ala. Nel caso senza estrazione di energia, tale rendimento è anche il rendimento globale del sistema.

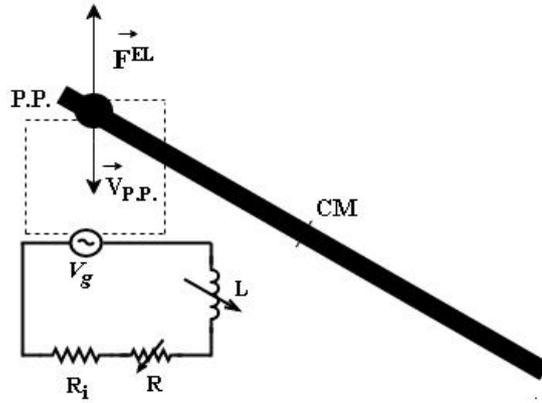


Figura 5.4: Rappresentazione schematica dell'ala in cui i capi delle bobine fissate sull'ala costituiscono il generatore di tensione ideale (V_g) di un circuito elettrico con R_i resistenza interna ed R di un dispositivo a resistenza variabile ed induttanza variabile controllata dall'esterno. Il vettore F^{EL} rappresenta la forza di freno elettromagnetico agente nel PP

$$P_{plunge} = F_L v_{PP} \quad (5.33)$$

$$P_{fluido} = \frac{1}{2} \rho_f A U_{inf}^3 \frac{d}{c} \quad (5.34)$$

ρ = densità del fluido

A = area dell'ala

d = la maggiore tra ampiezza dell'oscillazione del pivot point e del trailing edge

c = corda dell'ala

U_{inf} velocità del fluido indisturbato

Modello con smorzamento viscoso: sono stati valutati, tramite l'ausilio del calcolatore, il rendimento e la potenza, definiti come segue:

$$\eta_{damping} = \frac{P_{meccanica}}{P_{plunge}} \quad (5.35)$$

$$\eta_{globale} = \eta_{Betz} \eta_{damping} \quad (5.36)$$

$$P_{meccanica} = D v_{PP}^2 \quad (5.37)$$

Modello con estrazione elettromagnetica sono state valutate le seguenti quantità:

$$\eta_{elettromagnetico} = \frac{P_{elettrica}}{P_{plunge}} \quad (5.38)$$

Per brevità nelle equazioni successive il rendimento elettrico verrà abbreviato come η_{em}

$$P_{elettrica} = Ri^2 \quad (5.39)$$

$$\eta_{globale} = \eta_{em}\eta_{Betz} \quad (5.40)$$

Capitolo 6

Risultati

All'interno di questo capitolo vengono presentati i risultati ottenuti in riferimento alle traiettorie dei principali punti del dispositivo, alle potenze ed ai diversi rendimenti associati all'estrazione di energia. Vengono considerate separatamente le quattro configurazioni presentate nel capitolo precedente, le quali sono state analizzate al variare dei principali parametri che possono influenzare le prestazioni del dispositivo.

6.1 Modello in assenza di estrazione

6.1.1 Potenza e Rendimento di Betz

La figura 6.1 riporta le variazioni che subiscono la potenza di Betz, di plunge ed il rendimento ad esse correlato, al variare della velocità del flusso. Viene esaminato il range di velocità 3-5[m/s] con step di 0.5[m/s] che viene utilizzato per lo studio in tutte le successive casistiche.

L'elemento più evidente è la differenza tra l'ordine di grandezza delle due potenze, definite dalle 5.33 e 5.34. Tale aspetto è legato a due fattori. Il primo riguarda le caratteristiche del moto dell'ala, costituito sia da plunge che da pitch, per cui il quantitativo di energia captato dal dispositivo viene distribuito nella realizzazione dei due moti. Il secondo è legato invece al non sfruttamento di tutta l'energia cinetica captata da parte dell'ala, dal momento che il fluido a valle conserva una certa percentuale di energia cinetica.

Inoltre, come possiamo aspettarci, entrambe le curve hanno un andamento monotono crescente all'aumentare della velocità. Infatti, la potenza di Betz è proporzionale al cubo della velocità del flusso ed è ragionevole

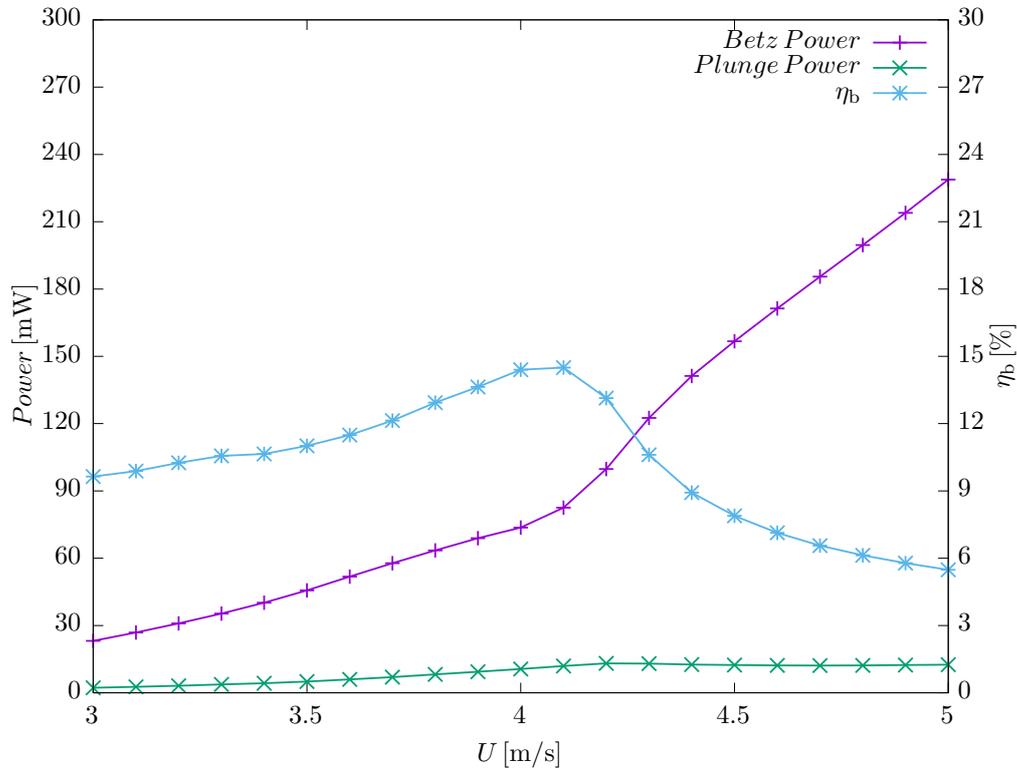


Figura 6.1: Grafico qualitativo che descrive l'andamento della potenza di plunge, della potenza di Betz e del rendimento di Betz, ottenuto dal loro rapporto

pensare che l'ala possa captare più energia incrementando così l'energia che interessa il fenomeno di plunge.

Per quanto riguarda invece il rendimento di Betz, definito dalla 5.32 questo presenta un andamento a massimo in corrispondenza di $U \approx 4$ [m/s] in cui assume il valore del 15%. Per velocità inferiori esso è crescente dal momento che la potenza di plunge presenta un incremento maggiore rispetto quella di Betz. Al contrario, per velocità superiori, la variazione della potenza di Betz assume un'inclinazione notevolmente maggiore, al contrario della potenza di plunge: il rendimento decresce notevolmente fino ad un valore prossimo al 6%.

Nelle sezioni successive la potenza ed il rendimento di Betz verranno spesso trascurati dal momento che, al di là di essere utilizzati per valutare il rendimento globale, forniscono informazioni esclusivamente legate al quantitativo di energia captata dal dispositivo, indipendentemente dalla possibilità di effettuare estrazione di energia elettrica.

6.1.2 Traiettorie di Leading e Trailing Edge

La figura 6.2 riporta le traiettorie del Leading Edge (LE) e del Trailing Edge (TE), studiate al variare della velocità imposta al fluido. Le curve delineate hanno caratteristiche molto differenti in quanto il LE segue un moto armonico verticale ed il TE assume una traiettoria a *lemniscata* (a forma di 8). Nella prima figura, la posizione media del LE è spostata verso il basso e la curva presenta una notevole asimmetria verticale dovuta all'effetto della forza di gravità. In tutte le altre invece, si riscontra una notevole simmetria nelle due direzioni, indicativo della trascurabilità della forza di gravità rispetto alle forze aerodinamiche in gioco.

Riguardo al LE si ha un moto pressoché esclusivamente rettilineo verticale di ampiezza variabile con la velocità. Possiamo distinguere due condizioni: velocità inferiore ai 4.0[m/s] o superiore ad essa. Nel primo caso si riscontra che l'ampiezza coperta dalle oscillazioni del LE risulta maggiore della dimensione massima della curva descritta dal TE. Complessivamente, rispetto alla velocità di 3.0[m/s], si ha un incremento di entrambe le dimensioni, ma tale condizione continua ad essere rispettata. Per velocità superiori ai 4.0[m/s] la differenza tra le ampiezze è ancora più evidente, ma con caratteristiche opposte, per cui la dimensione massima della traiettoria del LE è notevolmente ridotta rispetto al TE.

La transizione da una condizione all'altra è uno degli oggetti di recenti studi sperimentali al fine di determinare quali siano i principali parametri di influenza.

