

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA

Un metodo originale ed innovativo per l'energy harvesting

Relatore:

Chiar.mo Prof. Alessandro Bottaro

Correlatore:

Prof. Andrea Mazzino

Allievo:

Edoardo Alinovi

Tesi per il conseguimento della Laurea Triennale

in

INGEGNERIA MECCANICA

Dicembre 2011

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA

Thesis abstract

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

An original and innovative method for energy harvesting

Student: Edoardo Alinovi

Energy harvesting is a process that allows recovery of energy from alternative sources using devices named "energy harvesters".

Increasingly advanced technologies and innovative ideas are recently giving a new impulse in this research, which is leading to the discovery of much more efficient methods for the recovery of energy from the environment.

This thesis studies the dynamic behavior, at low wind speed, of a windpower device, capable of producing electricity using deformation of polymeric materials, called dielectric elastomers.

The device, capable of adopting different use configurations, it was studied by using numerical simulations, whit the aid of the open source calculating program "Overture".

2D simulations of airflow that hits the device have reveled two fundamental behaviors: a stable and not much functional, in which the device aligns in the direction of the wind, and an unstable, characterized by flapping supported and almost periodic in time.

During the study, we analyze the influence of wind speed, mass density and the point of attachment of elastomers on the stability of the device.

four unstable and swinging configurations have been found and, from simulations, it appears that this instability occurs for certain values of speed and higher mass density.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare il Professor Alessandro Bottaro, il Professor Andrea Mazzino e il dott. Ing. Joel Guerrero per avermi aiutato nella stesura di questa tesi. Un ringraziamento ad Alessandro Orchini, per l'aiuto e lo scambio di opinioni durante il mio lavoro.

Il grazie più sentito a mamma e papà, a mio fratello, ai miei nonni e ad Erica, a cui dedico la mia tesi, per avermi sostenuto ed incoraggiato durante questi mesi di lavoro.

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA

Prefazione

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

Un metodo originale ed innovativo per l'energy harvesting

Allievo: Edoardo Alinovi

L'energy harvesting è un processo che consente un recupero di energia da fonti alternative mediante dispositivi chiamati energy harvesters.

Tecnologie sempre più avanzate ed idee innovative stanno dando recentemente un nuovo impulso in questa disciplina, che sta portando alla scoperta di metodi sempre più efficienti per il recupero di energia dall'ambiente.

In questa tesi si studia il comportamento dinamico a basse velocità del vento di un dispositivo eolico, in grado di produrre energia elettrica tramite la deformazione di particolari materiali polimerici, chiamati elastomeri dielettrici.

Il dispositivo, in grado di assumere differenti configurazioni di funzionamento, è stato studiato tramite simulazioni numeriche, con l'ausilio del programma di calcolo open source "Overture".

Le simulazioni in 2D di un flusso d'aria che investe il dispositivo, ne hanno messo in luce due comportamenti fondamentali: uno stabile e poco funzionale, in cui il congegno si allinea nella direzione del vento, ed uno instabile, caratterizzano da flapping sostenuto e quasi periodico nel tempo.

Durante lo studio, si analizza l'influenza della velocità del vento, della densità di massa e del punto di attacco degli elastomeri sulla stabilità del dispositivo.

Sono state trovate quattro configurazioni instabili ed oscillanti e, dalle simulazioni, appare che tale l'instabilità sopraggiunge per determinati valori di velocità e densità di massa più elevate.

Indice

Caj	pitolo 1: Introduzione e stato dell'arte	1
1.1	Introduzione	1
1.2	Tipologie ed esempi di energy harvesting	2
1.3	Energia termica	3
1.4	Energia cinetica	10
1.5	Piezoelettricità	16
1.6	Energia idraulica ed eolica	.17
1.7	Materiali polimerici	29
Ca	pitolo 2: L'oggetto di questa tesi	.35
2.1	Descrizione del dispositivo e risultati sperimentali	35
2.2	Configurazione studiata	.40
2.3	Modello dinamico	.42
Caj	pitolo 3: Le equazioni di Navier-Stokes e la CFD	.46
3.1	La fluidodinamica computazionale	46
3.2	Overture e metodo alle differenza finite	.48
3.3	Generazione e definizione della griglia	49
Ca	pitolo 4: I risultati delle simulazioni	52
4.1	Configurazione con massa addizionale	53
4.2	Configurazione senza massa addizionale	.70
Caj	pitolo 5: Conclusioni	.90

Capitolo 1 Introduzione e stato dell'arte

1.1 Introduzione

L'ambiente che ci circonda è ricco di fonti di energia che, se ben sfruttate, possono dare un buon contributo alla richiesta energica odierna. Tecnologie sempre più moderne ed efficienti hanno permesso di estrarre dalla natura energia pulita ed economica in grado di integrare la produzione di impianti di potenza convenzionali o, addirittura, di rendere energicamente indipendenti intere unità abitative. In quest'ottica di progresso tecnologico verso l'utilizzazione ottimale e intelligente delle fonti energetiche dell'ambiente esterno si colloca la ricerca sull' "energy harvesting", talvolta menzionato come "power harvesting" od "energy scavenging". Con questo termine s' intende un processo attraverso il quale l'energia derivante da fonti alternative viene catturata e sfruttata: le sorgenti comunemente disponibili nell'ambiente, che costituiscono le forme di energia alternative, vengono convertite in energia elettrica direttamente utilizzabile per mezzo di dispositivi chiamati *energy harvesters*.

Una buona traduzione italiana del termine può essere "mietere energia", il ché pone enfasi sul fatto che con *energy harvesting* non solo si intendono gli attuali metodi per l'utilizzazione dell'energie rinnovabili, ma anche soluzioni innovative e tecnologicamente avanzate in grado sfruttare fonti che precedentemente non venivano prese in considerazione o che comunque non si pensava potessero essere sfruttabili.

Inizialmente la tecnologia è nata come metodo per fornire un'alternativa alle batterie nel campo dell'elettronica. Il progresso in questa disciplina ha permesso di creare apparecchiature elettroniche con prestazioni sempre maggiori, abbattendo parallelamente i consumi per alimentarle. Se prima ancora la batteria aveva permesso una certa indipendenza di questi dispositivi dalla rete esterna, almeno temporaneamente, oggi l'introduzione e la messa a punto di *energy harvesters*, tutt'ora in costante evoluzione, ha

permesso di rendere autonomi dispositivi elettronici per mezzo di una fonte, almeno virtualmente, inesauribile. Questo processo non si ferma tuttavia alle applicazioni elettroniche, ma abbraccia numerosi campi. Malgrado si riferisca spesso ad applicazioni per basse potenze, in un'accezione più estesa e generale si parla di *energy harvesting* ovunque sia possibile estrarre energia da una sorgente sfruttabile, grazie allo studio e allo sviluppo di una tecnologia in grado di svolgere questo servizio.

Non mancano esempi di applicazione per ottenere potenze più elevate, alcuni dei quali verranno citati in seguito, e, grazie all'avvento di moderni materiali e nuove idee, si stanno ottenendo sviluppi e dispositivi sempre più originali ed innovativi.

1.2 Tipologie ed Esempi

Sono già esistenti al giorno d'oggi diverse tecnologie e numerosi dispositivi in grado di rendere possibile un recupero dell'energia dall'ambiente.

In questa sezione saranno presentate diverse tipologie ed esempi di *energy harvesters* che sfruttano differenti fonti e forme di energia alternativa.

Prima di lasciare spazio agli esempi è però opportuno mettere in luce quali siano le sorgenti energetiche soggette a energy harvesting. Le principali, nelle quali si sono maggiormente concentrati gli sforzi nell'ideazione di tali dispositivi, sono:

- ➢ Energia termica
- ➢ Energia cinetica
- Piezoelettricità
- Energia idraulica ed eolica
- Applicazioni con materiali polimerici

1.3 Energia Termica

Il calore scambiato e le differenze di temperatura tra un corpo caldo ed uno più freddo sono da tempo conosciuti ed utilizzati per produrre energia elettrica.



Fig. 1.3.1: possibilità di recupero energetico dal corpo umano.

Nell'*energy harvesting*, però, ciò avviene in maniera innovativa, sfruttando sorgenti insolite e catturando energie più o meno basse a seconda delle applicazioni e dei dispositivi impiegati.

La *figura 1.3.1* mostra una mappa del calore corporeo e della quantità di energia che può essere recuperata da ogni parte del nostro corpo.

Il principio su cui si basa la generazione di tal energia è noto da tempo nell'ingegneria e si tratta dell'effetto Seebek, secondo il quale sottoponendo una giunzione metallica a un gradiente di temperatura si ottiene una differenza di potenziale ai suoi capi.

Il campo in cui trova maggiore applicazione è quello della misura: le termocoppie sono strumenti spesso utilizzati per questi scopi, ma il loro segnale elettrico è estremamente debole ed incapace di alimentare qualsiasi dispositivo.

Perciò, al fine di ottenere un quantitativo di energia elettrica accettabile, la soluzione adottata consiste nel porre più termocoppie in serie fino a decine di migliaia. Le termocoppie, di cui in *figura 1.3.2* è mostrato lo schema costitutivo, sono composte da

blocchi di semiconduttore di tipo p e di tipo n sistemati alternatamente, disposti termicamente in parallelo e connessi elettricamente in un circuito in serie.



Fig. 1.3.2: schema di una termocoppia a semiconduttore.

Il risultato è un particolare tipo di generatore ad effetto Seebek, chiamato generatore TEG, che, grazie alla serializzazione delle termocoppie, riesce a fornire l'energia necessaria per l'alimentazione di piccoli dispositivi.

Il rendimento massimo idealmente raggiungibile da un termogeneratore è legato alla natura termodinamica dei processi alla base del suo funzionamento, e, pertanto, risulta essere quello di Carnot:

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_h}{T_c} \tag{1.3.1}$$

dove T_h è la temperatura assoluta della superficie più calda del termogeneratore, mentre T_c di quella più fredda.

Più in dettaglio per un generatore a termocoppie, l'efficienza viene espressa come:

$$\eta = \frac{P_{teg}}{Q_h} \tag{1.3.2}$$

dove P_{teg} è la potenza del generatore e Q_h il calore ceduto dalla sorgente a temperatura più alta. Il rendimento può essere anche riscritto^[1] come:

$$\eta = \frac{T_h - T_c}{T_c} - \frac{\sqrt{1 + ZT_m - 1}}{\sqrt{1 + ZT_m} + \frac{T_h}{T_c}} , \qquad (1.3.3)$$

dove Z è un parametro di merito della termocoppia e dipende dal materiale impiegato e dalla temperatura a cui esso opera, mentre T_m la temperatura media a cui si trova la termocoppia; i valori dei parametri per i materiali più usati sono riportati nel grafico qui sotto riportato.



Fig.1.3.3: Caratteristiche di alcuni materiali per termocoppie di maggior uso.

Il generatore, di dimensioni assai contenute, mostrato qui a fianco, è un ottimo esempio di generatore TEG.

Questo generatore di energia termoelettrica basa il suo funzionamento su circa 30`000 termocoppie, organizzate in termopile, che rilevano la differenza di temperatura tra le parti



calde e meno calde del nostro corpo per generare energia. Questo dispositivo è in grado di creare circa 16 volt alla potenza di 1,3 micro watt sfruttando una differenza di temperatura pari a 5 gradi. Poiché si tratta di un prototipo iniziale i ricercatori sperano di migliorarlo ulteriormente, ottenendo conseguentemente risultati superiori.

Si punta a potenziare questo microchip per renderlo più performante, per esempio aumentando la differenza di temperatura tra le facce che rilevano il calore attraverso delle micro-cavità a vuoto.

Il microchip, sviluppato da un team di scienziati di Singapore, ha le potenzialità per rivoluzionare il mondo della micro-elettronica: potrebbe essere in grado di accumulare energia per prolungare la vita delle batterie, o generare energia elettrica per far funzionare sensori o impianti medici.

Un altro esempio interessante di applicazione è fornito da una nota azienda di orologi: la Seiko è riuscita a costruire tramite questa tecnologia di generatori un orologio, il cui schema è presentato in *figura 1.3.4*, interamente alimentato dal calore corporeo. Come si può notare, attraverso la differenza di temperatura tra la pelle e l'ambiente esterno, genera il quantitativo di energia necessario per l'alimentazione e il corretto funzionamento del dispositivo.



Fig. 1.2.4: (a): Orologio Seiko Thermic Wirstwatch. (b): Modulo termoelettrico. (c): Vista in sezione.

Gli esempi precedentemente illustrati sono tutte applicazioni di esigua potenza a causa dei piccoli gradienti di temperatura. Tuttavia i generatori TEG possono sviluppare potenze ben più alte, qualora vengano utilizzati con gradienti termici superiori.

