



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE**

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA**

# **Energy harvester piezoelettrici a larga banda: design, modellistica e applicazioni**

**Relatore: Prof. Federico Moro**

**Laureando: Davide Sartori**

**ANNO ACCADEMICO 2021 – 2022**



# Sommario

Gli energy harvester piezoelettrici costituiscono attualmente una valida alternativa alle batterie nell'alimentazione di dispositivi microelettronici, consentendo il recupero di energia dalle vibrazioni. In questa tesi viene esaminato lo stato dell'arte di tale tecnologia, con particolare attenzione ai design che consentono un funzionamento a larga banda e, pertanto, un recupero maggiore di energia. Vengono dapprima descritte le proprietà e le caratteristiche dei materiali piezoelettrici che influenzano le prestazioni elettromeccaniche degli harvester. Viene preso in esame un modello meccanico a parametri concentrati per identificare i principali parametri di funzionamento. I design di harvester che consentono di ampliare la larghezza di banda agiscono su tali parametri e costituiscono l'oggetto principale di questa tesi: vengono analizzati sistemi di conversione multifrequenza, non risonanti e multidirezionali. Nell'ultima parte della tesi si considerano infine gli harvester ibridi, capaci di sfruttare i design precedenti e di incrementare ulteriormente l'efficienza accoppiando altri sistemi di conversione energetica.



# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>1 Piezoelettricità</b>	<b>3</b>
1.1 Relazioni costitutive . . . . .	4
1.2 Materiali piezoelettrici . . . . .	4
<b>2 Modelli circuitali di un energy harvester piezoelettrici</b>	<b>7</b>
2.1 Modello a parametri concentrati . . . . .	7
2.2 Convertitori per piezoelectric harvester . . . . .	11
<b>3 Energy harvester piezoelettrici con design ottimizzato</b>	<b>17</b>
3.1 Sistemi multifrequenza . . . . .	18
3.1.1 Sistemi a massa mobile . . . . .	18
3.1.2 Sistemi a rigidezza variabile . . . . .	19
3.1.3 Sistemi accordati su più frequenze . . . . .	21
3.1.4 Sistemi non lineari . . . . .	22
3.2 Sistemi non risonanti . . . . .	23
3.3 Harvester multidirezionali . . . . .	27
<b>4 Harvester ibridi</b>	<b>29</b>
4.1 Harvester piezoelettrici-elettromagnetici . . . . .	30
4.2 Harvester piezoelettrici-piroelettrici . . . . .	34
<b>Conclusioni</b>	<b>37</b>



# Introduzione

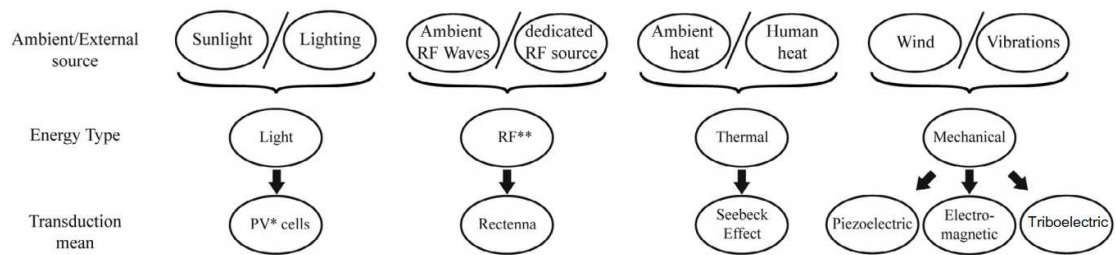
Ogni circuito elettronico per funzionare ha bisogno di una fonte di energia costante. Per sistemi non collegati alla rete elettrica l'energia è normalmente fornita da batterie; tuttavia questi dispositivi possono fornire una quantità di energia limitata. Inoltre, in certe applicazioni la ricarica delle batterie è impraticabile, legando la vita dei sensori alla vita della batteria stessa.

Una possibile soluzione a questo problema consiste nello sfruttare le fonti di energia già presenti nell'ambiente, ma che sono attualmente inutilizzate. "L'energy harvesting" consiste nella conversione di energia, presente nell'ambiente in forme diverse, in energia elettrica direttamente utilizzabile. La Figura 1 riassume le sorgenti di energia più conosciute: per alcune esistono già diversi metodi di harvesting, tuttavia altre sono ancora largamente inutilizzate. Particolarmente interessanti sono quelle tecniche che permettono di ricavare energia elettrica a partire dall'energia cinetica, che si può manifestare ad esempio tramite il vento o le vibrazioni. I metodi che consentono la conversione di energia cinetica in elettrica sono principalmente tre: piezoelettricità, elettromagnetismo e triboelettricità.