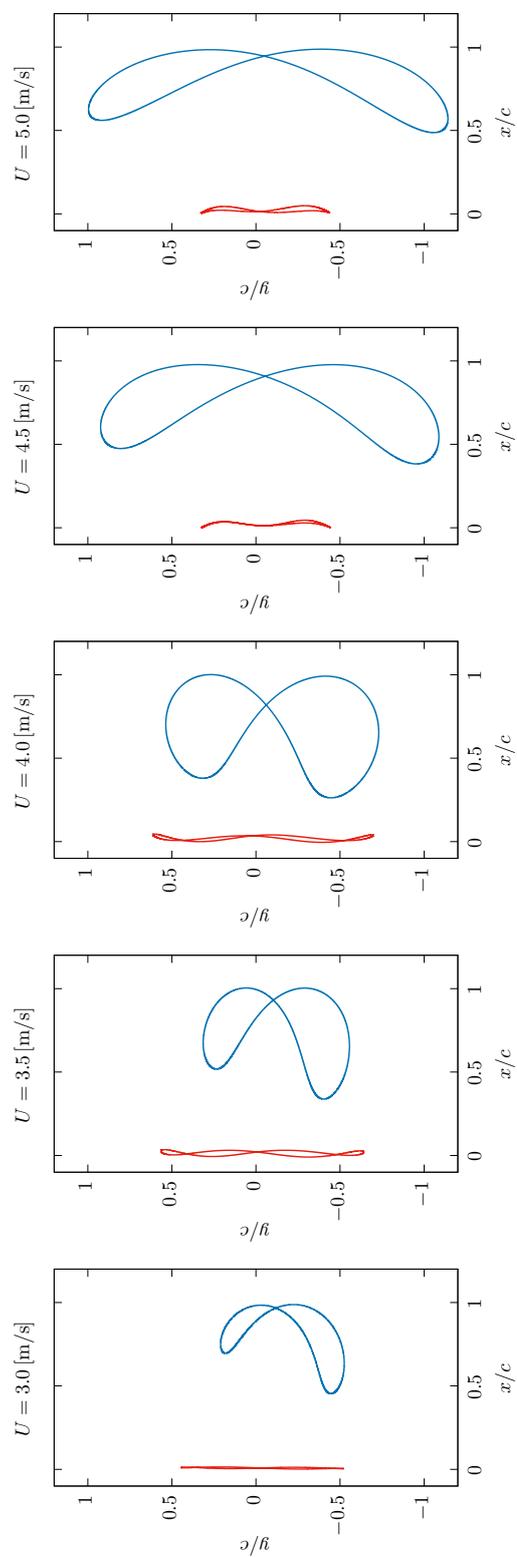


Figura 6.2: Traiettorie di Leading Edge (rosso) e Trailing Edge (blu) nel caso di assenza di estrazione di energia

6.2 Estrazione meccanica: smorzamento viscoso

6.2.1 Potenza e Rendimento

La figura 6.3 riporta l'andamento della potenza meccanica che viene dissipata dallo smorzatore viscoso in funzione del suo coefficiente caratteristico (D) e della velocità del fluido che investe il dispositivo. I valori presentati sono

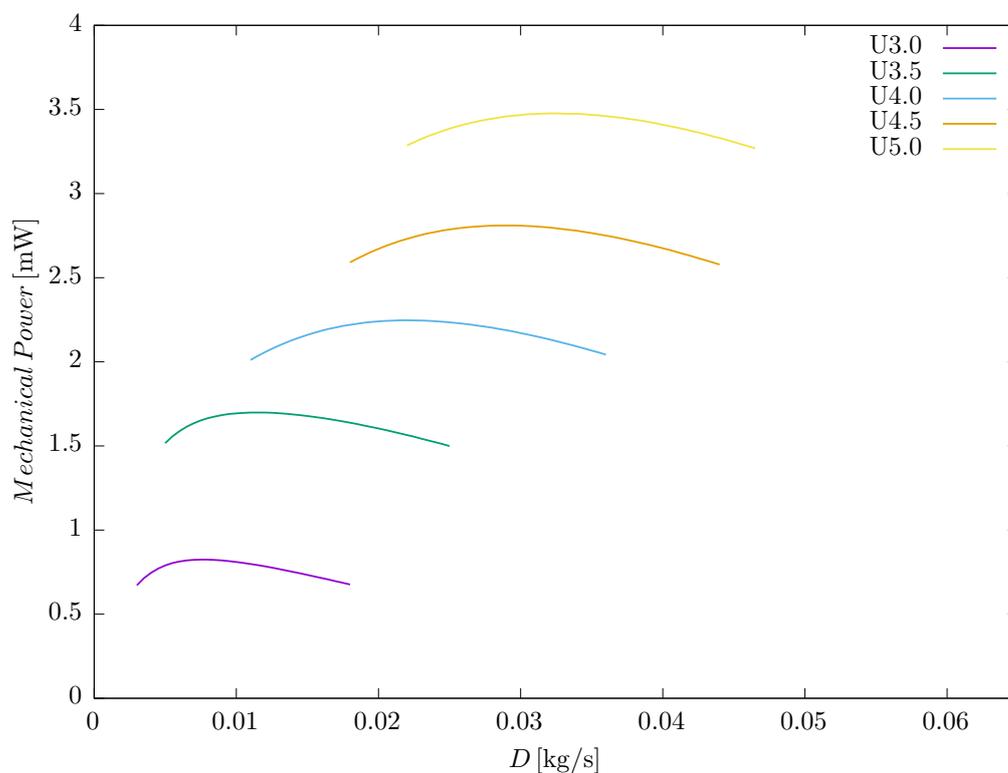


Figura 6.3: Potenza estratta al variare del coefficiente di smorzamento (D) e della velocità del fluido

stati ricavati facendo riferimento alla definizione 5.37 della potenza dissipata. Come si può vedere, tutte le curve presentano un andamento a massimo di cui è stato ritenuto più significativo rappresentare solo un piccolo intorno. Per coefficienti prossimi allo zero non si avrebbero altro che valori infinitesimi della potenza di output, mentre per valori molto alti di D si andrebbe a massimizzare la forza di opposizione al moto del PP, che porta ad una progressiva riduzione ed annullamento del plunging, quindi nuovamente ad una potenza di output prossima a zero.

Da una visione globale del grafico si nota che, al crescere della velocità, si ha uno spostamento dei massimi verso valori di D più grandi. Si ha pertanto uno spettro di energia meccanica, valutata in corrispondenza dei massimi che va da $P \approx 0.8[mW]$ a $P \approx 3.5[mW]$.

Si può infine notare una differenza abbastanza sostanziale nella distribuzione della potenza tra velocità inferiori e superiori a $4.0[m/s]$, correlabili alle due diverse condizioni già discusse in riferimento alle tipologie di traiettoria di LE e TE nel caso senza estrazione. Nella prima condizione si hanno infatti variazioni più marcate della potenza al variare di D , dovute ad una pendenza maggiore della curva. Al contrario al di sopra dei $4.0[m/s]$ le variazioni in prossimità del massimo sono piuttosto limitate.

Per quanto riguarda il rendimento meccanico del sistema, si riscontra un evidente andamento crescente per ciascuna velocità e all'aumentare di D , che tende a valori prossimi al 55-60%, come mostra la figura 6.4.

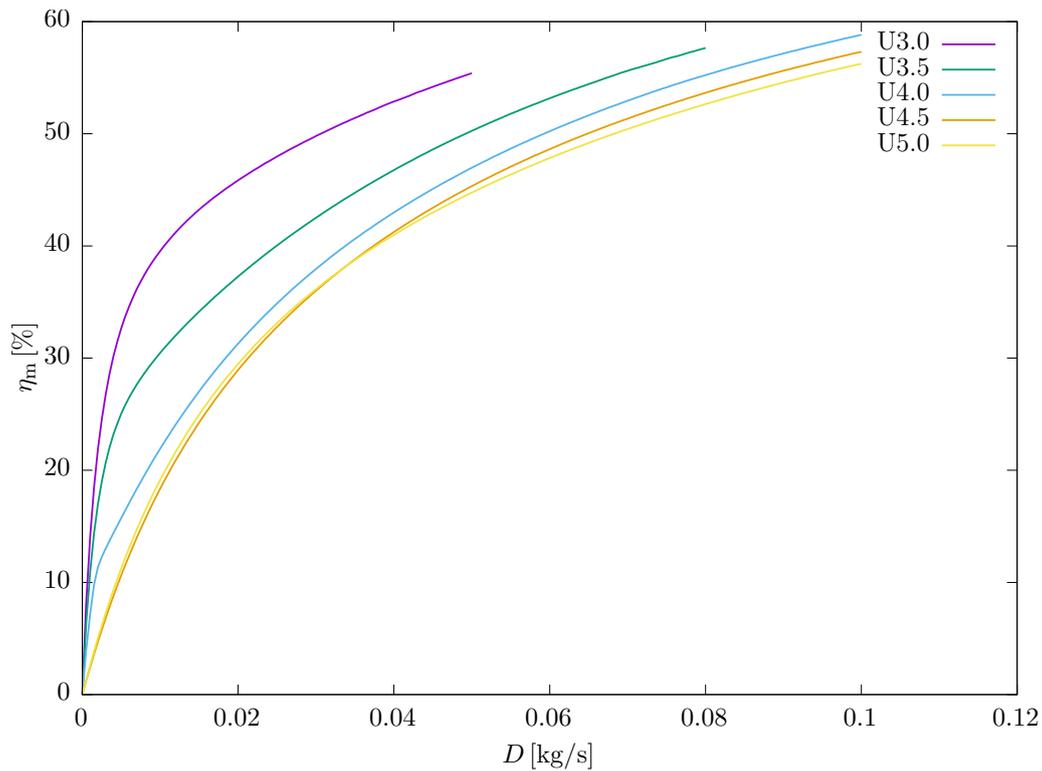


Figura 6.4: Rendimento meccanico al variare del coefficiente di damping (D) valutato per diverse velocità del fluido

Si può notare che i valori massimi di D rispetto ai quali è stato calcolato η_m sono diversi a seconda della velocità a cui le curve si riferiscono. Bisogna

infatti tenere presente che al diminuire della velocità del fluido, quindi dell'energia ceduta all'ala, il moto di plunging può sussistere solo con valori più limitati della forza di damping, quindi di D . Nel momento in cui lo smorzatore costituisce un ostacolo troppo forte al moto oscillatorio, da cui consegue il blocco dell'ala, si ha una potenza meccanica di output nulla. Dalla definizione 5.35 si capisce quindi il motivo per cui i rendimenti sono definiti per range limitati di D .