Ad esempio, un generatore commercializzato dalla Thermal Electronics Corp. è in grado di sopportare temperature abbastanza elevate e può generare fino a circa 10w di potenza. Grazie alle ristrette dimensioni (40mm x 40mm) risulta versatile e può essere attaccato a una qualsiasi fonte di calore inutilizzata.



Fig. 1.3.5(a): Generatore TEG.

Fig. 1.3.5(b): Prestazioni al variare di Tc.

Una applicazione notevole, che consente un recupero maggiore di energia, riguarda l'utilizzo del calore dei gas di scarico da automobili e grandi automezzi diesel. In tempi recenti è stato infatti studiato quanto applicazioni di questo tipo possano essere vantaggiose: con l'energia prodotta è possibile ricaricare batteria e dispositivi di bordo, avendo un guadagno sul consumo di carburante: il fine che si vuole perseguire è quello di utilizzare questa tecnologia per fare a meno dell'alternatore, con evidenti vantaggi sia costruttivi, che in termini di rendimento del motore. Di seguito è riportata una mappa dell'energia persa da una automobile.



Fig. 1.3.6: Mappa dell'energia persa da una automobile.

L'energia che viene quindi sprecata si aggira attorno ad una quota del 75% di quella totale ottenuta dal carburante. Il recupero del 6% dell'energia termica dei gas di scarico potrebbe quindi condurre a circa il 10% di risparmio di carburante^[2].

Tra tutte le sorgenti di energia di scarto che esistono in un motore a combustione interna, la soluzione migliore per l'inserimento di un dispositivo termoelettrico è il suo posizionamento nel tubo di scarico. La ragione principale è dovuta sia alle temperature più elevate sia al maggior tasso di potenza termica che passa per esso. Inoltre le applicazioni di questo dispositivo prima del catalizzatore non sono consigliate perché potrebbe influenzarnee il corretto funzionamento e quello della sonda ad ossigeno.

Il generatore utilizzato è sempre di tipo TEG e viene quindi disposto nel tubo di scarico del veicolo così da sfruttare i gas caldi provenienti dal motore così come mostrato di seguito:



Fig. 1.3.7: disposizione del generatore nel tubo di scarico

Utilizzando automezzi pesanti, con sistemi di questo tipo, è possibile ottenere quasi 1 Kw di potenza utile.

Come si è potuto vedere l'energy harvesting che sfrutta il calore presenta notevoli applicazioni.

La limitazione di questi dispositivi, tuttavia, sta nella natura termodinamica dei processi su cui si basa la tecnologia in questione. Risulta perciò necessario, laddove consentito, porre questi dispositivi dinnanzi gradienti termici quanto più alti possibile per ottenere rendimenti e potenze maggiori.

1.4 Energia cinetica

L'energia cinetica derivante dalle vibrazioni di un oggetto può anch'essa essere soggetta ad *energy harvesting*.

Malgrado queste applicazioni siano di modesta potenza è opportuno comunque fare qualche esempio, data la grande varietà di sistemi elettromeccanici messi a punto.

Essi sfruttano tutti le piccole vibrazioni nell'ambiente circostante, domestico o cittadino, come riportato in tabella sottostante.

	Accelerazione	Frequenza di
	di picco $\left(\frac{m}{s^2}\right)$	picco (Hz)
Vano motore auto	12	200
Base frullatore	10	70
Cruscotto auto	3	13
Telaio di una porta	3	125
Finestra su strada trafficata	0,7	100
Piccolo forno a micro-onde	2,5	125

Tab. 1.4.1: Caratteristiche di fonti di vibrazione in ambito domestico.

In particolare, si tratta per la maggior parte di sistemi a massa inerziale, che sfruttano le oscillazioni di una massa sismica per produrre energia. In questa sezione sa fa riferimento a generatori elettromagnetici (*fig. 1.4.1*), che sfruttano il principio di induzione: la massa oscillante si muove all'interno di un campo magnetico generato da un magnete permanente, così nella bobina agganciata alla massa sismica viene indotta un differenza di potenziale.

Un dispositivo del tipo su descritto può essere studiato facilmente come un convenzionale sistema del secondo ordine massa-molla-smorzatore. Esso è quindi schematizzabile con una massa, un elemento elastico che collega la massa al supporto rigido e un elemento smorzante che tiene conto delle perdite di energia meccanica sia per via degli attriti che per i trasferimenti di energia.

Il contenitore del dispositivo è vincolato rigidamente alla fonte di vibrazioni e per le applicazioni più comuni si può considerare il generatore molto più piccolo e leggero del sistema vibrante che lo eccita, cosicchè, si possa assumere che la massa del generatore

subisca spostamenti istantanei da parte del sistema e che l'influenza della massa m sulla dinamica del sistema ambiente sia trascurabile^{[3].}



Fig. 1.4.1: Sistema di un generico generatore eccitato dalla base

Riferendosi alla figura sopra, può facilmente essere imposta l'equazione differenziale di governo del sistema^[4]:

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) = 0. \tag{1.4.1}$$

Moltiplicando ambo i membri per \dot{x} , e arrangiando i termini si ottiene l'equazione di conservazione della potenza:

$$k(x-y)\dot{y} + c(\dot{x}-\dot{y})\dot{y} = c(x-\dot{y})^2 + \frac{1}{2}\frac{d}{dt}[m\dot{x}^2 + k(x-y)^2].$$
(1.4.2)

L'equazione (5) può poi essere risolta sia per lo spostamento assoluto della massa sismica sia per quello relativo alla base. Nell'ultimo caso, come più comunemente viene fatto, ponendo z = (x - y) e lo spostamento della base $y(t) = Ysin(\omega t)$, ci si riduce a:

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = m\omega^2 Y sin(\omega t), \qquad (1.4.3)$$

La cui soluzione risulta:

$$z = Z \sin(\omega t - \varphi), \text{ con } Z = \frac{m\omega^2 Y}{\sqrt{(k - \omega^2 m)^2 + c^2 \omega^2}}, \qquad (1.4.4)$$

 $\cos \varphi = tan^{-1}(c\omega/k - \omega^2 m).$

La potenza istantanea assorbita ($c\dot{z}^2$), e media risultano rispettivamente^[5]:

$$P_{ist} = c\omega^2 Z^2 \cos^2(\omega t - \varphi) \tag{1.4.5}$$

e

$$P_{avg} = 0.5c\omega^2 Z^2 = \xi m\omega_n \omega Z^2 = \frac{m\xi Y^2 (\omega/\omega_n)^2 \omega^3}{(1 - (\omega/\omega_n)^2)^2 + (2\xi\omega/\omega_n)^2}$$
(1.4.6)

Viene qui introdotto il fattore ξ , noto come fattore di smorzamento, che per un sistema come quello di figura assume la forma:

$$\xi = \frac{c_m R + BL^2}{2R\sqrt{km}} = \frac{c_m}{2\omega_n m} + \frac{BL^2}{2\omega_n m}$$

Ammettendo di eccitare il sistema con la sua pulsazione naturale e arrangiando fattori dell'equazione :

$$P_{avg} = \omega_n^3 m Y^2 / (4\xi). \tag{1.4.7}$$

Tenendo conto poi che la potenza utile è solo quella relativa alla parte elettrica e ponendo $\xi = \xi_m + \xi_e$, l'espressione della potenza media utile, trascurando le perdite del circuito elettrico, risulta:

$$P_{avg,el} = \frac{\xi_e \omega_n m Y^2}{4(\xi_e + \xi_m)^2} \quad . \tag{1.4.8}$$

Esempi di risultati sono riportati in figura 1.4.2.



Fig. 1.4.2: Grafico della potenza di un generatore elettromagnetico per diversi valori di smorzamento.

Un sistema di questo tipo, piccolo e caratterizzato da un funzionamento semplice, può risultare molto versatile; può essere impiegato in spazi angusti o difficilmente accessibili, dove sarebbe complicato ricorrere a batterie per l'alimentazione di dispositivi elettronici.

Esistono anche altre configurazioni di generatore elettromagnetico, ma malgrado le differenze costruttive essi ricadono nella tipologia a massa sismica e, pertanto, il loro funzionamento ricalca quanto sopra descritto.

Accanto ai generatori elettromagnetici esistono una serie di altri generatori però elettrostatici.

In generale anch'essi sfruttano le sorgenti vibratorie e la conversione in energia elettrica avviene tramite l'ausilio di condensatori.

I modi di operare sono due: il primo consiste nel mantenere costante la carica immagazzinata nel condensatore, mentre il voltaggio varia in maniera inversamente proporzionale alla variazione di capacità; invece, nel secondo, la tensione ai capi della capacità è mantenuta costante, mentre la carica immagazzinata varia proporzionalmente alla variazione di capacità.

La trasduzione avviene grazie alla forza elettrostatica che si oppone alla variazione della distanza tra le facce del condensatore.

Esistono tre possibile configurazioni, e tutte sono in grado si lavorare sia a voltaggio costante che a carica costante. L'approccio con voltaggio fissato offre generalmente più energia, tuttavia è molto più difficile da ottenere e comunque, ponendo nell'*energy*



harvester più condensatori in parallelo, è possibile colmare questa differenza di prestazione e avere un funzionamento meno problematico.

La *figura 1.4.3 a)* presenta una configurazione chiamata "inplane overlap varying", grazie alla quale si ottengono una serie di condensatori a capacità variabili, disposti sullo stesso piano e con le capacità fuori fase di 180°.





generatori elettrostatici.

Meninger et al.^[6] costruirono un modello in grado di ottenere 8μ W ad un frequenza di 2.5kHz, che non è così poco considerando che le dimensionidi questi generatori elettrostatici è piccola e la distanza tra le piastre dei condensatori può essere nell'ordine dei nm o μ m.

La *figura 1.4.3 b)* invece presenza un modello simile, dove però la direzione di movimento delle piastre è differente e prende il nome di "in-plane gap closing". Despesse^[7] studiò un dispostivo di questo tipo 18cm x 1cm di volume e 0.104kg, in grado di produrre una potenza notevolmente superiore alla configurazione a) : ben 1054 μ W ad una frequenza di eccitazione di 50Hz.

Il modello *c*) invece ha funzionamento simile alle altre due categorie, ma presenta diverse criticità ed pertanto accantonato in favore delle altre due configurazioni.

Un esempio invece più interessante e curioso consiste in uno zaino sul quale vengono montati dei generatori elettromagnetici in grado di recuperare energia dall'oscillazione dello stesso durante il trasporto. Lo zainetto è realizzato disaccoppiando il carico dalla struttura indossata, con delle molle (*Fig. 1.4.5*).

Lo scopo è quello di ridurre la sensazione di sforzo dell'utente e al tempo stesso ricavare energia. Disaccoppiando il carico, esso non è più costretto a seguire i movimenti dell'intelaiatura.

Quando il carico si muove, un magnete permanente passa attraverso una serie di avvolgimenti generando una corrente indotta.

Una persona media, mentre cammina, sposta ciclicamente il busto in alto e in basso di 5cm per ogni passo. Se si progettasse lo zaino con frequenza di risonanza vicina a quella del camminare, si potrebbe estrarre maggiore energia ma l'utente proverebbe una sensazione di sforzo maggiore.

Diversi fattori influenzano il fattore di smorzamento ottimale che consente di ricavare la massima potenza: velocità dell'andatura, altezza del soggetto, massa del carico, costante della molla, caratteristiche del generatore e frizione tra le parti.

Questo zaino riesce ad accumulare circa 7,4W con un carico compreso tra i 20 e i 40 kg.



Fig.1.4.5: zaino con generatori elettromagnetici^[8]

Il campo dell'energy harvesting che sfrutta le vibrazioni non si esaurisce solo con i generatori elettromagnetici o elettrostatici: le vibrazioni sono infatti le fonti su cui probabilmente si basano il maggior numero di *energy harvester*. Altre applicazione verranno illustrate nelle sezione seguente e sfruttano materiali piezoelettrici. Come però già evidenziato all'inizio di questa trattazione sull'*energy harvesting* da vibrazioni, il limite di questi dispositivi sta nel fatto che le potenze prodotte sono estremamente basse, nell'ordine dei μ W o, al massimo, mW. Ciò restringe quindi notevolmente il campo di applicazione a piccoli dispositivi elettronici dai bassi consumi.

1.5 Piezoelettricità

L'effetto piezoelettrico fu scoperto da Pierre e Jacques Curie nel 1880. Venne infatti dimostrato come certi tipi di cristalli soggetti ad una sollecitazione meccanica, sprigionassero una carica elettrica, di intensità proporzionale alla sollecitazione subita. Viceversa, questi materiale venivano deformati se sottoposti ad un campo elettrico.

Il funzionamento di un cristallo piezoelettrico è quindi abbastanza semplice: quando viene compresso oppure teso, si posizionano sulle facce opposte cariche di segno opposto. Il cristallo si comporta come un condensatore al quale è applicata una differenza di potenziale. Se le due facce vengono collegate tramite un circuito esterno, viene generata una corrente, chiamata corrente piezoelettrica. Al contrario, quando viene applicata una differenza di potenziale al cristallo esso si espande o si contrare.