I dispositivi che generano energia elettrica recuperando energia dall'ambiente sono detti "energy harvester". Esistono diversi tipi di harvester, tuttavia sono particolarmente rilevanti i piezoelectric energy harvester, una particolare categoria di MEMS (Micro Electro-Mechanical System). Questi dispositivi sono utilizzati in moltissime applicazioni grazie alle loro funzioni di rilevazione, elaborazione e attuazione di dati e informazioni. I piezoelectric energy harvester sono dispositivi di piccole dimensioni (comprese fra i micrometri e i centimetri) che sfruttano l'energia cinetica delle vibrazioni per erogare potenza fino a decine di mW. Questa è una tecnologia recente, e presenta pertanto buoni margini di miglioramento. Una caratteristica fondamentale degli harvester piezoelettrici è quella di erogare massima potenza solo se la sorgente del movimento eccita il dispositivo alla frequenza di risonanza. Hanno quindi grande importanza tutte quelle modifiche al design dell'harvester

che ne permettono l'ampliamento della larghezza di banda. Gli energy harvester piezoelettrici a larga banda producono una quantità di energia molto maggiore degli harvester piezoelettrici classici.

Sfruttando questi nuovi harvester, è possibile rendere indipendenti dal punto di vista energetico piccoli circuiti e sensori. Eliminare la dipendenza di questi dispositivi dalle batterie permette di allungare la vita utile di sensori e batterie stesse, riducendo al contempo l'impronta ambientale legata alla realizzazione di dispositivi tecnologici moderni e allo smaltimento delle batterie.

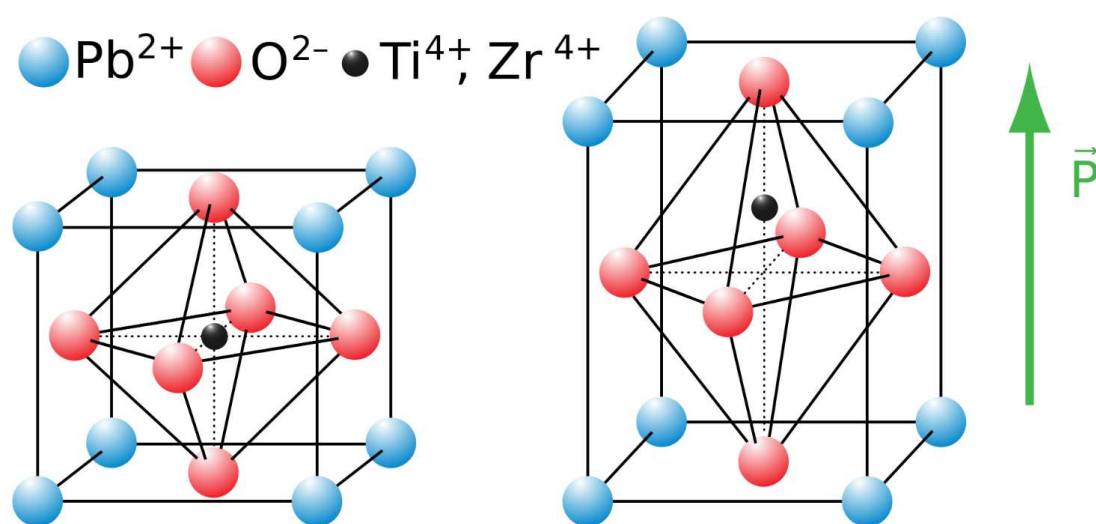


**Figura 1:** Sorgenti di energia utilizzabili per l'energy harvesting [8]: fotovoltaico (PV), onde radio (RF), calore, vibrazioni meccaniche.