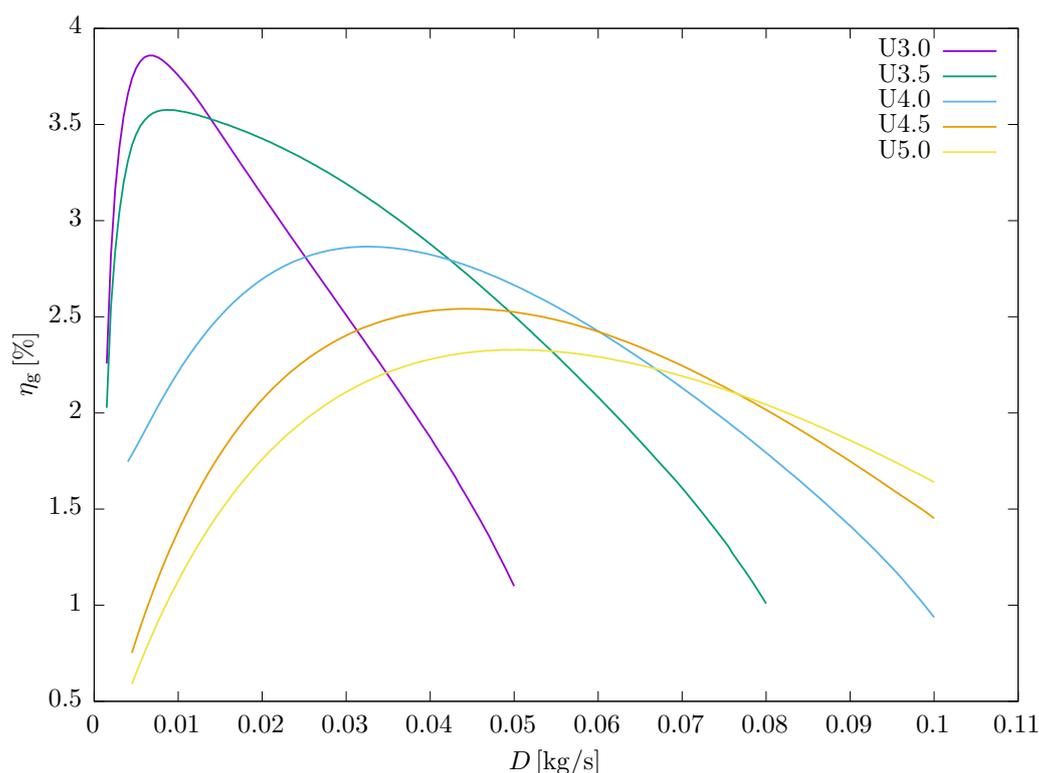


Figura 6.5: Rendimento globale al variare del coefficiente di damping (D) valutato per diverse velocità del fluido

Un aspetto interessante consiste nei valori massimi di rendimento che si hanno per ciascun coefficiente di smorzamento tra le diverse velocità. Questi si possono considerare inversamente proporzionali rispetto alla velocità del fluido tanto che la curva corrispondente alla velocità minima di 3.0[m/s] supera tutte le altre, nel tratto in cui è definita.

Infine vengono presentati gli andamenti del rendimento globale (η_g) come definito dalla 5.36. Come è logico aspettarsi, i valori di questo parametro sono notevolmente più bassi rispetto al rendimento meccanico, in quanto

tiene conto dello stesso rendimento di Betz: non viene mai superato infatti il valore di circa 3.8%.

Si evidenzia comunque la conformità con l'andamento del rendimento meccanico dal momento che le curve relative ai rendimenti più alti sono quelle delle velocità più basse.

Si ha però una notevole differenza tra le curve del η_m e η_g : mentre nel primo caso si ha un andamento che richiama la presenza di un asintoto orizzontale, le curve del rendimento globale hanno chiaramente un andamento a massimo. Con l'aumentare della velocità fissata, i valori di D con i quali si ottiene l'inversione di segno della derivata prima, da positivo a negativo, si spostano progressivamente verso valori maggiori.

6.2.2 Traiettorie di Leading e Trailing Edge

La figura 6.6 riporta le traiettorie descritte dal LE e dal TE dell'ala, studiata nel caso in cui sul PP agisca la forza di damping precedentemente definita (5.22). Vengono presentati, analogamente al caso senza estrazione, i grafici di cinque velocità del fluido, e vengono imposti, per ciascuna di esse, i valori del coefficiente di damping D per i quali si ha massima potenza meccanica. Si rimanda alla figura 6.3 per un confronto dei valori di D utilizzati.

La presenza della forza di damping che si oppone al modo di plunge ha ovviamente delle ricadute sulla traiettoria dell'ala. Nello specifico, facendo un confronto tra la figura 6.2 e la 6.6, si può constatare la notevole riduzione dell'ampiezza delle oscillazioni del LE. Rispetto al caso senza estrazione, si può notare anche una riduzione delle oscillazioni in x sostanzialmente per tutte e cinque le velocità analizzate, ottenendo così un moto prettamente rettilineo del Leading Edge.

Il Trailing Edge descrive anche in questo caso la caratteristica traiettoria a *lemniscata*, che appare però più regolare, al variare della velocità imposta, di quanto non la sia invece nel caso senza estrazione. Un'altra differenza facilmente rilevabile è la distribuzione lungo x dei lobi del TE che risulta notevolmente ridotta.

Con la velocità di 3.0[m/s] si nota ancora una notevole influenza della forza di gravità, che viene comunque meno con velocità superiori.

Infine si sottolinea come in questo caso non sia distinguibile la presenza di alcuna transizione legata all'ampiezza dell'oscillazione del LE tanto che, in tutti e cinque i casi, essa risulta notevolmente inferiore rispetto all'ampiezza massima del TE, riducendosi ulteriormente al crescere di U .

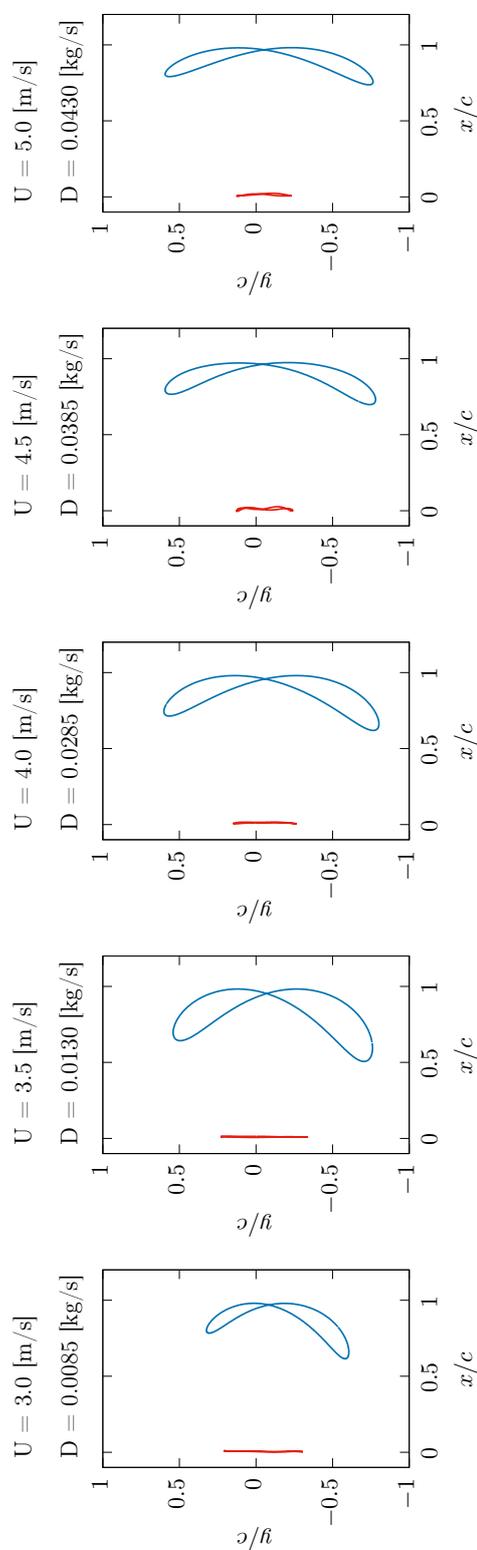


Figura 6.6: Traiettorie di Leading Edge (rosso) e Trailing Edge (blu) nel caso di damping con D parametro interno insieme alla velocità e specifico del valore di massimo della potenza meccanica estratta