I materiali piezoelettrici sono disponibili in diverse forme che includono i monocristalli (quarzo), i materiali ceramici e polimerici, come il poly-vinylidene-fluoride (PVDF), dotati di ottime qualità.



Fig. 1.5.1: Effetto piezoelettrico diretto ed inverso.

Tipicamente i materiali piezoelettrici presentano caratteristiche di anisotropia, cosicché le proprietà del materiale differiscono a seconda della direzione di applicazione della forza o del campo elettrico che sollecita il materiale.

Ogni materiale piezoelettrico è quindi caratterizzato da una direzione di polarizzazione lungo la quale gli effetti piezoelettrici si manifestano in misura maggiore o inferiore. Per tenere conto di ciò viene introdotto un coefficiente d_{ij} (*Tab. 1.5.1*) con unità di misura C/N, che esprime sia la direzione con il quale si sollecita il materiale, sia la bontà della direzione scelta. In genere per la maggior parte dei dispositivi si scegli di lavorare con un d_{33} oppure d_{31} . Per meglio esemplificare questo concetto si può far riferimento alle figure qui a fianco:

La modalità 33, è usato quando la forza è lungo l'asse 3 ed è impressa sulla stessa superficie su cui è raccolta la carica; La modalità 31, è usato quando la carica è raccolta sulla stessa superficie di prima, ma la forza è applicata perpendicolarmente. In generale, il modo 31 è quello più utilizzato, nonostante presenti un coefficiente di accoppiamento inferiore al 33^[9].

Un'altra costante rilevante, che contribuisce alla quantità di energia elettrica producibile, è il coefficiente di accoppiamento elettro-meccanico k_{ij} . Esso descrive l'efficienza con cui l'energia è convetita dal materiale tra energia elettrica e meccanica in una direzione data e trova la forma:

$$k_{ij} = \frac{W^{e}_{i}}{W^{m}_{j}}.$$
 (1.5.1)

Dove W^{e}_{i} è l'energia elettrica immagazzinata secondo l' i-esimo asse, mentre W^{m}_{j} è l'energia meccanica in input sul j-esimo asse.

L'efficienza di conversione, η , per un elemento piezoelettrico sollecitato in compressione alla sua frequenza di risonanza^[10] è data dalla seguente formula, la quale indica come essa dipenda fortemente da k e dipenda anche da Q, che fattore di qualità del generatore.



Fig. 1.5.2: a) polarizzazione b) modalità 33 c) modalità 31

$$\eta = \frac{\frac{k^2}{2(1-k^2)}}{\frac{1}{Q} + \frac{k^2}{2(1+k^2)}}$$
(2)

Alcuni studiosi hanno inoltre rilevato come in realtà l'efficienza sia massima per frequenze di sollecitazione diversi ordini di grandezza inferiori a quella di risonanza^[11]. Inoltre, è stato anche trovato che l'efficienza cresce col crescere della forza e la resistenza del carico, ma questi fattori sono comunque meno significativi della frequenza.

Property	PZT-5H	PZT-5A	BaTiO ₃	PVDF
$d_{33} (10^{-12} \text{ C N}^{-1})$	593	374	149	-33
$d_{31} (10^{-12} \text{ C N}^{-1})$	-274	-171	78	23
$g_{33} (10^{-3} \text{ V m N}^{-1})$	19.7	24.8	14.1	330
$g_{31} (10^{-3} \text{ V m N}^{-1})$	-9.1	-11.4	5	216
k ₃₃	0.75	0.71	0.48	0.15
k31	0.39	0.31	0.21	0.12
Relative permittivity ($\varepsilon / \varepsilon_o$)	3400	1700	1700	12

Tab 1.5.1: Valori dei coefficienti piezoelettrici per alcuni materiali^[12].

Passiamo adesso a mostrare alcuni esempi di dispositivi piezoelettrici utilizzati per l'*energy harvesting*. Essi si differenziano per il modo in cui viene sollecitato il materiale; ciò da origine ad una categoria, che lavora nel modo 33, detta ad impatto, ed un'altra, che invece lavora nel modo 31, ed è più adatta a sfruttare le vibrazioni ambientali piuttosto che trarre energia degl'urti. Un'apparecchiatura pensata per agire nel modo 33 solitamente presenta una struttura a pila che viene compressa che,a causa dell'elevata durezza dei materiali piezoelettrici, presenta una frequenza di risonanza elevata, lontana dalle frequenze vibrazionali presenti nell'ambiente. Pertanto risulta inutilizzabile per sfruttare tali sorgenti vibratorie. Essa dunque viene accantonata in favore di configurazioni, come quella della trave a sbalzo, che permettono una sua utilizzazione con le frequenze proprie dell'ambiente (sezione 1.3, tab.1.3.1) e che utilizzano il modo 31.



Fig. 1.5.3: scarpa dotata di generatore piezoelettrico.

L'esempio più famoso, che risiede nella categoria ad impatto, è la scarpa dotata nel tallone di un dispositivo in grado di tramutare l'energia scaturita dall'impatto a terra del piede in energia elettrica. (*fig.* 1.5.3)

Studi hanno dimostrato che mediamente un uomo di 68kg produce nel camminare un energia pari a 67 W al tallone della scarpa^[13].

Dunque è chiaro come questa sorgente di energia possa essere sfruttata e consenta un'opportunità per l'*energy harvesting*. Il limite della tecnologia piezoelettrica e l'efficienza della conversione di energia hanno poi suggerito che almeno 1.27 W possano essere recuperati con dispositivi di questi tipo. Malgrado sia molto bassa rispetto al totale, può risultare comunque utile per applicazioni che coinvolgono la ricarica delle batterie di un telefonino, di un lettore mp3 o di un dispositivo elettronico simile. Sono stati messi a punto anche altri modelli di generatori ad impatto, che però risultano di performance abbastanza scarse.

I generatori che sfruttano le vibrazioni risultano invece più interessanti non tanto in quanto a potenza prodotta ma perché, in analogia con quanto detto per i generatori di tipo elettromagnetico, permettono un maggior campo di applicazione e una maggior quantità di sorgenti sfruttabili.

Come accennato prima essi sono solitamente modellabili come una trave a sbalzo (*Fig.* 1.5.6 a), *b*)).



Questo tipo di struttura ha una frequenza di risonanza bassa che dipende dalla geometria dell'asta.

Il "*cantiveler resonator*" consiste in una o due strisce di materiale piezoceramico, connesse su un substrato metallico saldamente fissato al contenitore del dispositivo. Una massa vibrante è collegata all'estremità libera dell'asticella e consente l'instaurarsi delle vibrazioni grazie alla sua inerzia. Se gli strati di piezoelettrico sono due, la struttura viene detta bimorfa e le due strisce possono essere collegate in serie o in parallelo in funzione delle specifiche progettuali. Se c'è un solo strato, invece, la struttura viene detta monomorfa.

Il *cantilever resonator* ha il difetto di essere efficiente alla sola frequenza di risonanza. Per arginare questo difetto si cerca di costruire sistemi adattativi, in grado di sintonizzarsi alla frequenza dominante dello spettro. Un'altra soluzione è utilizzare più risuonatori, accordati a frequenze diverse; in alternativa un modo più economico, che consente di ottenere prestazioni simili (esempio in *figura 1.5.7*), utilizza un singolo risuonatore sul quale sono applicate tre masse vibranti che permettono l'instaurarsi di un numero superiore di armoniche^[14].



Fig. 1.5.7: risuonatore a tre masse.

Bisogna comunque sottolineare come la potenza di questi dispositivi sia contenuta: per questo tipo di modelli le potenza prodotte vanno dai μ W ai mW.

Le dimensioni molto contenute li rendono ideali per applicazioni elettroniche, tanto che nuove configurazioni sono oggetto di nuove proposte.

1.6 - Energia idraulica ed eolica

Quando si parla di energia idraulica come fonte per energy harvesting, non si può fare a meno di citare l'ormai famoso mini-hydro.

Con questo termine si intendono tutte le tecniche per utilizzare l'energia di piccoli corsi d'acqua e bacini idrici troppo piccoli per permettere l'installazione di impianti idroelettrici convenzionali. Questa tecnologia permette poi, a differenza di alcuni casi mostrati in precedenza, una potenzialità più elevata in termini di produzione di energia elettrica.

Normalmente viene data una diversa nomenclatura a tali applicazione in base alla potenza prodotta:

- pico-idroelettrico P< 5 kW
- micro-idroelettrico P<100 kW
- mini-idroelettrico P< 1.000 kW



Fig. 1.6.1: Turbina pelton

In linea teorica, non cambia nulla dal funzionamento di una grande centrale: le turbine idrauliche utilizzano l'energia potenziale posseduta da una massa d'acqua tra un dislivello, detto salto, esistente tra le due sezioni di pelo libero superiore (di monte) ed inferiore (di valle).

La trasformazione dapotenziale in energia meccanica dell'acqua a energia vviene per mezzo di turbine, messe in rotazione dalla massa di acqua che transita al loro interno. A sua volta la potenza meccanica all'asse della macchina può essere impiegata direttamente per compiere lavoro oppure per produrre energia elettrica collegando l'asse della turbina ad un alternatore.

La potenza ottenibile da una turbina idraulica viene espressa dalla seguente equazione:

$$P = \eta g Q H,$$

dove:

- P = potenza espressa in kW.
- η = rendimento globale dell'impianto.
- $g = accelerazione di gravità espressa in m/s^2 (pari a 9,81 m/s^2).$
- Q = portata d'acqua espressa in m^3/s .
- H = salto o dislivello espresso in m.

Cambiano però ovviamente la taglia delle macchine e l'architettura degli edifici che devono ospitare la turbina, in quanto è necessario inserirli anche in luoghi poco agevoli e in spazi molto più ridotti.

Generalmente vengono utilizzate turbine di tipo *Pelton (fig. 1.6.1)*, macchine ad azione nelle quali l'energia potenziale gravitazionale del fluido viene interamente trasformata in energia cinetica nella parte fissa della macchina, che consiste in un ugello, dal quale esce un getto ad alta velocità che va ad impattare su di una palettatura a doppio cucchiaio.

Questo tipo di turbine vengono di solito preferite in quanto sono adatte a sfruttare portate modeste e salti più elevati, come nei piccoli torrenti montani. Tuttavia la scelta della turbina viene effettuata di volta in volta in base ai dati di progetto.

I passi avanti in questa tecnologia risultano essere decisamente importanti: la risorsa idrica è una fonte di energia sicura in quanto inesauribile.

Come ogni risorsa naturale è intermittente, ma sul lungo periodo comunque affidabile, almeno in paesi dove le risorse idriche sono comunemente stabili.

A tutto ciò occorre aggiungere che l'idroelettrico gode di una comprovata tecnologia e queste applicazioni di piccola taglia sono estremamente utili in quanto permettono di rendere energicamente indipendenti o, comunque, di integrare l'apporto di energia elettrica necessario a piccole comunità isolata.

Le applicazioni di mini-hydro sono poi a basso impatto ambientale: a differenza degli impianti più grandi, sono spesso integrati con l'ambiente, poco ingombranti e ad ampio potenziale di diffusione nel territorio.

Soprattutto sono una soluzione per poter aumentare la quota di energia idroelettrica, in un paese che ha già saturato i bacini più grandi.

Parlando sempre di energia generata grazie all'acqua, ma spostandosi dai torrenti al mare, sempre numerosi sono gli esempi di dispositivi ideati per la generazione di energia elettrica.

Generalmente qui vengono sfruttate le correnti marine, il moto ondoso o le maree. Le potenze in gioco sono sicuramente più elevate rispetto ai piccoli *energy harvester* piezoelettrici o termoelettrici illustrati in precedenza.

Iniziamo con un dispositivo che sfrutta le correnti marine, ma che può essere utilizzato anche sfruttando semplicemente il vento: *l'energy harvesting eel*^[15] (fig. 1.6.2).

Il congegno è costituito da un'intelaiatura che alla sua sommità sopporta un'asta alla quale sono agganciate tante strisce di materiale piezoelettrico.

Le strisce sono precedute da un corpo sul quale incide la corrente fluida, grazie al quale vengono generati dei vortici che hanno il compito di metterla in ondulazione ad una certa frequenza, così da poter generare una tensione alternata. Ogni striscia, è composta da diversi strati. Tipicamente è un striscia bimorfa dove lo strato di supporto centrale è costituito da un materiale flessibile, progettato in modo da non ostacolare il movimento ondulatorio.



Fig. 1.6.2: Energy harvesting eel.