# 1. Piezoelettricità

L'effetto piezoelettrico consiste nella formazione di una quantità di carica sulla superficie di quasi tutti i materiali cristallini privi di centro di simmetria quando sottoposti ad uno stress meccanico. Questo è possibile grazie alla particolare struttura di questi cristalli, che sono formati da moltissimi dipoli elettrici. In condizione di quiete, i dipoli sono disposti in modo tale che la superficie del materiale sia allo stesso potenziale elettrico. Deformando il cristallo tramite uno stress meccanico, i dipoli vengono compressi portando alla formazione di un momento di dipolo elettrico  $\vec{p}$  (vedi Figura 1.1). Il dipolo si forma per un accumulo di carica positiva in una faccia del cristallo e di carica negativa nella faccia opposta, polarizzando il materiale. Più i dipoli sono ordinati, maggiore è la carica che si deposita. Collegando infine le due facce con un cortocircuito, si ottiene uno spostamento di cariche elettriche fino al raggiungimento dell'equilibrio.



**Figura 1.1:** Struttura cristallina piombo-zirconato di titanio: se sottoposto a stress meccanico, si forma un momento di dipolo elettrico  $\vec{p}$  [15].

## 1.1 Relazioni costitutive

L'effetto piezoelettrico fu osservato la prima volta nel 1880 dai fratelli Curie che osservarono come una tensione elettrica fosse generata in alcuni materiali quando questi venivano sottoposti a uno stress meccanico. D'altra parte l'anno successivo dimostrarono come sottoponendo i cristalli ad una tensione elettrica, questi si deformato. Le equazioni costitutive che governano questi due fenomeni, la prima per l'effetto diretto (da stress meccanico a carica elettrica) e la seconda per descrivere l'effetto inverso (da tensione elettrico a deformazione meccanica), sono [11]:

$$\begin{cases} D_i = d_{ij}\sigma_j + \varepsilon_{ij}^T E_i \\ S_j = s_{ij}^E \sigma_j + d_{ij} E_i \end{cases} \quad (1.1)$$

dove:

- $D_i$  è l'induzione elettrica;
- $S_j$  il tensore delle deformazioni;
- $\sigma_j$  il tensore degli sforzi di Cauchy;
- $E_i$  il campo elettrico;
- $\varepsilon_{ii}$  il tensore dielettrico;
- $s_{ij}$  il tensore di cedevolezza elastica;
- $d_{ij}$  è il tensore elastico del materiale.

Con i pedici  $i$  e  $j$  si indicano rispettivamente la direzione di applicazione dei parametri elettrici e meccanici. Questa distinzione è importante in quanto la natura anisotropa di molti materiali piezoelettrici fa variare i valori di alcuni parametri in base alla direzione in cui vengono considerati.

## 1.2 Materiali piezoelettrici

In natura è possibile trovare diversi tipi di materiali piezoelettrici, distinti in base alla geometria della struttura cristallina. Materiali polimerici, ceramici o compositi

[6] sono caratterizzati da una struttura policristallina, con cristalli posizionati senza un'orientazione privilegiata. Nei materiali monocristallini invece i cristalli sono organizzati seguendo una distribuzione periodica.

Come detto precedentemente, l'effetto della piezoelettricità nasce a partire dai dipoli elettrici già presenti, e più questi sono ordinati, più l'energia prodotta è maggiore. I materiali che si trovano in natura tuttavia hanno i dipoli orientati in modo casuale, e per allinearli si utilizza il processo noto come *poling*. Questo consiste nell'immersione del materiale in un forte campo elettrico per orientare i dipoli verso una particolare direzione e quindi polarizzarlo. Quanto più sono ordinati i dipoli, tanto più forte è la polarizzazione di un materiale e migliori le sue proprietà piezoelettriche. La scelta di quale materiale sia più indicato per un dato dispositivo tiene conto delle proprietà piezoelettriche di ciascuna categoria, correlata all'allineamento dei dipoli, ma anche dalle caratteristiche fisiche e meccaniche richieste dall'applicazione.