6.3 Modello con estrazione elettromagnetica

6.3.1 Carico solo resistivo

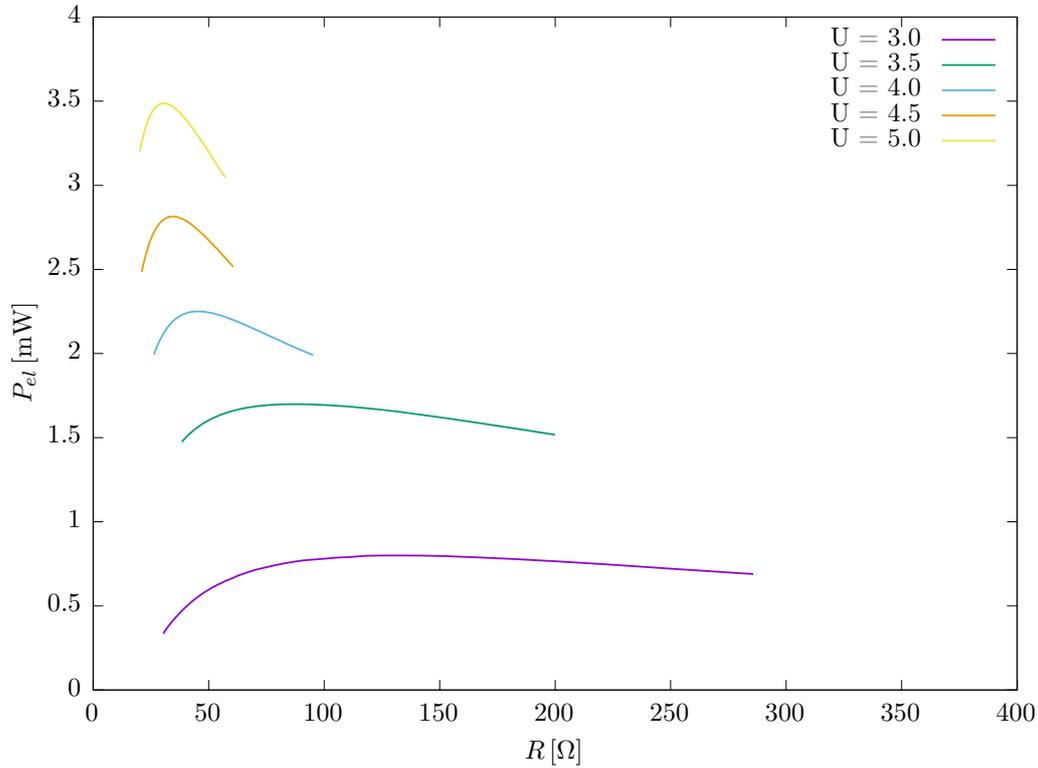


Figura 6.7: Potenza elettrica al variare della resistenza (R) e della velocità del fluido

Il grafico 6.7 presenta l'output di potenza elettrica (P_{el}) al variare del carico resistivo, per velocità che variano da 3.0[m/s] a 5.0[m/s].

Le curve sono state rappresentate solo nell'intorno del rispettivo valore di massimo, tralasciando l'andamento monotono decrescente che si ha per ogni curva oltre il punto del relativo massimo. Inoltre la condizione che si avrebbe per $R \rightarrow \infty$ corrisponde ad un circuito aperto la cui potenza elettrica è nulla. In questo caso, analogamente al modello in assenza di estrazione, non si presenterebbe alcuna forza frenante sull'ala. Diminuendo invece il valore del carico resistivo cresce il quantitativo di potenza estratta, a seguito dell'aumento del valore della corrente, nonostante vi sia un contemporaneo incremento della forza frenante. Tale effetto risulta ulteriormente significativo con piccoli valori di R , tanto che l'effetto frenante sull'ala diventa preponderante e la potenza decresce rapidamente. In teoria tutte le curve di

potenza tendono a valori nulli per $R \rightarrow 0$, ma in realtà già per valori intorno a $10[\Omega]$ il freno elettromagnetico inibisce il moto di plunge dell'ala e quindi non è più possibile l'estrazione di energia.

Si può notare che le curve di potenza sono curve con un massimo la cui entità è proporzionale alla velocità del vento. Inoltre per le velocità più basse, in un intorno del massimo, il valore dell'output di potenza è stabile, mentre per le velocità più alte anche una piccola variazione del carico resistivo comporta una notevole variazione della potenza elettrica.

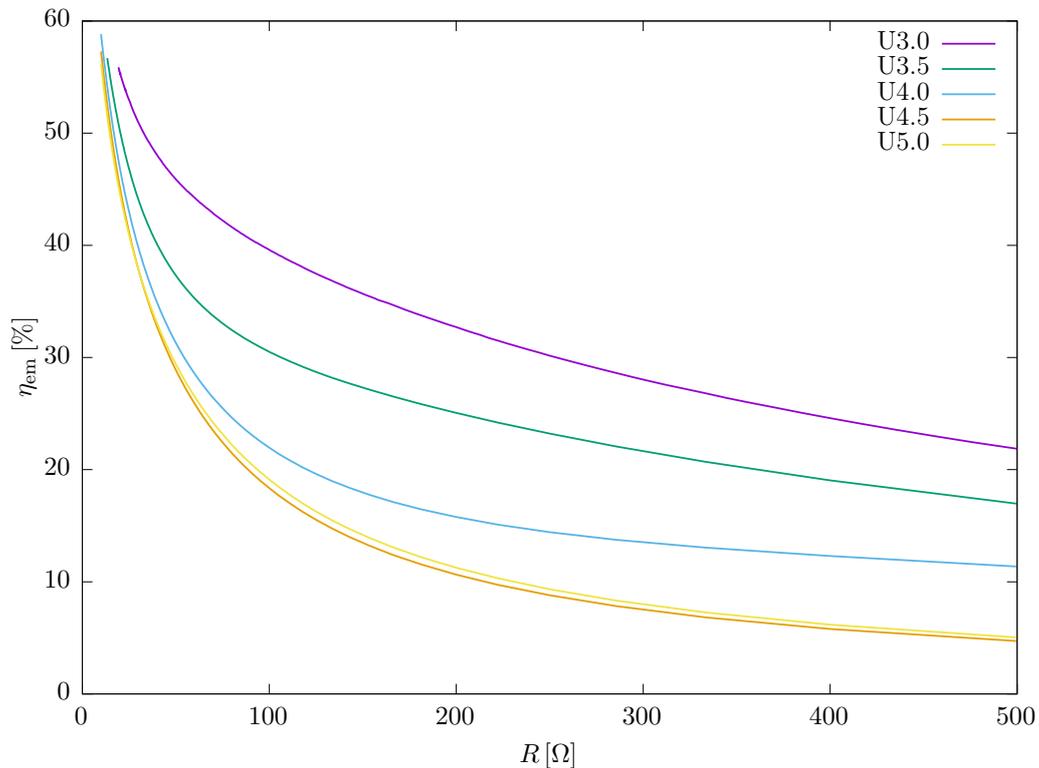


Figura 6.8: Rendimento al variare della resistenza (R) e della velocità del fluido

Il grafico 6.8 presenta l'andamento del rendimento elettromagnetico, definito dall'equazione 5.38, al variare del carico resistivo. L'andamento monotono decrescente è spiegato dal fatto che all'aumentare della resistenza, diminuisce la potenza elettrica e aumenta la potenza di plunge. L'andamento asintotico della prima parte del grafico si verifica poiché la potenza di plunge decresce sensibilmente a causa dell'eccessivo freno elettromagnetico. Il rendimento è maggiore per velocità più basse in quanto la potenza di plun-

ge è di entità inferiore. Tale differenza di η è quasi nulla per valori di R inferiori a $50[\Omega]$.

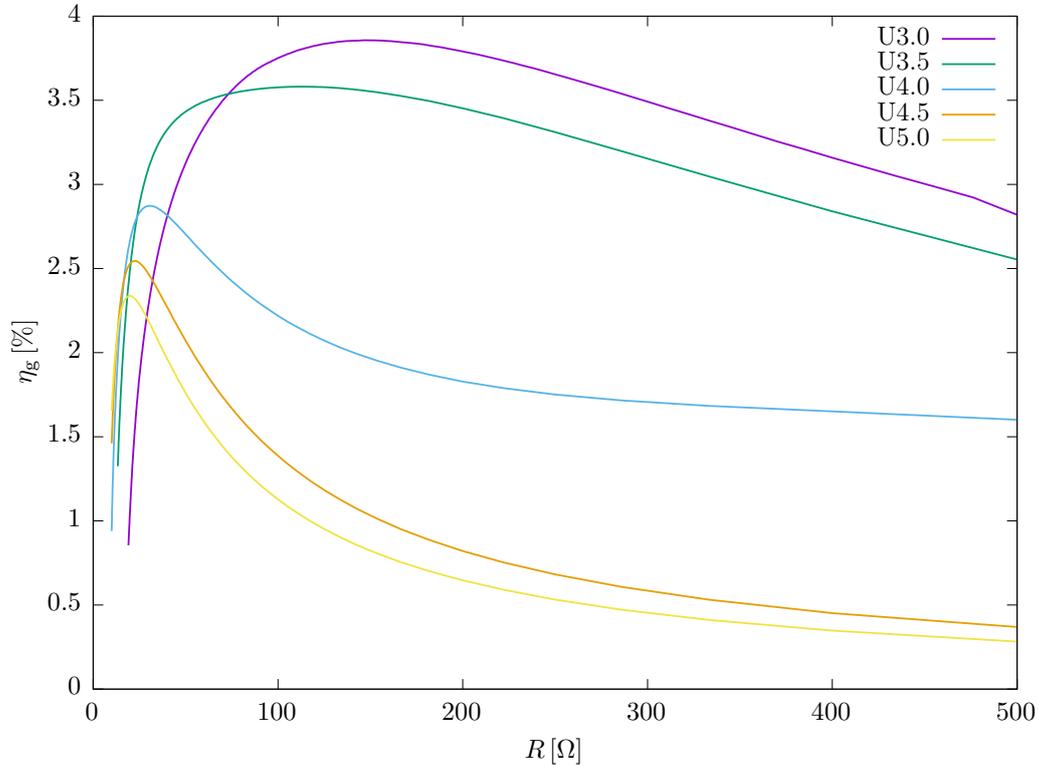


Figura 6.9: Rendimento al variare della resistenza (R) e della velocità del fluido

Si presenta infine il grafico 6.9 che mostra il rendimento globale, definito dall'equazione 5.40 al variare del carico resistivo. Si noti prima di tutto che il valore di η_g è di un ordine di grandezza inferiore rispetto a η_{em} . Per giustificare l'andamento di tale grafico è necessario riferirsi all'andamento di η_{em} e ricordare l'andamento del rendimento di Betz, definito nell'equazione 5.32. Per i valori di R all'incirca minori di $50[\Omega]$ (il valore esatto varia da velocità a velocità), il rendimento di Betz è estremamente basso poiché il freno elettromagnetico riduce la potenza di plunge, mentre la potenza disponibile nel fluido rimane costante. Per valori maggiori della R di massimo rendimento invece, l'andamento è monotono decrescente per tutte le velocità, ma si evidenziano bene i due andamenti che si hanno per velocità minore e maggiore di $4.0[\text{m/s}]$. La $U4.0$ corrisponde invece alla fase di transizione, già descritta nel sottoparagrafo 6.1.2.