La potenza elettrica prodotta dal dispositivo è data da:

$$P = \frac{\eta A \rho V^3}{2} , \qquad (1.6.1)$$

con:

- A= area della sezione della striscia.
- V= velocità della corrente.
- ρ = densità della corrente.
- η = rendimento del dispositivo, che dipende dalle perdite nel circuito di accumulazione, dal materiale piezoelettrico e dalla frequenza di oscillazione.

Un dettaglio del funzionamento è offerto dalla figura sotto riportata (fig. 1.6.3):



Fig. 1.6.3: dettaglio della striscia dell'energy harvesting eel.

La modifica dell'ostacolo e del numero di Reynolds permettono di variare la frequenza del distacco dei vortici e quindi dell'ondulazione della striscia.

Un dispositivo di questo tipo può estrarre una potenza che varia tra i mW ed alcuni W a seconda delle condizioni operative, come la velocità della corrente e la frequenza di oscillazione.

Passiamo ora ad analizzare un altro brillante esempio di *energy harvesting*^[16].

Come il precedente sfrutta i vortici di Von Kàrman e le fluttuazioni di pressione che essi generano per far muovere alternativamente un dispositivo piezoelettrico inserito opportunamente all'interno di una tubazione.

Il dispositivo consiste in un condotto dove viene fatta fluire dell'acqua, o in generale un qualsiasi fluido, all'interno del quale è posizionato un corpo tozzo che è responsabile per la generazioni dei vortici.

Un film di materiale piezoelettrico (PVDF) è incollato ad una protuberanza in modo da costituire una tipica configurazione a trave a sbalzo (*fig. 1.6.4 a*). A sua volta il bulbo è agganciato ad un diaframma flessibile, posizionato dietro l'ostacolo, cosicché essa sia in grado di muoversi in direzione verticale a causa delle fluttuazioni di pressione causate dai vortici.



Fig. 1.6.4: Schema di funzionamento dell'energy harvester.

Quando la pressione è massima il diaframma si inflette verso l'alto raggiungendo una posizione di massimo e inducendo a sua volta una flessione nel materiale piezoelettrico (*fig. 2.4.4 b, c*).

Quando invece la pressione decresce, il diaframma si abbassa scaricando il film piezoelettrico e raggiungendo man mano la posizione di minimo (*fig. 2.4.4 d, e*).

Così facendo il materiale viene sollecitato alternativamente con una certa frequenza rendendo possibile un recupero di energia.

Per questo esperimento, la velocità del flusso è stata misurata di 1.083m/s per un numero di Reynolds, calcolato sul perimetro bagnato, di 1.64×10^4 .

La pressione varia con un'ampiezza di circa 0.3 kPa con una frequenza di 52Hz.

Il film di materiale piezoelettrico subisce oscillazioni di circa 20 µm grazie al quale si genera una tensione alternata il cui di voltaggio con valore picco-picco di 120 mV.

Per questo dispositivo, ingegnoso ed interessante, è stata calcolata una potenza di 0.7 μ W con un carico di 655 k Ω .

La potenza è molta bassa, tuttavia bisogna tenere in considerazione le piccole dimensioni del dispositivo e l'eventuale possibilità di utilizzare un materiale con costante



piezoelettrica più elevata. Inoltre per l'esperimento sopra descritto non si è lavorato in condizioni di risonanza, facendo coincidere la pulsazione naturale della struttura con quella del distacco dei vortici, attraverso la quale la potenza in output potrebbe essere notevolmente aumentata.

Fig.1.4.6^{[17]:}A)boa; B)generatore; E) carico Un altro genere di energy *harvester*, in *fig. 1.4.6*, forse più noto, sfrutta invece il moto ondoso anziché la vorticità indotta da un ostacolo.

Una configurazione tipica è la seguente: una boa viene ancorata al fondale ed esposta al moto ondoso.

Grazie agli spostamenti della boa, un magnete viene fatto scivolare all'interno di una bobina, ottenendo così energia elettrica. La particolarità di questi la grande potenza, ,nell'ordine anche della decina dei kilowatt, che li contraddistingue da tutti quei piccoli dispositivi visti in precedenza.

Infine questo capitolo si conclude con un ultimo congegno, che per certi versi presenta notevoli somiglianze con quello oggetto di questa tesi.

Il nome di questo dispositivo è windbelt, ed è rappresentato in *figura 1.6.7*:



Fig.1.6.7: windbelt

Come si può notare, il dispositivo è di piccole dimensioni e consiste in una striscia di materiale plastico messo in oscillazione dal vento. Sul lato destro di questa figura si notano due avvolgimenti tra i quali è posizionato un magnete, attaccato alla cintura plastica, che muovendosi con una certa frequenza tra le due spire, vi induce una tensione.

Le potenze sono piccole, nell'ordine dei mW, ma l'idea è sicuramente interessante. Con questo ultimo esempio si conclude la panoramica sui principale dispositivi e sui metodi sul quale si fonda l'*energy harvesting*. La sezione seguente tratterà specificamente del modello di *energy harvester* oggetto di questa tesi.

1.7 Applicazioni di materiali polimerici

Recentemente stanno destando molto interesse una serie di materiali polimerici dotati di avere un'interessante proprietà: se sottoposti ad un campo elettrico subiscono una deformazione; viceversa se sottoposti ad una sollecitazione meccanica generano una carica. Le qualità di questi polimeri, detti elastomeri dielettrici, sono per lo più utilizzate per la creazione di attuatori^[18] dalla risposta molto rapida, ma, meno note, sono tuttavia le loro eccellenti doti per la realizzazione di generatori, che li rendono ideali per applicazioni di energy harvesting. Tra i principali vantaggi si elenca un'alta densità di energia, un basso costo e la capacità di adattarsi all'impiego per i quali vengono utilizzati. Un trasduttore fabbricato con questa tecnologia generalmente è costituito da uno film di polimero, anche di spessore molto ridotto, compreso tra due elettrodi paralleli tra loro. Gli elastomeri dielettrici, se usati come attuatori, convertono l'energia elettrica in energia meccanica perché il campo elettrico, che viene esercitato per ottenere questo obbiettivo, induce su di essi una deformazione con risposte rapide. Viceversa, se vengono utilizzati come generatori, la sollecitazione meccanica provoca un accumulo di carica sul film polimerico nella regione sollecitata. Il meccanismo di funzionamento di base è illustrato in *figura* 1.7.1:



Fig. 1.7.1: Meccanismo base di un elastomero dielettrico nella modalità generatore

Gli elastomeri dielettrici si comportano elettricamente come un condensatore a capacità variabile. La capacità C può essere espressa con l'usuale formula:

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 A / z, \tag{1.7.1}$$

dove:

- ε_0 è la permettività dielettrica del vuoto.
- ε la permettività relativa del materiale.
- A è l'area del film.
- z è lo spessore.

Sia z che A dipendono dalla sollecitazione del materiale, e il volume del materiale (P=Az) rimane costante durante la deformazione.

L'energia elettrica, E, accumulata sul film può essere calcolata con le formule note per i condensatori:

$$E = 0.5CV^2 = 0.5Q^2C = 0.5QV = 0.5Q^2P/(\varepsilon\varepsilon_0A^2) , \qquad (1.7.2)$$

$$V=Q/C=QP/(\varepsilon\varepsilon_0 A^2) \quad , \qquad (1.7.3)$$

in cui:

- Q è la carica accumulata sul condensatore,
- V è il voltaggio ai capi di esso.

Il voltaggio e l'energia sul film dipendono dal carico elettrico; se invece, come avveniva per i piezoelettrici (sez. 1.3), la carica non viene rimossa rimanendo costate sul film, si ottiene che il voltaggio varia in maniera inversamente proporzionale al quadrato dell'area. Questa condizione operativa risulta più facilmente ottenibile.

Queste semplici formule teoriche si accordano bene con la realtà, tant'è vero che dagli esperimenti risulta che il valore di voltaggio calcolato con (4) è molto simile a quello trovato sperimentalmente (*fig. 1.7.2*).



Fig.1.7.2: Confronto tra teoria e dati sperimentali.

L'energia che può essere estratta impiegando questi polimeri risulta molto significativa: la densità di energia per elastomeri siliconici è stimata intorno ai 0.75 J/g, contro i 0.13 J/g per i più avanzati materiale ceramici e i 0.4 j/g per elastomeri acrilici. Anche se non ancora dimostrato sperimentalmente, tuttavia si pensa che la densità di tale energia possa arrivare facilmente a 1.5 j/g^[19].

Un altro parametro rilevante è la densità di potenza. L'aspetto interessante degli elastomeri dielettrici è la buona densità di potenza anche a frequenze operative basse,
CAPITOLO 1. INTRODUZIONE E STATO DELL'ARTE

permettendone l'utilizzo anche per impieghi più blandi e ponendoli nella sfera di interesse per l'*energy harvesting*.

Gli elastomeri acrilici operano al frequenza compresa tra i 10-50 Hz con una densità di potenza, a seconda dei casi, di 2-20 W/g, ma, a causa di perdite viscoelastiche, non possono lavorare a frequenza superiori. Gli elastomeri a base di silicone, invece, presentano caratteristiche migliori con perdite viscoelastiche intorno al 5-20% ed efficienze di circa l'80-90% con potenzialità ancora maggiori rispetto a quelli acrilici.

Parliamo ora delle possibili applicazioni di questi moderni materiali.

La *tabella 1.7.1* mette in luce vari campi di applicazione con vantaggi e svantaggi resi da questa tecnologia.

Generator	Competing Technology	DE Potential Advantage	DE Potential Disadvantage	Comments
Engine-driven generators	Electromagnetics	Higher energy density, lower cost, good low speed performance, higher temperature performance	Electronic cost and weight (very small engines)	Electronics are probably not an issue for large engine applications
Shoe generators	Electromagnetics, Piezoelectrics	Low cost, good load matching eliminates much mechanical complexity; lightweight; high energy density	Electronics more complex than electromagnetics	Demonstrated 0.28 J energy/stroke generation in heel- size device (not including electronics)
Parasitic energy harvesting for remote sensors	Electromagnetics, piezoelectrics	Good load matching to some available energy sources enables simpler designs; lower cost	Electronic cost an issue for some applications	Remote sensing can eliminate wires and potentially reduce cost for a number of applications, but power sources are currently limited
Wave energy	Electromagnetics	Good matching to load; low cost materials	Water compatibility unresolved	Water compatibility can probably be achieved with protective layers

Tab. 1.7.1: Potenziali applicazioni per elastomeri dielettrici

Rispetto agli avversari nel settore, che sono principalmente generatori piezoelettrici ed elettromagnetici, gli elastomeri presentano una maggiore densità di energia e un funzionamento migliore a basse frequenze. Sono materiali poco costosi e il loro rapporto qualità prezzo è decisamente migliore rispetto a costosi cristalli ceramici piezoelettrici.

CAPITOLO 1. INTRODUZIONE E STATO DELL'ARTE



Fig. 1.7.3: Scarpa con generatore munito di elastomero

Un esempio pratico, già citato in precedenza, è l'utilizzo di questi materiali per creare un generatore montato sotto la suola di una scarpa (*figura 1.7.3*).

In questa maniera possono essere recuperati da 1-5 J per passo, con dispositivo semplice, leggero e poco costoso.

Gli elastomeri sono però impiegati anche in applicazioni potenza decisamente elevata: vengono infatti sfruttati in dispositivi marini che sfruttano le oscillazioni generate dalle



Fig. 1.7.4: *Boa dotata di generatore con elastomero.*

onde.

La boa mostrata in figura 1.5.4 è costituita da un pistone nel quale è inserito l'elastomero.Il movimento ondulatorio indotte dal mare costringe il pistone a comprimere il materiale polimerico generando così energia per un ammontare stimato di circa 60 kW.

Le potenzialità di questi materiale, ancora in fase di studio, e certamente non ancora giunti ai

limiti delle proprie potenzialità, sta aprendo la strada a nuove soluzioni che, in termini di potenza, possono risultare più soddisfacenti rispetto a tutti gli altri dispositivi mostrati in precedenza in questa panoramica sull'*energy harvesting*.

Capitolo 2

L'oggetto di questa tesi

2.1 Descrizione del dispositivo e risultati sperimentali

L'oggetto di questa tesi riguarda lo studio di un *energy harvester*, mediante simulazione dinamiche 2D al calcolatore.





Fig. 2.1.1 a) : prima configurazione.

Fig. 2.1.1 b) : seconda configurazione.

Il dispositivo esaminato viene sottoposto ad un flusso d'aria di velocità nota e può assumere due configurazioni differenti (*Fig. 2.1.1 a*) e *Fig. 2.1.1 b*), ma entrambe con un funzionamento simile: la generazione di energia elettrica avviene per mezzo dell'allungamento di due elastomeri, agganciati ad un'ala, a causa delle forze aerodinamiche a cui è soggetto il congegno.