6.3.2 Carico resistivo e induttivo

Per lo studio del carico induttivo e resistivo si è scelto di studiare l'andamento della potenza e del rendimento fissata R e facendo variare i valori dell'induttanza. Per ciascuna velocità si è considerata la R che massimizza l'output di potenza elettrica nel caso senza induzione. I seguenti grafici (Figure 6.10 – 6.12) hanno il fine di mostrare l'effetto dell'induttanza nell'intorno del carico resistivo che genera l'output massimo per le velocità esaminate.

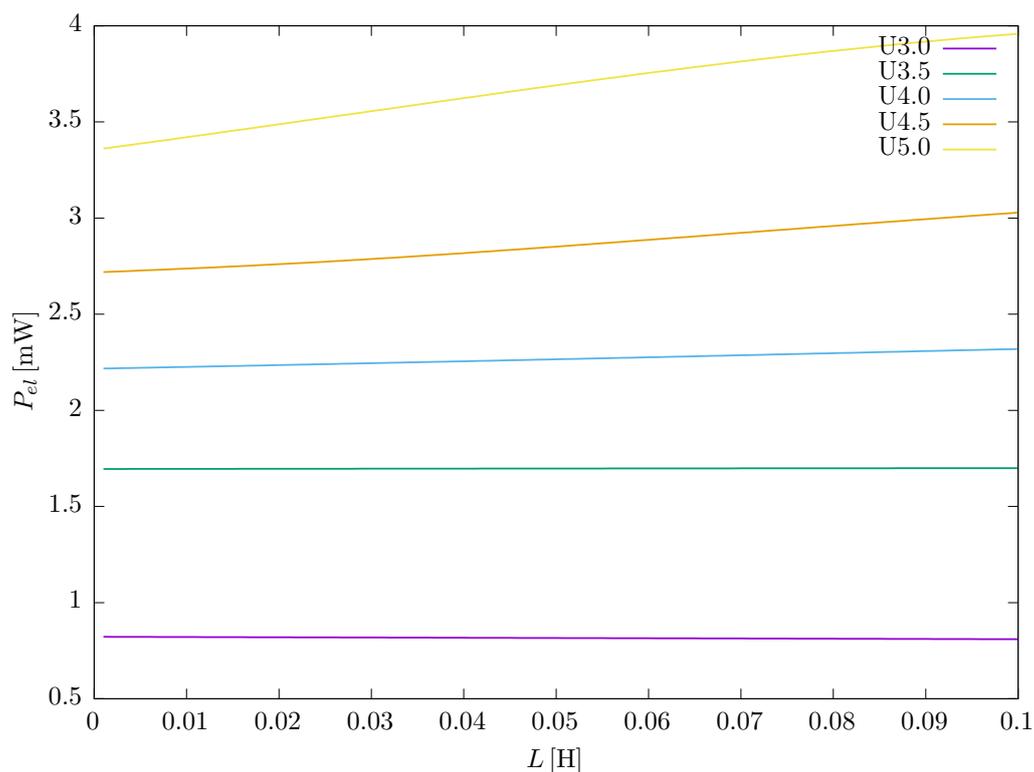


Figura 6.10: Potenza elettrica al variare dell'induttanza (H) e della velocità del fluido

Si nota che l'induttanza ha un effetto benefico sull'output di potenza in quanto l'andamento è monotono crescente. Tuttavia la pendenza di tali curve è proporzionale alla velocità del vento, e nel caso di velocità basse (U3.0 e U3.5), l'output di potenza è praticamente costante. Inoltre si deve tenere in considerazione che valori di induttanza di 100mH sono difficilmente ottenibili in un circuito standard tramite l'impiego di induttore. Se si considerano valori di induttanza standard, fino ad una decina di mH, l'effetto dell'induttanza sull'output di potenza, e in generale sulla dinamica del dispositivo, è trascurabile.

Per quanto riguarda il rendimento elettromeccanico l'effetto dell'induttanza può essere positivo o negativo in base al valore della resistenza per quella determinata velocità, come si evince dal grafico 6.11. Quello che però si nota dal grafico 6.12 è che l'effetto dell'induttanza sul rendimento globale è ampiamente trascurabile.

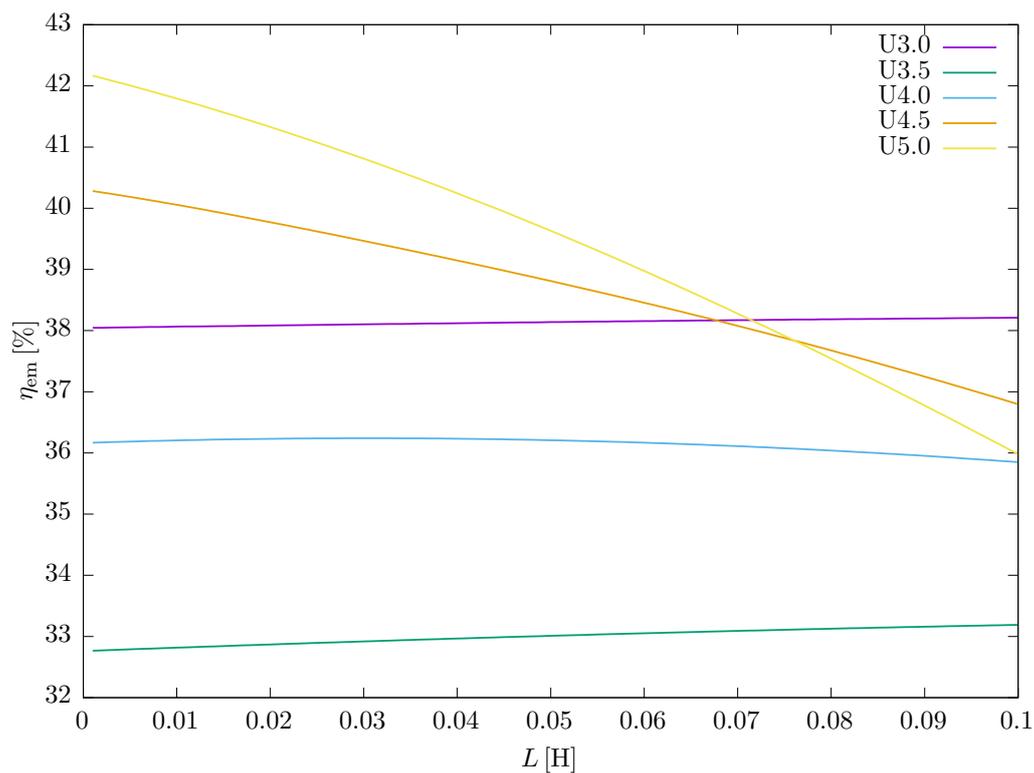


Figura 6.11: Rendimento elettromagnetico al variare dell'induttanza (H) e della velocità del fluido

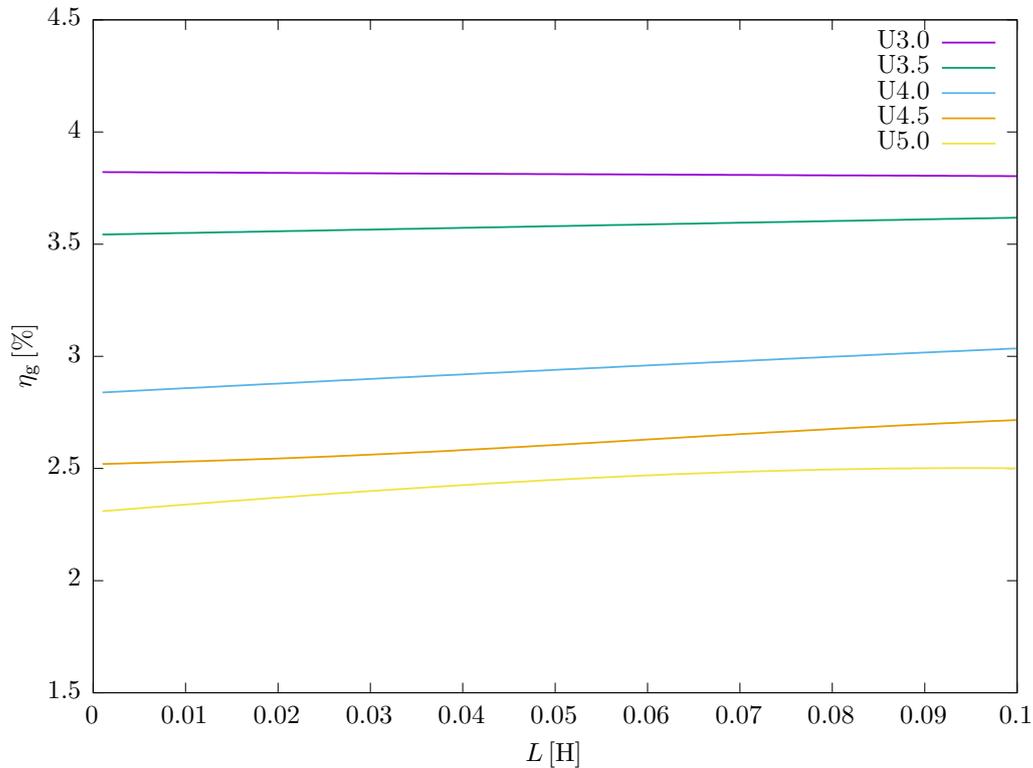


Figura 6.12: Rendimento globale al variare dell'induttanza (H) e della velocità del fluido

6.3.3 Traiettorie di Leading e Trailing Edge

La figura 6.13 riporta le traiettorie descritte dal LE e dal TE dell'ala, studiata nel caso in cui sul PP agisca la forza frenante dovuta all'accoppiamento elettromagnetico. Il layout del grafico è analogo a quello presentato nella figura 6.6. In tale caso ogni traiettoria è presentata nel caso in cui il carico resistivo massimizzi l'output di potenza elettrica.

L'andamento risulta analogo a quello presentato per il caso senza estrazione, benché ovviamente l'oscillazione descritta sia dal LE che dal TE è minore. Inoltre si è scelto di presentare le traiettorie solo nel caso di $L = 0$ [H]. Per il confronto più approfondito delle varie traiettorie si rimanda al paragrafo 6.5.

Diversamente dal caso senza estrazione, nelle traiettorie è meno marcata la differenza tra regime del moto a basse velocità (U3.0 e U3.5) e ad alta velocità (U4.5 e U5.0), seppure sia ancora influente nell'estrazione, come si vede dalla figura 6.9.

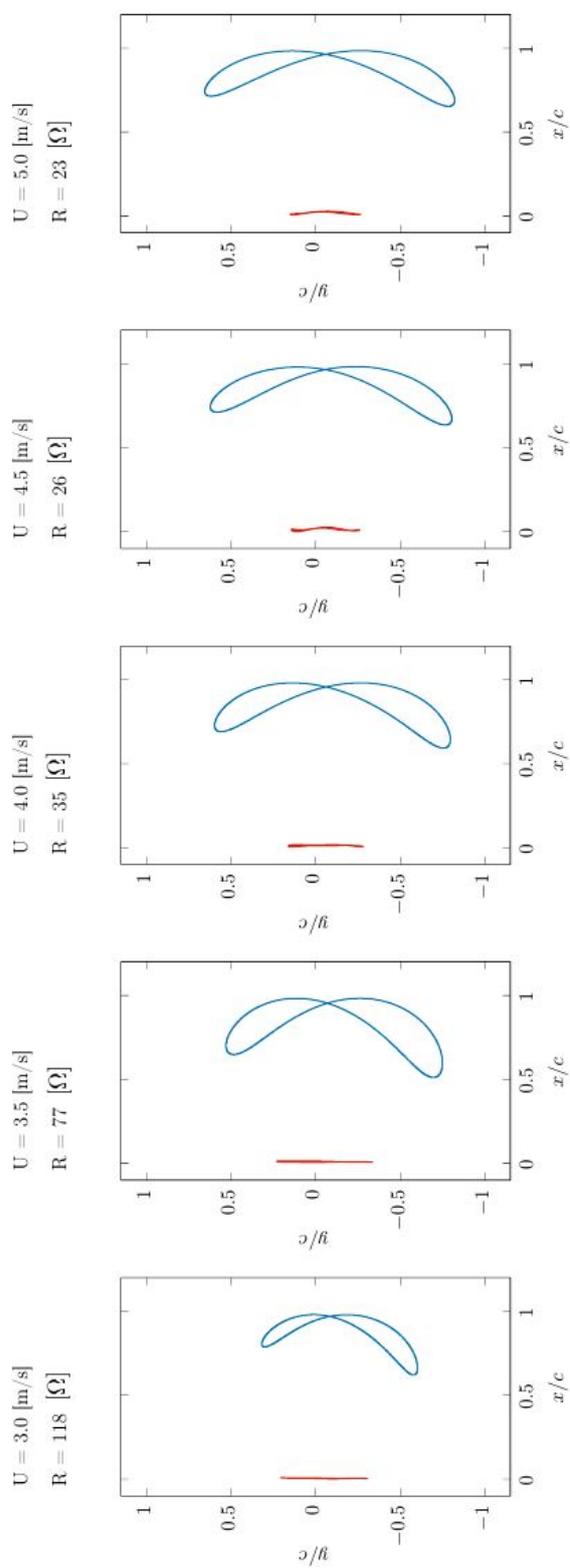


Figura 6.13: Traiettorie di Leading Edge (rosso) e Trailing Edge (blu) nel caso di carico resistivo con R parametro interno insieme alla velocità e specifico del valore di massima della potenza elettrica estratta per ciascuna velocità

6.4 Influenza di C_{bl}

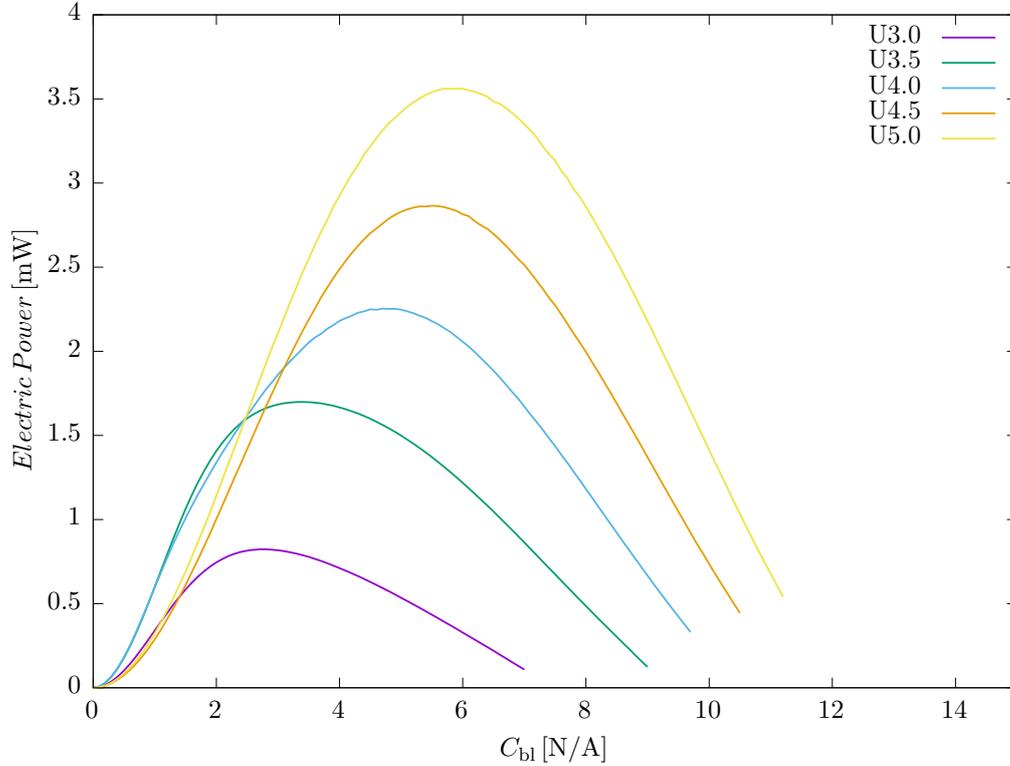


Figura 6.14: Potenza elettrica al variare del coefficiente di accoppiamento C_{bl} per diverse velocità fissate del fluido

Infine si riportano i risultati inerenti la potenza e il rendimento ottenuti facendo variare il coefficiente di accoppiamento (C_{bl}). Si ricorda che tale parametro è stato mantenuto costante nelle precedenti analisi dal momento che è legato alle sole caratteristiche del dispositivo, fissate a priori. Questa valutazione è stata condotta nel caso di induttanza nulla e resistenza fissata, indagando quindi se vi possano essere vantaggi ottenibili da diverse impostazioni dell'accoppiamento elettromagnetico.

6.4.1 Potenza e Rendimento

La figura 6.14 riporta l'andamento della potenza elettrica estratta con ciascuna delle cinque velocità considerate, al variare del coefficiente di accoppiamento. Le curve presentano anche in questo caso un andamento a massimo che assume valori progressivamente più alti e con C_{bl} sempre maggiori all'aumentare di U .