L'idea nasce dal Professor Corrado Boragno, del DIFI, Università degli studi di Genova il quale sta tutt'ora conducendo esperimenti sul dispositivo rappresentato schematicamente in figura 2.1.1 a).

Nella configurazione da lui studiata, l'ala è tesa tra due supporti mediante due elastomeri e può ruotare sull'asse passante tra di essi senza esercitarvi torsione.

Sull'ala è presente una massa addizionale che può essere spostata lungo la corda così come il punto di attacco degli elastomeri: in questo modo è possibile ottenere configurazioni differenti, ognuna con un diverso comportamento.

L'ala utilizzata è spessa 2mm con una corda di 40mm e uno span di 66mm. I valori della massa dell'ala e della massa addizionale sono rispettivamente di 0.4g e 1.3g.

Negli esperimenti viene impiegata una velocità del vento di 2.7 m/s e dagli stessi viene evidenziato come il dispositivo descritto sia sensibile a un gran numero di parametri (forma dell'ala, posizione degli elastomeri, posizione della massa addizionale, ecc.) e abbia una dinamica estremamente ricca.

Per meglio comprendere il comportamento del dispositivo si faccia riferimento alla *figura* 2.1.2, che ritrae il congegno in azione:



Fig. 2.1.2: Energy harvester in azione.

Durante gli esperimenti si è, inoltre, rilevato che la forma della massa addizionale non ha un effetto rilevante sul comportamento del dispositivo; la stessa cosa non si può dire dei due parametri chiave che regolano il comportamento di questo *energy harvester*: il punto

di attacco degli elastomeri e la posizione della massa addizionata, che sposta il centro di massa del sistema.

La loro variazione permette di esplorare un spazio 2D di parametri che può dar luogo a comportamenti estremamente differenti, più o meno stabili.

L'obbiettivo è quello di trovare una o più configurazioni stabili del dispositivo che permettano di massimizzare l'allungamento degli elastomeri: in questo modo, poiché l'energia estraibile da essi è direttamente proporzionale alla deformazione esercitata (*Vedi Cap. 1, sez. 1.7*), si otterrà una maggior potenza utile.

Di seguito si riportano dati relativi agli esperimenti condotti dal Professor Boragno che mostrano alcuni andamenti di parametri d'interesse del dispositivo.

La *figura 2.1.2* mostra il valore in Volt del segnale ottenuto dagli elastomeri durante il funzionamento del dispositivo in diverse configurazioni:



Fig. 2.1.3: Andamento delle oscillazione e del segnale in uscita prodotto dall'energy harvsester.

Le configurazioni attuabili, come facilmente intuibile, sono molteplici e tutte identificate sia dalla posizione della massa addizionale sia dal punto di attacco degli elastomeri.

A titolo di esempio vengono di seguito riportati risultati relativi a diverse configurazioni (*fig. 2.1.4, 2.1.5, 2.1.6, 2.1.7*), dove vengono evidenziate l'ampiezza delle oscillazioni e la traiettoria che assume il centro di massa:



Fig. 2.1.4: esempio 1.



Fig. 2.1.5: esempio 2.



Fig. 2.1.6: esempio3.



Fig. 2.1.7: Esempio 4.

I dati relativi a questo dispositivo sono interessanti ed il metodo impiegato per raccogliere energia sicuramente originale.

Gli esempi riportati attestano una notevole sensibilità alle variazioni dei parametri chiave e la possibilità di esplorare un ampio spazio di configurazione differenti tra di loro.

In questa tesi si cercherà di riprodurre al calcolatore il moto di un dispositivo simile a questo, ma nella configurazione di figura 2.2.1 b), in cui la forza di gravità non fornisce alcun ruolo.

2.2 Configurazione studiata

La *figura 2.2.1* mostra la configurazione dell'*energy harvester* oggetto di studio: L'ala è ruotata di 90° rispetto alla configurazione in figura *2.2.1 a*) e le oscillazioni sono vincolate nel piano x-y e avvengono senza esercitare torsione sugli elastomeri.

Come nel caso precedente, il dispositivo è munito di una massa addizionale, che permette di variarne il baricentro, e di due elastomeri, che posso essere agganciati in differenti punti lungo la corda e che sono concorrenti a due montanti fissi; agli elastici viene inoltre assegnato un pre-stretching, L_1 , indicato in *figura 2.2.2*.



Fig. 2.2.1: Sistema di energy harvester studiato.



Fig. 2.2.2: Vista laterale del dispositivo.



Fig. 2.2.3: Vista dall'alto del dispositivo.

Corda	С	[mm]	40
Span	W	[<i>mm</i>]	W>>C
Spessore	S	[<i>mm</i>]	2
Pre-stretching	L ₁	[<i>mm</i>]	55
Raggio di curvatura	r	[<i>mm</i>]	1
Massa addizionale	m_{add}	[g]	1.3

Le caratteristiche del dispositivo sono riportate nella seguente tabella 2.1.1:

Tab. 2.2.1: caratteristiche del dispositivo.

2.3 Modello dinamico

Lo studio affrontato in questa tesi prevede di riprodurre, mediante simulazioni 2D, il moto dell'energy harvester in *figura 2.1.1 b*).

L'ala è considerata rigida e sottoposta ad un flusso d'aria ($v=1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) uniforme, U, che soffia parallelamente all'asse x.

L'estensione dell'oggetto lungo la direzione z è supposta molto maggiore della corda dell'ala di modo da possa essere giustificata un'analisi bidimensionale del sistema originale nel piano x-y, passante nella sezione mediana dell'ala.

Viene quindi considerato il comportamento della sezione dell'ala giacente sul piano x-y, indicato in rosso in *figura 2.2.1*, soggetta ad un flusso costante d'aria appartenente al piano x-y.

Per meglio comprendere l'impostazione del problema si faccia riferimento alla figura 2.3.1, che ritrae la sezione studiata nel piano d'interesse:



Fig. 2.3.1: dispositivo nel piano di studio.

L'approccio utilizzato per lo studio di questo dispositivo è newtoniano e questo permette di scrivere facilmente la prima equazione cardinale, che tiene conto di tutte le forze agenti sull'ala; si noti che la gravità non ha alcun effetto sulla dinamica del congegno nel piano studiato (agisce perpendicolarmente ad esso) e gli agganci degli elastomeri impediscono all'ala di ruotare nel piano x-z: l'unico effetto, a causa della peso dell'ala, è quello di stirare debolmente gli elastici, ai quali però è assegnato un opportuno pre-stretching.

Le forze in gioco sono quindi solamente la forza aereodinamica e la forza degli elastici e pertanto si può scrivere:

$$\boldsymbol{F}_{el} + \boldsymbol{F}_{fl} = m_{tot} \boldsymbol{\ddot{x}}_{cm} \quad , \tag{2.3.1}$$

dove:

- F_{el} è la forza esercitata dagli elastici.
- F_{fl} è la forza esercitata dal fluido.
- *m_{tot}* è la massa totale del dispositivo pari alla somma della massa addizionata e della massa dell'ala.
- \ddot{x} è l'accelerazione del centro di massa determinato come:

$$X_{cm} = \frac{M_{ala} X_{cm}^{ala} + M_{add} X_{add}}{M_{tot}} \quad , \tag{2.3.2}$$

con x_{cm}^{ala} è il baricentro dell'ala, che, per via della simmetria, sta a metà della corda, e X_{add} è la posizione della massa addizionale.

Per quanto riguarda invece la seconda equazione cardinale, essa può essere scritta:

$$\boldsymbol{\tau}_{el} + \boldsymbol{\tau}_{fl} = I \boldsymbol{\vartheta} \quad , \tag{2.3.3}$$

in cui:

- au_{el} , au_{fl} sono i momenti esercitati dalla forza elastica e dal fluido.
- *I* è il momento di inerzia dell'ala.
- *ÿ* è l'accelerazione angolare.

La forza aereodinamica \mathbf{F}_{fl} è dovuta alle forza viscose e di pressione agenti sulla superficie dell'ala. Questa forza può essere scomposta in due componenti, una perpendicolare alla direzione del flusso, chiamata portanza (lift), e una parallela alla direzione del flusso e con verso opposto, che chiamata resistenza (drag).

Esse possono essere calcolate, per il caso in esame, dalle seguenti relazioni:

$$F_D = 0.5\rho C_D U^2 C \quad e \quad F_L = 0.5\rho C_L U^2 C \tag{2.3.4}$$

dove:

- C_{D} , C_{L} sono i coefficienti di resistenza e di portanza.
- *U* è la velocità del flusso che investe il profilo.
- ρ è la densità del fluido.
- *C* è la corda dell'ala.

Le forze suddette ed i momenti che essi generano sono calcolate dal codice e direttamente utilizzate nella libreria che calcola il moto del corpo rigido.



Fig. 2.3.2: Molla efficace.

Poiché la forza elastica non è compresa all'interno del codice è stato necessario modificarlo in modo da includerne l'effetto.

Per modellizzare la forza elastica è utilizzata una sola molla efficace, che tiene conto della presenza dei due elastomeri.

Si faccia riferimento alla figura 2.3.5, che esplica come viene ricavata la forza della molla efficace: si noti che le componenti lungo y della forza esercitata dagli elastomeri si compensano l'una con l'altra, dando come risultato la molla in rosso.

Occorre tenere poi presente che un elastomero deformato non segue la legge di Hook, ma una più complessa che tiene conto del contributo entropico del polimero:

$$\mathbf{F}_{el} = -k_{el} \left[\frac{|L|}{L_0} - \left(\frac{L_0}{|L|} \right)^2 \right] \frac{L}{|L|} \quad , \tag{2.3.5}$$

dove:

- *k_{el}* è una costante da cui dipende la forza del polimero con unità di misura [N], ed è presa pari 0.22 x 10⁻² N.
- L_0 è la lunghezza a riposo dell'elastico, pari a 40 mm.
- $L=(x, y, L_1)$ è il vettore deformazione dell'elastomero.

Pertanto la forza esercita dagli elastici, di cui si tiene conto tramite la molla efficacie risulta:

$$F_{el}^{eff} = 2 \frac{k_{el}}{\sqrt{x^2 + y^2 + L_1^2}} \left[\frac{\sqrt{x^2 + y^2 + L_1^2}}{L_0} - \frac{L_0^2}{x^2 + y^2 + L_1^2} \right] (x, y) .$$
(2.6)

La (2.6) è l'espressione finale della forza elastica che verrà utilizzata per tenere conto della presenza degli elastomeri.

Ovviamente questa forza è responsabile della creazione di un momento torcente che viene calcolato rispetto al centro di massa del sistema.

Facendo riferimento alla *figura 2.3.1* è possibile estrarre le seguenti relazioni per la posizione di attacco degli elastomeri:

$$x_{el} = x_{cm} - d\cos\vartheta \quad , \tag{2.7}$$

$$y_{el} = y_{cm} - d\sin\vartheta \quad , \tag{2.8}$$

Indicando con α l'angolo che la molla forma con l'orizzontale il momento torcente che viene esercitato dalla molla sarà:

$$\tau_{el} = \left| F_{el}^{eff} \right| (y_{el} - y_{cm}) \cos \alpha - \left| F_{el}^{eff} \right| (x_{el} - x_{cm}) \sin \alpha$$

La determinazione analitica di queste quantità, come prima detto, è importante perché il codice originale tiene conto delle forze e dei momenti esercitati dal solo fluido e non di altre forze. Pertanto è risultato necessario modificare il codice per ottenere uno strumento di calcolo appropriato allo studio del problema.

Il capitolo successivo tratterà della fluidodinamica computazionale e del codice per la risoluzione del problema posto in questa tesi.

CAPITOLO 3

Le equazioni di Navier-Stokes e la fluidodinamica computazionale (CFD)

Il moto di un fluido, a livello macroscopico, viene modellato con le equazioni di Navier-Stokes.

Esse costituiscono un sistema di equazioni alla derivate parziali, che in forma vettoriale e nell'ipotesi di flusso incomprimibile e newtoniano, assumono la forma:

$$\rho \frac{D\boldsymbol{u}}{D\boldsymbol{t}} = -\boldsymbol{\nabla}P + \boldsymbol{f} + \boldsymbol{\mu}\nabla^2\boldsymbol{u} . \qquad (3.1)$$

Dove:

- ρ è la densità del fluido.
- $\frac{D}{Dt}$ è l'operatore derivata materiale e, per un generico vettore **b**, assume la forma $\frac{Db}{Dt} = \frac{\partial b}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \mathbf{\nabla}) \mathbf{b}.$
- **u** è il vettore velocità di componenti (u, v, w).
- P è la pressione.
- **f** sono le forze di volume agenti sul fluido (f_x, f_y, f_z) .
- μ è la viscosità dinamica.