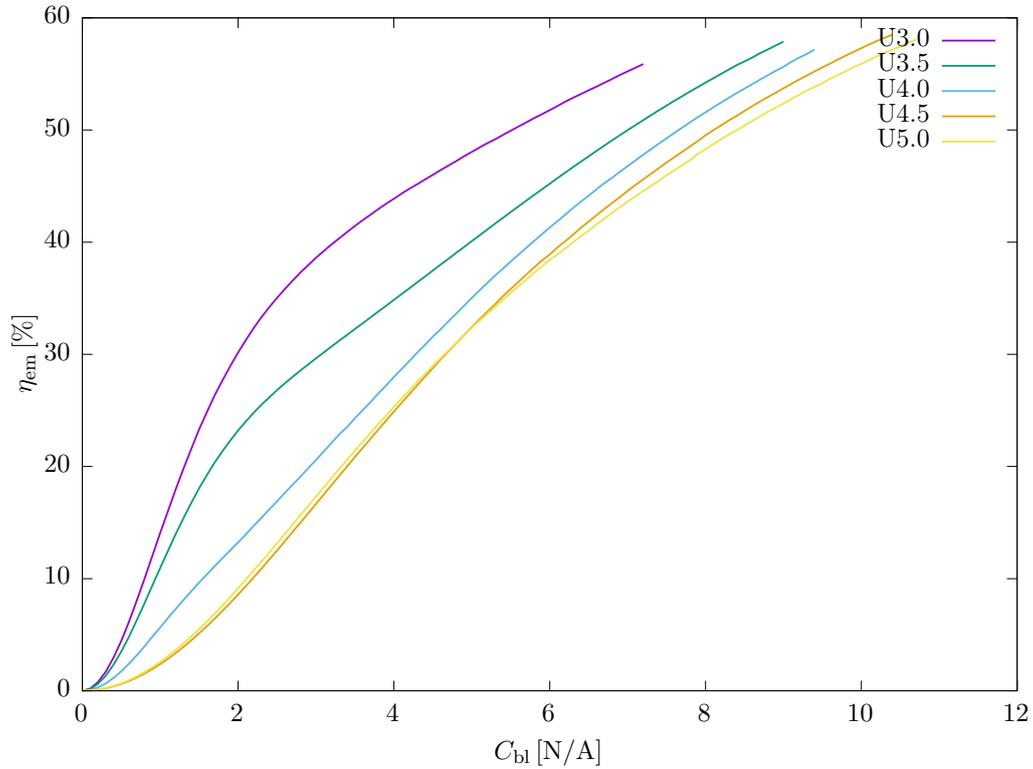


Figura 6.15: Rendimento elettromeccanico al variare del coefficiente di accoppiamento C_{bl} per diverse velocità fissate del fluido

Nel caso di C_{bl} prossimi a zero si ottiene una potenza estratta infinitesima, il che è concorde con la definizione di questo parametro (4.5). Infatti, per ogni velocità del PP, la *f.e.m.* del circuito elettrico è direttamente proporzionale al C_{bl} e di conseguenza lo è la potenza elettrica. La netta riduzione della potenza che si verifica dopo ciascun punto di massimo è dovuta, invece, all'incremento della forza di freno elettromagnetico. Come mostrato nella espressione 4.6, vi è proporzionalità tra tale forza ed il C_{bl} , per cui un eccessivo incremento di quest'ultimo comporta una progressiva riduzione del moto di plunge dell'ala fino a che esso diventa insostenibile. Dal momento che la potenza elettrica è legata, tramite la *f.e.m.* prodotta, alle oscillazioni del PP, il loro smorzamento comporta il progressivo annullamento della potenza estratta.

Con la figura 6.15 si valuta invece il rendimento elettromeccanico, come definito dalla 5.38. Esso presenta chiaramente un incremento progressivo all'aumentare del C_{bl} , arrivando a valori prossimi al 60% e presentando una curva superiore a tutte per basse velocità. Tale andamento è ragione-

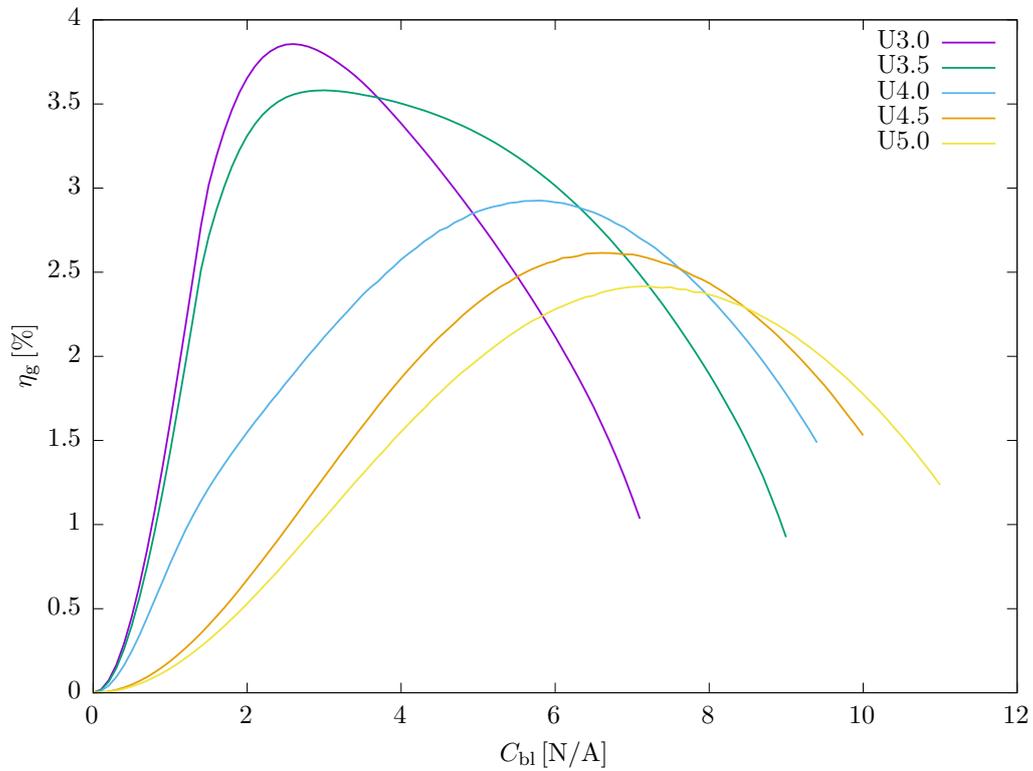


Figura 6.16: Rendimento globale al variare del coefficiente di accoppiamento C_{bl} per diverse velocità fissate del fluido

vole dal momento che il rendimento esaminato valuta la potenza elettrica estratta rispetto alla potenza disponibile dal moto di plunge. L'incremento del C_{bl} permette una maggiore estrazione di potenza a parità di potenza di plunge disponibile, ma allo stesso tempo si ha una riduzione della potenza legata al moto dell'ala poiché il maggiore freno elettromagnetico ne limita l'entità. L'effetto complessivo è un incremento notevole del rendimento elettromagnetico.

Per quanto riguarda invece il rendimento globale, rappresentato in figura 6.16, ritroviamo un andamento a massimo analogo a quello della potenza elettrica nel grafico 6.14. Tale analogia risulta ben giustificata dall'espressione del rendimento globale 5.40, in cui al numeratore compare la stessa potenza elettrica graficata. Si può considerare invece l'effetto della potenza di Betz come una sorta di fattore scala sull'andamento delle curve. La ricaduta dell'incremento di questo all'aumentare della velocità del fluido è evidente nel confronto tra il rendimento alla velocità di 5[m/s] e 3[m/s]. Dal momento che il valore della potenza di Betz corrispondente alla massima velocità è il

più alto tra le velocità e non è sufficientemente compensato dall'incremento di potenza estratta mostrato in figura 6.14, si ottiene un rendimento globale relativo ad $U = 5[\text{m/s}]$ che è il più basso tra tutte le velocità. Viceversa per la velocità minima analizzata, si ha il massimo rendimento globale, prossimo al 4% con un $C_{bl} \approx 2.5[\text{N/A}]$, poiché a parità di potenza di Betz disponibile (la minore tra le velocità) si ottiene la maggiore estrazione di potenza elettrica.

6.5 Confronto traiettorie

Nella figura 6.17 vengono confrontate le traiettorie descritte dal TE e dal LE per una velocità di $4.0[\text{m/s}]$, in 3 casi differenti: A) senza estrazione, B) con estrazione e induttanza nulla ed infine con C) estrazione e induttanza non nulla.

Si nota che in tutti i casi è presente un moto prevalentemente rettilineo verticale del Leading Edge e il Trailing Edge presenta la traiettoria “a forma di 8” già analizzata nel paragrafo 6.1.2. Inoltre si vede che la traiettoria B e C sono quasi completamente sovrapposte. Tale andamento coincidente conferma quanto detto al paragrafo 6.3.2, ovvero che l'effetto dell'induttanza è minimo e quindi trascurabile.

Infine si noti come nel caso A l'ampiezza della traiettoria del Leading Edge sia maggiore rispetto agli altri casi in quanto non è presente la forza frenante dovuta all'accoppiamento meccanico o elettromagnetico.

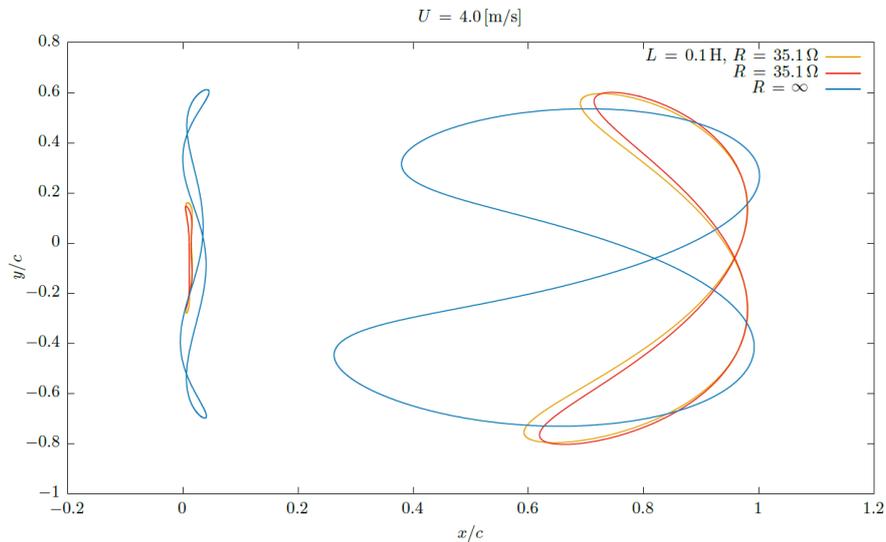


Figura 6.17: Confronto delle traiettorie ottenute per $U=4.0$ nel caso senza estrazione, con carico resistivo e con carico resistivo-induttivo

Capitolo 7

Conclusioni

È stato messo a punto un modello matematico per la descrizione della dinamica del dispositivo FLEHAP, un innovativo sistema per l'energy harvesting da interazioni fluido-struttura basato sul fenomeno del flutter.