Esse vengono risolte insieme all'equazione di continuità, che, sempre per flusso incomprimibile, in forma vettoriale risulta:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0 \ . \tag{3.2}$$

CAPITOLO 3. LE EQUAZIONI DI NAVIER- STOKES E LA CFD

Poiché le equazioni di Navier-Stokes non sono risolubili analiticamente se non per pochi e semplici casi, è necessario trattarle numericamente al fine di ottenerne una soluzione approssimata, tanto più accurata quanto più è accurato il metodo di calcolo.

3.1- La fluidodinamica computazionale (CFD)

La CFD è quella branca della meccanica fluidi che si avvale di metodi numerici, implementati su calcolatori, per ottenere la soluzione di problemi fluidodinamici, anche complessi, che non troverebbero altrimenti soluzione.

Un dominio fisico continuo viene spezzato in tante regioni più piccole per mezzo di una griglia (mesh) sulla quale vengono calcolate le equazioni discretizzate inerenti al problema da risolvere, in modo da ottenerne una soluzione approssimata.

La CFD è usata nel campo della ricerca e dell'industria e, grazie all'utilizzo di calcolatori molto potenti, è possibile avvicinarsi alla soluzione con un'approssimazione soddisfacente e con minori costi rispetto alla costruzione ed il test su un modello fisico. Non di meno, può essere usata per controlli incrociati su prototipi e la validazione di risultati sperimentali.

I codici di calcolo disponibili sono molteplici, ma tutti presentano lo stessa procedura di analisi:

- 1. Definizione della geometria del problema.
- Definizione di un dominio di calcolo di misura adeguata, ma non esagerata in modo da evitare un eccessivo appesantimento dei calcoli.
- 3. Imposizione delle condizioni al contorno.
- 4. Scelta del metodo risolutivo (modelli matematici ed algoritmi).
- 5. Risoluzione delle equazioni per via iterativa.
- 6. Post-processing, ossia visualizzazione ed analisi dei risultati ottenuti.

Il programma utilizzato per questa tesi è Overture, che utilizza il metodo alle differenze finite per la risoluzione numerica delle equazioni di bilancio del problema e del quale si parlerà in maniera più approfondita nella sezione seguente (*sez. 3.2*).

3.2 Overture e il metodo alle differenze finite

Overture è un codice di calcolo in grado di risolvere equazioni alle derivate parziali su geometrie complesse; al suo interno sono implementate diverse librerie C++ in grado di fornire soluzioni a svariati problemi sia di natura statica che dinamica. Inoltre il codice è direttamente modificabile dall'utente qualora se ne presenti la necessità.

Adottando l'ipotesi di flusso incomprimibile, Overture risolve il problema del moto di un fluido tramite un sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali nella formulazione velocità-pressione, dove viene risolta, insieme all'equazione della quantità di moto, quella di Poisson per la pressione. L'equazione di continuità assume invece il ruolo di condizione al contorno addizionale, così da garantire l'equivalenza del metodo con la formulazione originaria presentata all'inizio del capitolo (*equazioni* (3.1), (3.2)). In particolare, in un dato dominio Ω , viene risolto il seguente sistema, con le sue condizioni al contorno:

$$\begin{cases} \boldsymbol{u}_{t} + (\boldsymbol{u} \cdot \boldsymbol{\nabla})\boldsymbol{u} + \boldsymbol{\nabla}^{P} / \rho - \boldsymbol{\nabla}^{2} \boldsymbol{u} - \boldsymbol{f} / \rho = \boldsymbol{0} \\ \nabla^{2} P / \rho + (\boldsymbol{\nabla} \boldsymbol{u} \cdot \boldsymbol{u}_{x} + \boldsymbol{\nabla} \boldsymbol{v} \cdot \boldsymbol{u}_{y} + \boldsymbol{\nabla} \boldsymbol{w} \cdot \boldsymbol{u}_{z}) - \frac{\boldsymbol{\nabla} \cdot \boldsymbol{f}}{\rho} = \boldsymbol{0} \end{cases} \quad \mathbf{x} \in \Omega, \, t > 0 \quad (3.2.3)$$

$$\begin{cases} B(\boldsymbol{u}, P) = \boldsymbol{g} \\ \boldsymbol{\nabla} \cdot \boldsymbol{u} = \boldsymbol{0} \end{cases} \quad \mathbf{x} \in \partial \Omega, \, t > 0 \quad (3.2.4)$$

$$\boldsymbol{u}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{0}) = \boldsymbol{u}_{0}(\boldsymbol{x}) \quad t = \boldsymbol{0} \end{cases}$$

Le equazioni (3.3) e le condizioni al contorno (3.4) devono essere discretizzate su di una griglia per permetterne una soluzione approssimata.

Il codice adottato sfrutta un metodo alle differenze finite, con uno schema centrato, del secondo o del quarto ordine; Trattando un problema bidimensionale, con il seguente criterio si assume che:

$$\boldsymbol{U}_{i}(t) \approx \boldsymbol{u}(\boldsymbol{x}_{i}, t) \ e \ P_{i}(t) \approx p(\boldsymbol{x}_{i}, t) \ , \qquad (3.2.5)$$

dove, $U_i(t) = (u_i(t), v_i(t))$ è il vettore contente le componenti cartesiane dell'approssimazione numerica della velocità, mentre $P_i(t)$ è l'approssimazione numerica della pressione.

Le derivate della velocità e della pressione, invece, sono espresse rispettivamente in funzione di $U_i(t)$ e di $P_i(t)$ in forma di rapporto incrementale coerentemente con quanto prevede il metodo adottato^[20], e la loro approssimazione sarà tanto più precisa quanto più piccolo sarà il passo della griglia utilizzata.

La discretizzazione delle suddette equazioni avviene solo per le variabile di spazio e non per il tempo, cosicché il sistema originario di equazione alle derivate parziali possa essere pensato come un altro sistema di solo equazioni differenziali ordinarie del tipo:

$$\frac{d\boldsymbol{U}}{dt} = \mathcal{F}(t, \boldsymbol{U}, \boldsymbol{P}) \;\;,$$

dove la pressione **P** è considerata funzione della velocità, P = p(U), e **U** è il vettore di tutti i valori delle soluzioni in tutti i punti di griglia.

A questo punto Overture dispone dell'algoritmo predictor-corrector di Adams^[21], del secondo o del quarto ordine, per integrare numericamente le equazioni differenziali ordinarie sopra descritte ed avanzare nel tempo in modo da ottenere una soluzione approssimata del problema fino all'istante desiderato.

3.3 Generazione e definizione della griglia

La generazione della griglia è di estrema importanza nella CFD e può essere definito come il processo che consente di spezzare il dominio fisico in piccoli sub-domini discreti, in modo da poter calcolare numericamente equazioni differenziali alle derivate parziali come quelle espresse in (3.4).

Overture, tramite il comando ogen^[18], genera una griglia di tipo strutturato, con la quale si suddivide l'intero domino di interesse in elementi di forma rettangolare; tutti i punti di griglia sono distribuiti lungo linee di griglia che possono essere identificati facendo riferimento alle appropriate linee.

CAPITOLO 3. LE EQUAZIONI DI NAVIER STOKES E LA CFD

Inoltre, cosa di significativa importanza, il codice permette di sovrapporre più griglie di tipo strutturato l'una all'altra tramite un metodo che si chiama "overlapping grids".

Sovrapporre più griglie dona all'utente un'elevata liberta di costruzione della mesh, permettendogli di concentrare il maggior numero di punti laddove sia effettivamente necessario e, viceversa, di adottare una griglia più grossolana dove non occorre un'eccessiva precisione.

Il campo di moto viene calcolato su questo insieme di due o più griglie sovrapposte, passando da una all'altra tramite opportuni punti di interpolazione^[18], che vengono definiti dove le griglie si sovrappongono. In questa regione è importante controllare le dimensioni degli elementi rettangolari costituenti le griglie sovrapponenti in modo che non abbiano una dimensione eccessivamente differente: così l'interpolazione risulta migliore.

La griglia utilizzata in questa tesi consiste in 3 griglie sovrapposte di differente finezza, come mostrato in figura 3.3.1:



Fig. 3.3.1: Griglia di calcolo utilizzata

Il dominio di calcolo risulta avere un lunghezza di 1,2 metri ed un'altezza di 0,7 metri, con per un totale di circa 70000 punti.

La griglia di fondo, in blu, è la più grossolana e ricopre i punti del dominio di più scarsa importanza, dove non è necessaria un grande definizione del flusso.



Fig. 3.3.2: dettaglio della griglia intorno al profilo

La griglia in verde è, invece, più fitta e si sovrappone a quella blu, in moda da ottenere in quella regione una cattura migliore dei vortici generati dal moto del dispositivo. Infine, la griglia in rosso è, generata intorno al profilo presenta un'elevata finezza. Senza dubbio è la più importante e presenta un stretching delle linee in corrispondenza del bordo dell'ala modo in da catturare correttamente lo strato limite che lì si forma. Da notare che questa griglia si muove insieme al corpo, per cui la definizione del flusso concessa da essa si mantiene la stessa in ogni regione del dominio in cui si viene a trovare il

dispositivo durante il suo moto.

Le condizioni al contorno sono state imposte in questa maniera:

- 1. Inflow, nel confine sinistro del domino.
- 2. Outflow, in corrispondenza di tutte gli altri confini del dominio (destra, sopra, sotto).
- 3. No-slip wall, in corrispondenza della parete alare, in modo da non trascurare la presenza dello strato limite.

Il metodo di risoluzione utilizzato è alle differenze finite, schema centrato del secondo ordine, con algoritmo predictor-corrector anch'esso del secondo ordine.

Il time-step utilizzato per le simulazioni varia con il numero di Reynolds alle quali sono state effettuate ed è compreso tra 10^{-4} e 5 x 10^{-5} [s].

CAPITOLO 4 Risultati delle simulazioni

In questo studio sono state condotte un totale di 22 simulazioni, con un tempo medio variabile per ogni simulazione dai cinque giorni, fino anche a due settimane.

In tutti i casi studiati il dispositivo viene fatto partire da una posizione di -90° e sottoposto ad una corrente d'aria uniforme di velocità, variabile da caso a caso, tra 0.2 e 0.5 m/s, per un numero di Reynolds, calcolato sulla corda del profilo, compreso tra 533.3 e 1333.3. Velocità così basse sono state scelte con l'idea di testare il comportamento del dispositivo in momenti di ventosità scarsa.

Il problema principale è quello di trovare eventuali condizioni di instabilità, nelle quali si ha un moto dell'ala persistente, senza che questa si allinei con la direzione del vento.

Nello studio si tiene conto dell'effetto di tre parametri quali velocità del vento, densità superficiale di massa dell'ala e posizione di attacco dell'elastomero sull'ala. Per motivi di tempo e di elevata quantità di parametri in gioco, la massa addizionale, se presente, è mantenuta sempre nel baricentro geometrico del profilo.

Le simulazioni svolte posso essere suddivise in due famiglie differenti:

- *1*. Con massa addizionale di 1,3 g.
- 2. Senza massa addizionale.

La presenza di questa massa ed il suo contributo inerziale hanno rilevanti effetti sulla dinamica del dispositivo e, come si vedrà in seguito, può fare da discriminate per le oscillazioni o meno del dispositivo a parità di altre condizioni, anche se mantenuta sempre nel baricentro geometrico del profilo.

4.1 Configurazione con massa addizionale

La prima parte di questo capitolo è dedicata alle simulazioni effettuate sulla configurazione con massa addizionale posta sistematicamente nel baricentro geometrico dell'ala. In particolare si indaga sull'effetto di alcuni parametri significati quali densità di massa dell'ala, velocità del vento e posizione della molla lungo la corda del profilo.

4.1.1 effetto della densità di massa dell'ala

In questa sezione si vuole valutare l'effetto della densità di massa del profilo sul moto del dispositivo; nelle simulazioni sono state impostate le seguenti caratteristiche, riportate in *tabella 4.1.1*:

Velocità del vento	0.2 m/s
Densità di massa impiegate	5;15;20;30 kg/m ²
Massa addizionale	1.3 g
Massa totale ala	1,7;2.5;2,9;3,7g

Tabella 4.1.1: Caratteristiche delle simulazioni in questa sezione.

La posizione di partenza è perpendicolare alla direzione del vento, che soffia da sinistra verso destra nelle figure; il profilo riceve una spinta verso l'alto e raggiunto un angolo di inclinazione massimo rispetto all'orizzontale, risente dalla presenza dell'elastico e subisce una rotazione in senso opposto alla precedente.

Il comportamento tipo del dispositivo è ritratto in *figura 4.1.1 a) b) c) d)*, dove è rappresentato il campo di vorticità.

La densità superficiale di massa del dispositivo influisce sul massimo angolo di inclinazione raggiunto dal profilo e sul periodo di oscillazione, che, però, si smorza progressivamente: come risultato si ha un allineamento stabile con la direzione del vento.