Risolvendo numericamente le equazioni del modello, è stato caratterizzato per la prima volta il caso con estrazione di energia elettrica. Si accenna soltanto al fatto che i risultati ottenuti appaiono in buon accordo con quelli ricavati da prove sperimentali effettuate su un prototipo di dimensioni e caratteristiche simili alla configurazione studiata in questa Tesi.

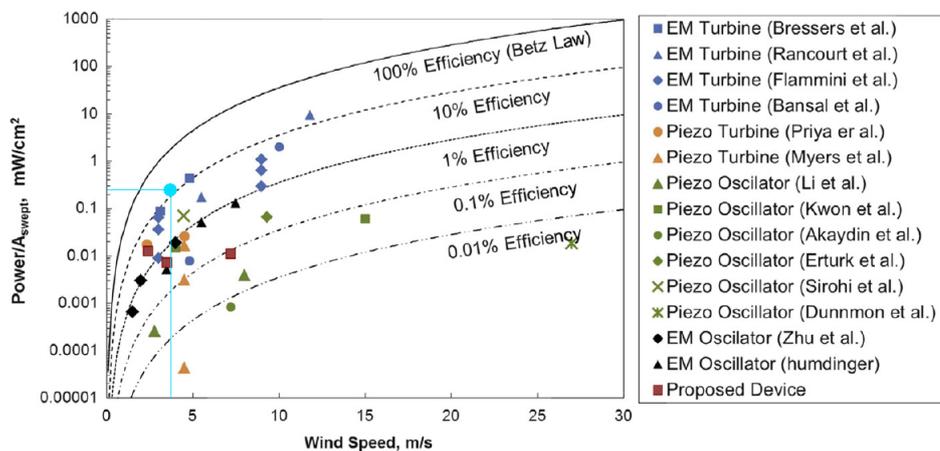


Figura 7.1: Confronto di dispositivi per la produzione di energia da interazione fluido-struttura (tratta da [14] e [15]). Il punto celeste rappresenta un prototipo di recente sperimentazione del dispositivo FLEHAP.

Un recente confronto apparso in letteratura [14] paragona diversi dispositivi per la produzione di energia elettrica sfruttando interazioni fluido-

struttura. In figura 7.1 è ricopiato tale confronto, al quale sono stati aggiunti i risultati ottenuti per il FLEHAP: si può notare come nel range di velocità di 3-5 [m/s], entro il quale si può immaginare operare il sistema, esso sia uno dei dispositivi più performanti.

7.1 Prospettive future

Gli studi futuri sul dispositivo FLEHAP si concentreranno sui seguenti punti principali:

Sviluppo del prototipo Attualmente sono presenti vari studi su nuovi materiali da integrare nel prototipo per migliorare le caratteristiche del dispositivo. Tra questi è particolarmente interessante la possibilità di utilizzare capacitori elastomerici integrati con l'accoppiamento elettromagnetico per aumentare l'output energetico.

Implementazione nuovi modelli Il modello matematico utilizzato ha portato a risultati concordi sia qualitativamente che quantitativamente, tuttavia la caratterizzazione del dispositivo può essere ritenuta ancora incompleta. Sono oggetto di ricerca nuovi modelli fisico-matematici più complessi al fine di riprodurre in modo migliore il moto del dispositivo e ottenere risultati ancora più accurati.

Scaling Lo studio effettuato nella presente Tesi riguarda le prestazioni di una configurazione a geometria fissata. Una caratterizzazione completa del dispositivo prevede lo studio dell'output di potenza e rendimento al variare delle dimensioni fisiche dell'oggetto.

Accoppiamento con i sensori WINS Questo sistema di EH è stato concepito per alimentare delle reti WINS a basso consumo energetico. Sono necessari studi futuri specificatamente sul collegamento del FLEHAP al sensore tramite dispositivi elettronici e la sua integrazione con altri dispositivi di Energy Harvesting che alimentano la rete.

Appendice A

Metodo risolutivo di Adams-Bashfort

I risultati ottenuti dal modello realizzato si basano sulla semplice risoluzione di equazioni differenziali ordinarie al più del secondo ordine per cui è stato utilizzato un metodo di risoluzione numerica lineare di tipo multistep. In particolare si è sfruttato il metodo risolutivo di Adams-Bashfort di ordine tre, che utilizza una combinazione lineare dei valori assunti dalla funzione e dalle sue derivate negli step precedenti. Si adottano i tre coefficienti $b_1 = \frac{23}{12}$, $b_2 = -\frac{4}{3}$, $b_3 = \frac{5}{12}$ che subentrano nell'equazione:

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

Per i primi due step si utilizza il metodo di Eulero e lo stesso metodo di Adams-Bashfort ma di ordine due:

$$y_{n+1} = y_n + \Delta t f(t_n, y_n) \quad (\text{Eulero}) \quad (\text{A.2})$$

$$y_{n+2} = y_{n+1} + \Delta t \left(\frac{3}{2} f(t_{n+1}, y_{n+1}) - \frac{1}{2} f(t_n, y_n) \right) \quad (\text{A.3})$$

Il termine n è sempre un numero naturale e rappresenta lo step temporale di calcolo a cui corrisponde il valore approssimato assunto dalla funzione all'istante $t_n = n \Delta t$.

Possiamo quindi applicare la risoluzione numerica a ciascuna delle tre equazioni cardinali per ottenere l'evoluzione temporale delle velocità tangenziali ed angolari del centro di massa nel sistema co-rotante. Facendo riferimento alla (5.5), (5.6) e (5.7), viene imposto:

$$f_1(t_n, y_n) = \dot{\omega} \quad (\text{A.4})$$

$$f_2(t_n, y_n) = \dot{v}_{x'} \quad (\text{A.5})$$

$$f_3(t_n, y_n) = \dot{v}_{y'} \quad (\text{A.6})$$

Inoltre, per risalire alla posizione temporale (x', y') assunta, si impone:

$$f_4(t_n, y_n) = \dot{x}' \quad (\text{A.7})$$

$$f_5(t_n, y_n) = \dot{y}' \quad (\text{A.8})$$

$$f_6(t_n, y_n) = \dot{\theta} \quad (\text{A.9})$$

In conclusione si fa notare che non è stato necessario utilizzare alcun metodo di risoluzione numerica per quanto riguarda il calcolo della corrente prodotta nel caso di estrazione elettromagnetica. Ciò è dovuto alla facilità di integrazione tramite il metodo a variabili separabili grazie al quale è stata ottenuta la specifica espressione analitica della corrente.

Bibliografia

- [1] R. D. Blevins. *Flow-induced vibration*. New York, NY (USA); Van Nostrand Reinhold Co., Inc., 1990.
- [2] A. Abdelkefi. “Aeroelastic energy harvesting: A review”. In: *International Journal of Engineering Science* 100 (2016), pp. 112–135. ISSN: 0020-7225. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijengsci.2015.10.006>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020722515001482>.
- [3] A. Harb. “Energy harvesting: State-of-the-art”. In: *Renewable Energy* 36.10 (2011), pp. 2641–2654. ISSN: 0960-1481. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.014>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148110002703>.
- [4] 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.
- [5] H.-L. Dai, A. Abdelkefi, U. Javed e L. Wang. “Modeling and performance of electromagnetic energy harvesting from galloping oscillations”. In: *Smart Materials and Structures* 24.4 (2015), p. 045012. URL: <http://stacks.iop.org/0964-1726/24/i=4/a=045012>.
- [6] M. M. Bernitsas, K. Raghavan, Y. Ben-Simon e E. M. Garcia. “VI-VACE (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), p. 041101.
- [7] S. Michelin e O. Doaré. “Energy harvesting efficiency of piezoelectric flags in axial flows”. In: *Journal of Fluid Mechanics* 714 (gen. 2013), pp. 489–504. ISSN: 1469-7645. DOI: [10.1017/jfm.2012.494](https://doi.org/10.1017/jfm.2012.494). URL: http://journals.cambridge.org/article_S0022112012004946.

- [8] J. Young, J. 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.
- [9] C. Boragno, R. Festa e A. Mazzino. “Elastically bounded flapping wing for energy harvesting”. In: *Applied Physics Letters* 100.25 (2012), p. 253906.
- [10] A. Orchini, A. Mazzino, J. Guerrero, R. Festa e C. Boragno. “Flapping states of an elastically anchored plate in a uniform flow with applications to energy harvesting by fluid-structure interaction”. In: *Physics of Fluids* 25.9 (2013), p. 097105. DOI: 10.1063/1.4821808.
- [11] C. Boragno e G. Boccacero. “A new energy harvester for fluids in motion”. In: *Proc. SPIE* 9431 (2015), 94310G–94310G–6. DOI: 10.1117/12.2084591. URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2084591>.
- [12] G. Boccacero. “Sviluppo di sistemi di energy harvesting da vento”. Tesi di Laurea Magistrale in Scienza e Ingegneria dei Materiali, Università di Genova. 2014.
- [13] 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. DOI: 10.1017/S002211200500594X.
- [14] J.M. McCarthy, S. Watkins, A. Deivasigamani e S.J. John. “Fluttering energy harvesters in the wind: A review”. In: *Journal of Sound and Vibration* 361 (2016), pp. 355–377. ISSN: 0022-460X. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2015.09.043>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X1500783X>.
- [15] M. Bryant, A. D. Schlichting e E. Garcia. “Toward efficient aeroelastic energy harvesting: device performance comparisons and improvements through synchronized switching”. In: *SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*. International Society for Optics e Photonics. 2013, pp. 868807–868807.