La condizione stabile è da evitare poiché impedirebbe il recupero di energia da parte dell'*energy harvester*. Pertanto è necessario ricercare condizioni di instabilità.



Fig. 4.1.1: Comportamento tipo del dispositivo in condizioni di stabilità.

In particolare si mostrano le soluzioni trovate per densità di massa 5 kg/m² e 30 kg/m², in modo che risultino immediate le differenze tra casi a diversa massa dell'oggetto.

Si riportano, nelle *figure 4.1.2, 4.1.3, 4.1.4, 4.1.5, 4.1.6, 4.1.7, 4.1.8, 4.1.9*, per questi due dei quattro casi gli andamenti dell'angolo ϑ , dell'allungamento dell'elastico e dei coefficienti aereodinamici, in funzione del tempo.

I rimanenti casi diversa densità non hanno differenze sostanziali ed un andamento comparato è riportato in *figura 4.1.9*.

Per tutte le configurazioni presentate si indica con:

- PA: punto di attacco dell'elastomero all'ala, misurato in percentuale della corda a partire dal bordo d' attacco dell'ala.
- PM: posizione della massa addizionale sulla ala, misurato in percentuale della corda a partire dal bordo d' attacco dell'ala.
- M_{add}: valore in grammi della massa addizionale.





Fig. 4.1.2: Andamento dell'angolo ϑ in funzione del tempo



Fig. 4.1.2: Allungamento dell'elastico in funzione del tempo.



Fig. 4.1.3: Coefficiente di drag in funzione del tempo.



Fig. 4.1.4: Coefficiente di lift in funzione del tempo.

Si consideri ora il caso a densità di massa 30 kg/m²:



Fig. 4.1.5: Densità 30 kg/m², and amento dell'angolo ϑ in funzione del tempo.



Fig. 4.1.6: Densità 30 kg/m^2 , allungamento dell'elastico in funzione del tempo.



Fig. 4.1.7: Densità 30 kg/m2, coefficiente di resistenza in funzione del tempo



Fig. 4.1.8: Densità 30 kg/m2, coefficiente di portanza in funzione del tempo. Per tutti i casi considerati in questa sezione, il dispositivo si allinea nella direzione del vento. La *figura 4.1.9*, rappresenta sovrapposti gli andamenti di quattro simulazioni a densità di massa differente:



Fig. 4.1.9: Confronto delle oscillazioni per diverse densità di massa.

Per una densità di 5 kg/m², indicata con la curva in rosso, si ha uno smorzamento rapido che decresce di velocità per valori crescenti di massa dell'ala, individuate sul grafico dalle curva verde, blu e viola.

4.1.2 Effetto della velocità

In questa sezione si confrontano i risultati ottenuti per densità 15 kg/m² e 20 kg/m² ad una velocità di 0.5 m/s con quelli ottenuti precedentemente ad un velocita di 0.2 m/s. In entrambi i casi non si rileva nessuna persistenza del moto, ma solamente un incremento della frequenza di oscillazione.

Il movimento del dispositivo è molto più caotico per U=0.5 m/s ma, in entrambi i casi di differente densità di massa, si perviene all'equilibrio dopo un tempo relativamente breve (*fig. 4.1.2.1, 4.1.2.2*). Gli allungamenti degli elastomeri (*fig. 4.1.2.3, 4.1.2.4*) sono di entità maggiore grazie alla velocità più alta del vento, ma è necessario comunque considerare altre configurazioni del dispositivo per cercare di ottenere oscillazioni sostenute.



Fig. 4.1.2.1: Densità 15 kg/ m^2 , confronto delle oscillazioni a diverse a velocità.



Fig. 4.1.2.1: Densità 15 kg/ m^2 , confronto delle oscillazioni a diverse a velocità.



Fig. 4.1.2.2: Densità 15 kg/m², **U**=0.5 m/s, Allungamento dell'elastico in funzione del tempo.



Fig. 4.1.2.3: Densità 20 kg/m², U=0.5 m/s, Allungamento dell'elastico in funzione del tempo.

In *Fig. 4.1.2.4, 4.1.2.5, 4.1.2.6* e *4.1.2.7* sono riportati i coefficienti di resistenza e portanza in funzione del tempo:



Fig. 4.1.2.4: Densità 15 kg/m², U=0.5 m/s, coefficiente di resistenza in funzione del tempo.



Fig. 4.1.2.5: Densità 20 kg/m², U=0.5 m/s, coefficiente di resistenza in funzione del tempo.



Fig. 4.1.2.6: Densità 15 kg/m², U=0.5 m/s, coefficiente di portanza in funzione del tempo.



Fig. 4.1.2.7: Densità 20 kg/ m^2 , U=0.5 m/s, coefficiente di portanza in funzione del tempo.

4.1.3 Effetto del punto di attacco degli elastomeri

L'effetto del punto di attacco degli elastomeri ha grande rilevanza relativamente alla stabilità o all' instabilità del dispositivo. Variando esso lungo la corda dell'ala, si ottiene come risultato una variazione del momento torcente esercitato degli elastici. Malgrado per motivi di tempo, non si siano potute esplorare un grosso numero di configurazioni, da alcune di esse si possono trarre comunque interessanti risultati: si passa da uno smorzamento del moto, ad uno sostenuto e quasi periodico.



a) : t=1.5 s.



b) : *t*=11.25 *s*.



c): t=39.95 s.



Fig. 4.1.3.1: PA: 25% - PM:50%, dispositivo in movimento.

In particolare, ciò si rileva in una configurazione del dispositivo che prevede la posizione dell'elastico al 25% della corda, un punto aerodinamicamente importante dato che coincide con il centro aereodinamico di un profilo alare sottile e simmetrico, mentre la posizione della massa addizionale è sempre nel baricentro geometrico dell'ala, al 50% della corda. La densità dell'ala è assunta pari a 20 kg/m² mentre la velocità del vento, **U**, è imposta pari a 0.2 m/s.

Le *figure 4.1.3.1 a) b) c) d)* mostrano il dispositivo durante il moto ed in particolare il campo di vorticità a quattro istanti di tempo successivi.

I risultati relativi alla simulazione sono in figura 4.1.3.2:



Fig. 4.1.3.2: Densità 20 kg/m², U=0.2 m/s, angolo ϑ in funzione del tempo.

Come si può notare le oscillazioni continuano a crescere finche non si stabilizzano tra i 110° ed i -70°, proseguendo periodicamente.

Rispetto ai casi precedenti è bastato spostare di punto di attacco dell'elastomero (PA), per ottenere una notevole variazione del comportamento del dispositivo.

L'allungamento della molla (*Fig. 4.1.3.3*) avviene con alta frequenza, e il suo valore si aggira mediamente attorno ai 0.5 cm, con picchi massimi di 0,9 cm.

Questo *stretch* è ancora però abbastanza piccolo, e ciò è dovuto al debole vento a cui è sottoposto il dispositivo.



Fig. 4.1.3.3: Densità 20 kg/m², U=0.2 m/s, Allungamento dell'elastico in funzione del tempo.



Fig. 4.1.3.4: Densità 20 kg/m², U=0.2 *m/s, coefficiente di resistenza in funzione del tempo.*



Fig. 4.1.3.5: Densità 20 kg/m², U=0.2 *m/s, coefficiente di portanza in funzione del tempo.* Cambiando il punto di attacco dell'elastico però si possono ottenere anche condizioni stabili: si faccia riferimento, ad esempio, alla *figura 4.1.3.6*, dove PA è uguale al 50%.



Fig. 4.1.3.6: Densità 15 kg/m², U=0.2 m/s, angolo ϑ in funzione del tempo.


Fig. 4.1.3.7: Densità 15 kg/m², U=0.2 m/s, coefficiente di resistenzain funzione del tempo



PM=50% Density 15kg/m^2 U=0.2 m/s Madd=1.3g PA=50%

Fig. 4.1.3.8: Densità 15 kg/m², U=0.2 m/s, coefficiente di portanza in funzione del tempo.

Sono state effettuate altre simulazioni per valutare l'effetto del punto di attacco della molla e sono tutte riportate in *figura 4.1.3.9*, che riporta un grafico che reca in ascisse la densità di massa del dispositivo ed in ordinate il valore di PA in percentuale della corda. I punti blu sono le configurazioni stabili, cioè che dopo un transitorio si allineano col vento, in rosso invece è indicata l'unica configurazione instabile trovata a velocità pari a 0.2 m/s



figura 4.1.3.9: Riassunto delle simulazioni effettuate e relativa stabilità.

Malgrado le configurazioni testate non siano poche, occorrerebbero un numero maggiore di simulazioni per determinare con precisione le zone instabili. Dal grafico sopra riportate appare però che eventuali instabilità si manifestano per valori più alti della densità di massa e per PA diverso da 0%.

4.2 Configurazione senza massa addizionale

In questa sezione, si è preso in considerazione il caso più semplice, con punto di attacco dell'elastico sul naso del profilo, cioè PA= 0%. A causa della simmetria dell'ala utilizzata e l'assenza di massa addizionale, la posizione del centro di massa è situata a metà della corda.

Una scelta di questo tipo è dettata dalla volontà di scoprire per una configurazione data, quali parametri possono influire sulla stabilità del dispositivo e, quindi, indurre oscillazioni permanenti. I risultati ottenuti danno ragione di questa scelta e identificano particolari condizioni di velocità del flusso e di densità di massa dell'ala per i quali si ha una transizione da un comportamento all'altro.

4.2.1 Effetto della densità dell'ala

I parametri utilizzati nelle simulazioni effettuate in questa sezione si possono riassumere nella seguente *tabella 4.2.1*.

Velocità del vento	0.2 m/s
Densità ala simulate	15 kg/m ² ; 20 kg/m ²
Massa ala	1.2 g ; 1,6 g

Tabella 4.2.1: Parametri utilizzati nelle simulazioni in questa sezione.

Come accadeva per il caso con massa addizionale, la densità dell'ala influisce sulla dinamica del dispositivo, e l'influenza è molto più marcata per velocità più alte del vento. La *figura 4.2.1.1*, fa riferimento a due casi di densità differente, pari a 15 e 20 kg/m².



Fig. 4.2.1.1: Andamento delle oscillazioni per densità di massa 15 kg/m² e 20 kg/m².

Anche in questo caso si ha una diminuzione della velocità di smorzamento con l'aumentare della massa.



Fig. 4.2.1.2: Densità 15 kg/m², U=0.2 m/s, Allungamento dell'elastico in funzione del tempo.



Fig. 4.2.1.3: Densità 20 kg/m², U=0.2 m/s, Allungamento dell'elastico in funzione del tempo.



Fig. 4.2.1.4: Densità 15 kg/m², U=0.2 m/s, coefficiente di resistenza funzione del tempo.



Fig. 4.2.1.5: Densità 20 kg/ m^2 , U=0.2 m/s, coefficiente di portanza funzione del tempo.



Fig. 4.2.1.6: Densità 15 kg/ m^2 , U=0.2 m/s, coefficiente di portanza in funzione del tempo.



Fig. 4.2.1.7: Densità 20 kg/m², U=0.2 m/s, coefficiente di resistenza in funzione del tempo.

4.3.1 Effetto della velocità del vento

La velocità del vento ha un ruolo di grande importanza nella stabilità del dispositivo: dalle simulazione appare come superando una certo valore di velocità compreso tra 0.35 m/s e 0.5 m/s per un valore di densità di massa dell'ala pari a 15 kg/m² e 20 kg/m² il dispositivo ha oscillazioni sostenute mentre per una densità di 5 kg/m² non si hanno oscillazioni, anzi l'ala si allinea con la direzione del vento in maniera rapida per velocità del flusso più elevate. I parametri impostati nelle simulazioni effettuate per valutare l'effetto della velocità del vento sono riportate in *tabella 4.3.1.1* :

Velocità del vento	0.35 m/s ; 0.5 m/s
Densità ala simulate	5 kg/m^2 ; 15 kg/m ² ; 20 kg/m ²
Massa dell'ala	0.4 g ; 1.2 g ; 1.6 g

Tabella 4.3.1.1 : Parametri delle simulazioni utilizzati nella simulazioni.



Le oscillazioni del dispositivo per U= 0.35 m/s, sono riportati in figura 4.3.1.1:

Fig. 4.3.1.1: Andamento delle oscillazioni per diverse densità di massa, per U=0.35 m/s.

Malgrado non si rilevi permanenza di oscillazioni, appare subito chiaro che aumentando la velocità i casi con densità di massa 15 kg/m² e 20 kg/m², rispettivamente in vede ed in blu, sono dotati inizialmente di un moto più caotico ed instabile, che però non permane nel tempo.

In *Fig. 4.3.1.2, 4.3.1.3, 4.3.1.4, 4.3.1.5* sono riportati gli *stretch* della molla, mentre in *Fig.4.3.1.6, 4.3.1.7, 4.3.1.8 4.3.1.9, 4.3.1.10,* i valori dei coefficienti aereodinamici.



Fig. 4.3.1.2: Densità 5 kg/m², U=0.35 m/s, Allungamento dell'elastico in funzione del tempo.



Fig. 4.3.1.3.: Densità 15 kg/m², U=0.35 m/s, Allungamento dell'elastico in funzione del tempo.



Fig. 4.3.1.4: Densità 20 kg/m², U=0.35 *m/s, Allungamento dell'elastico in funzione del tempo.*



Fig. 4.3.1.5: Densità 5 kg/m², U=0.35 m/s, coefficiente di resistenza in funzione del tempo.



Fig. 4.3.1.6: Densità 15 kg/m², U=0.35 m/s, coefficiente di resistenza in funzione del tempo.



Fig. 4.3.1.7: Densità 20 kg/ m^2 , U=0.35 m/s, coefficiente di resistenza in funzione del tempo.



Fig. 4.3.1.8: Densità 5 kg/m², U=0.35 *m/s, coefficiente di portanza in funzione del tempo.*



Density 15 kg/m² U=0.35 m/s Madd=0.0g PA=0% PM=50%

Fig. 4.3.1.9: Densità 15 kg/m², U=0.35 m/s, coefficiente di portanza in funzione del tempo.



Fig. 4.3.1.10: Densità 20 kg/m², U=0.35 m/s, coefficiente di portanzain funzione del tempo.

I risultati senza dubbio più interessanti si ottengono però per una velocità del vento pari a 0.5 m/s: per questo valore di velocità si riscontrano oscillazioni permanenti per i casi a densità di massa 15 kg/m² e 20 kg/m².

Questo non avviene però per densità più basse quali 5 kg/m², dove, anche con una velocità del vento di 0.5 m/s, si permane nella stabilità.

Un risultato di questo tipo porta a supporre che esiste una velocità minima per la quale il dispositivo passa all'instabilità; non solo, ma anche che questa instabilità viene generata solo per valori più elevati di densità superficiale di massa, come accadeva nella configurazione con massa addizionale.

Dunque, se la massa del dispositivo è bassa, esso tenderà più facilmente ad allinearsi con la direzione del vento, mentre se è alta il dispositivo sarà portato verso l'instabilità.

Per notare ciò si faccia riferimento ai grafici relativi alle oscillazioni ad U=0.5 m/s, in *figura 4.3.1.11, 4.3.1.12 e 4.3.13*.



Fig. 4.3.11: Densità 15 kg/m², U=0.5 m/s, angolo ϑ in funzione de tempo.



Fig. 4.3.12: Densità 15 kg/m², U=0.5 m/s, angolo ϑ in funzione de tempo.



Fig. 4.3.1.12: Densità 15 kg/m², U=0.5 m/s, angolo ϑ in funzione de tempo.

In fig. 4.3.1.13 sono rappresentati alcuni istanti durante il funzionamento del dispositivo:



a) t=12.675 s



b) t=9.675 s





Fig. 4.3.1.13: Campo di vorticità per caso a densità di massa 20kg/m².



Fig. 4.3.1.14.: Densità 15 kg/m², U=0.5 m/s, Allungamento dell'elastico in funzione del tempo.



Fig. 4.3.1.15: Densità 15 kg/m², U=0.5 m/s, Allungamento dell'elastico in funzione del tempo.



Fig. 4.3.1.16: Densità 15 kg/m², U=0.5 m/s, Allungamento dell'elastico in funzione del tempo.

Da questi andamenti appare evidente l'instabilità e la permanenza del moto che diviene quasi periodico.

I valori dell'allungamento dell'elastico sono riportati in *figura 4.3.1.14* e *4.3.1.15* e *4.3.1.16*

Nei due casi densità maggiore superano di media i due centimetri e si hanno picchi anche di 4 cm di allungamento e i risultati sono soddisfacenti per entrambe le configurazioni. I valori dei coefficienti aereodinamici sono riportati invece in *figura 4.3.1.17* a *4.3.1.23*.



Fig. 4.3.1.17: Densità 5 kg/m², U=0.5 m/s, coefficiente di resistenza in funzione del tempo.



Fig. 4.3.1.18: Densità 15 kg/m², U=0.5 m/s, coefficiente di resistenza in funzione del tempo.



Fig. 4.3.1.19: Densità 20 kg/m², **U**=0.5 m/s, coefficiente di resistenza in funzione del tempo.



Fig. 4.3.1.20: Densità 5 kg/m², U=0.5 m/s, coefficiente di resistenza in funzione del tempo.



Fig. 4.3.1.21: Densità 15 kg/m², U=0.5 m/s, coefficiente di portanza in funzione del tempo.



Fig. 4.3.1.22: Densità 15 kg/m², U=0.5 m/s, coefficiente di portanza in funzione del tempo.



Fig. 4.3.1.23: Densità 20 kg/m², U=0.5 m/s, coefficiente di portanza in funzione del tempo.

A conclusione di questa sezione, si riporta una grafico, in *figura 4.3.1.24*, indicante tutte le configurazioni studiate e l'eventuale instabilità:



CAPITOLO 5

Conclusioni

Durante questa tesi, sono state studiate 22 configurazioni differenti di un dispositivo originale di energy harvesting.

Si è considerato l'effetto della massa addizionale, del punto di attacco dell'elastico, della densità di massa del profilo, e della velocità.



I risultati sono riassumibili in *figura 5.1 e 5.2*.

Fig. 5.1: Simulazioni effettuate e comportamento del dispositivo al variare di PA e della densità di massa per la configurazione con massa addizionale.



Fig. 5.2: Simulazioni effettuate al variare della velocità del vento e della densità di massa.

Dalla totalità delle simulazioni posso essere tratte le seguenti conclusioni: la configurazione con massa addizionale, presenta diverse criticità per un corretto funzionamento con le velocità del vento considerate, legate probabilmente all'eccesiva massa totale del dispositivo. Tuttavia, è stata trovata una configurazione, con punto di attacco dell'elastico al 25% della corda, per la quale si riscontra instabilità ed oscillazioni sostenute da parte del dispositivo; ciò suggerisce che PA può essere utilizzato come parametro chiave per regolare la dinamica del dispositivo.

La densità di massa del profilo agisce sul tempo di oscillazione per le configurazioni stabili ed inoltre appare che, se si presenta instabilità, essa occorre per valori più alti di essa.

Sulla base dei dati in nostro possesso non può essere tracciata una curva precisa che separa la regione di funzionamento stabile da quella instabile, tuttavia vi è più probabilità di configurazioni oscillanti per valori elevati della densità di massa dell'ala oscillaznte, almeno per i casi di basse velocità del vento incidente.

La configurazione senza massa addizionale, è stata studiata solamente per PA=0%, ma tuttavia, ha dato buoni risultati di funzionamento che posso essere riassunti in quanto

CAPITOLO 5. CONCLUSIONI

segue: sottoponendo il dispositivo a tre diversi valori di velocità, 0.2, 0.35 e 0,5 m/s, si può concludere che eventuali instabilità sopraggiungono per velocità comprese tra 0.35 e 0.5 m/s; ciò pone un limite minimo per un eventuale funzionamento del dispositivo a bassi numeri di Reynolds. Non si può tuttavia escludere che, spostando l'elastico lungo la corda del profilo, si inneschino instabilità per valori di **U** più bassi, come accade per il caso con massa addizionale, ed esistano configurazioni di migliore efficienza rispetto a quelle trovate.

La densità di massa dell'ala gioco un ruolo importante, infatti, il comportamento instabile del dispositivo avviene solo per valori abbastanza alti e mai per valori bassi, dove, anzi, si stabilizza velocemente.

Dal grafico riportato in *figura 5.2*, è possibile identificare una zona stabile, ed una dove è possibile trovare instabilità.

Molti sono gli sviluppi futuri relativi a questo dispositivo: un' analisi di stabilità ed un numero maggiore di simulazioni numeriche può delineare con più precisione le zone di funzionamento instabili da quelle stabili.

Sulla base di quanto sopra affermato prove a velocità più alte del vento potrebbero garantire risultati migliori e più ampie zone di funzionamento.

Infine, una sperimentazione in galleria del vento, come quelle che sta tutt'ora conducendo il *Professor Boragno*, può dare modo di provare molteplici configurazioni con tempi di verifica più ristretti e può validare calcoli numerici e analisi teoriche.

Sarebbe poi interessante, sostituire il semplice profilo simmetrico utilizzato finora, con profili incurvati, che potrebbero risultare più performanti.

La grande ricchezza dinamica di questo dispositivo promette buoni risultati, con la speranza che possa diventare un congegno utile e efficacie, in grado di apportare il proprio contributo nel vasto ed originale campo dell'*energy harvesting*.

91

Bibliografia

[1] Gregory P. Meisner: "Advanced Thermoelectric Materials and Generator Technology for AutomotiveWaste Heat at GM", 2011.

[2] K.T. Zorbas, E. Hatzikraniotis, and K.M. Paraskevopoulos: "Power and efficiency calculation in commericial TEG and application in wasted heat recovery."

[3] C. B. Williams, R. B. Yates e L. Volta: "Analysis of a micro-electric generator for microsystems". In: Sensors and Actuators A: Physical 52.1-3 (1996). Proceedings of the 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators Eurosensors IX, pp. 8–11.

[4] S.S. Rao: "Mechanical Vibrations, third ed., Addison-Wesley".

[5] N.G. Stephen: "On energy harvesting from ambient vibration", Journal of Sound and Vibration 293 (2006) 409–425.

[6] Meninger S, Mur-Miranda J, Lang J, Chandrakasan A, Slocum A, Schmidt M and Amirtharajah *R: "Vibration to electric energy conversion IEEE Trans Very Large Scale Integration (VLSI) Syst.*", 2001, pp. 64–76.

[7] Despesse G, Jager T, Chaillout J, Leger J, Vassilev A, BasrourS and Chalot B: "Fabrication and characterisation of high damping electrostatic micro devices for vibration energy scavenging Proc. Design, Test, Integration and Packaging of MEMS and MOEMS", 2005, pp 386–90.

[8] Elmes, John, Venceslav Gaydarzhiev, Adje Mensah, Khalid Rustom, John Shen, e Issa Batarseh: "*Maximum energy harvestingcontrol for oscillating energy harvesting system*." Power Electronics Specialists Conference, 17-21 Giugno 2007, pp. 2792-2798.

[9] Anton, Steven R., e Henry A. Sodano: "A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003–2006)." Smart Materials and Structures, 2007: pp. R1-R21.

[10] S. Roundy: "On the effectiveness of vibration-based Energy Harvesting".

[11] Goldfarb M and Jones L D: "On the efficiency of electric power generation with piezoelectric ceramic Trans.", 1999, ASME J. Dyn. Syst. Meas. Control 121 566–71.

[12] Gonzalez J L, Rubio A and Moll F: "*A prospect of the piezoelectric effect to supply power to wearable electronic devices*", 2001, Proc. 4th Int. Conf. on Materials Engineering for Resources (Akita, Japan) pp 202–07.

[13] Starner T: "Human-powered wearable computing", 1996 IBM Syst. J. 35 618–29.

[14] Roundy S et al. : "Improving Power Output for Vibration-based Energy Scavengers." IEEE Pervasive Computing vol. 4 (2005): pp. 28–36-

[15] Taylor, George W., Joseph R. Burns, Sean M. Kammann, William B. Powers, e Thomas R. Welsh: "*The energy harvesting eel: a small subsurface ocean/river power generator.*" IEEE Journal of Oceanic Engineering Vol. 26, n. 4 (Ottobre 2001): pp. 539-547.

[16] Dung-An Wang, Huy-Tuan Pham, Chia-Wei Chao, Jerry M. Chen: "A Piezoelectric Energy Harvester Based on Pressure Fluctuations in Kármán Vortex Street", 2011. [17] Trapanese Marco: "Optimization of Sea Wave Energy Harvesting Electromagnetic Device." IEEE Transactions on magnetics (IEEE) Vol. 44, n. 11 (Novembre 2008): pagg. 4365-4368.

[18] Ron Pelrine, Roy Kornbluh, Jose Joseph, Richard Heydt, Qibing Pei, Seiki Chiba: *"High-field deformation of elastomeric dielectrics for actuators"*, 2000, Materials Science and Engineering C 11, pp. 89–100.

[19] Ron Pelrine, Roy Kornbluh, Joe Eckerie, Phil Jeuck, Seajin Oh, Qibing Pei, Scott Stanford: "*Dielectric elastomers: generator mode fundamentals and applications*", 2011, Smart structures and materials: Electroactive polymer Actuators and Devices, Vol 4329, pp. 148-156.

[20],[21] Joel Guerrero: "Numerical simulation of the unsteady aereodynamics of flapping flight", 2009, cap.5, pp. 78-87.