Le ceramiche producono i migliori livelli di tensione per vibrazioni di frequenza elevata (da 50 Hz a qualche migliaio di Hz), ma allo stesso tempo sono fragili e poco elastiche, rendendo il loro utilizzo inadatto in applicazioni che pongono eccessivo sforzo sul materiale. Nonostante ciò, il buon output di potenza che producono (fino a qualche centinaia di mW), unito alla facile reperibilità e il basso prezzo, ne consentono l'utilizzo in un gran numero di applicazioni piezoelettriche. La piezoceramica più utilizzata è il PZT (piombo-zirconato di titanio) grazie alle sue ottime proprietà piezoelettriche. Per questo motivo, al giorno d'oggi la maggior parte delle applicazioni riprende il PZT e ne modifica la composizione chimica per amplificare certe proprietà rispetto ad altre. Esistono quindi diversi derivati di questo materiale, come il PZT-5A e il PZT-5H, utilizzati rispettivamente per applicazioni ad alta temperatura e che richiedono le migliori proprietà piezoelettriche. D'altra parte i polimeri presentano caratteristiche opposte ai materiali ceramici. Questi sono molto flessibili, caratteristica che permette loro di rispondere più velocemente ed efficacemente a impulsi esterni. Sono quindi utilizzati in applicazioni a frequenze basse (intorno a 10 Hz) ma con livelli di tensione prodotta minori delle ceramiche (dell'ordine dei  $\mu\text{W}$ ). Essi sono adatti a harvester piezoelettrici da disporre su dispo-

itivi indossabili a basso consumo grazie alla loro resistenza e flessibilità. Il polimero più utilizzato è il PVDF (polivinilidenfluoruro); è caratterizzato da una alta resistenza chimica e resistenza alle alte temperature, oltre a essere malleabile e quindi molto facile da lavorare.

Il comportamento opposto di ceramiche e polimeri ha spinto a cercare un modo per unire i vantaggi offerti dai due, portando alla creazione dei materiali compositi. Questi producono livelli di potenza di uscita inferiori a quelli delle ceramiche (circa un ordine di grandezza in meno), compensando a questa perdita con elasticità e robustezza. Le fibre di PZT sono i compositi più conosciuti e apprezzati: sono facili da produrre e trovano un ampio utilizzo nelle strutture a strati sottili. Solitamente, nelle fibre il 75% del volume consiste di materiale ceramico; con questa quantità la fibra di PZT presenta proprietà soddisfacenti per la maggior parte delle applicazioni.

Tra tutte le quattro categorie i materiali monocristallini offrono le prestazioni migliori, e il vantaggio è dovuto alla loro capacità di mantenere i dipoli quasi perfettamente allineati. La loro potenza in uscita è paragonabile a quella delle ceramiche garantendo al contempo una flessibilità e resistenza tipica dei polimeri. In aggiunta, garantiscono anche una densità di energia molto alta, rendendoli componenti ideali per la creazione di dispositivi molto piccoli. La loro diffusione è tuttavia limitata dall'alto costo legato alla produzione di materiale monocristallino sufficientemente puro. Il PMN-PT (Piombo Magnesio Niobato-Titanato di Piombo) è il materiale monocristallino più utilizzato: possiede un reticolo cristallino formato da ioni positivi e negativi altamente ordinati che concedono buone proprietà piezoelettriche.

## 2. Modelli circuitali di un energy harvester piezoelettrici

Il modello più comune di un harvester è dato dalla composizione di tre strutture elementari (Figura 2.1):

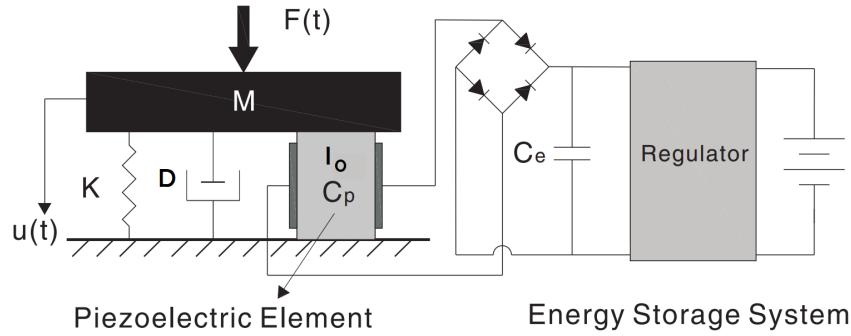
- sistema massa-molla-smorzatore;
- un sistema per la conversione e l'ottimizzazione della tensione;
- un'unità di immagazzinamento dell'energia prodotta.

Lo stress meccanico del materiale piezoelettrico è ottenuto dall'energia cinetica delle vibrazioni, di natura casuale. Per semplicità, di solito si assumono le vibrazioni di movimento sinusoidale. La conseguenza di questa assunzione è che la tensione prodotta dal generatore piezoelettrico è alternata. Si ipotizza inoltre che il dispositivo lavori in condizione di risonanza, cioè la frequenza della sorgente dell'energia cinetica coincide con la frequenza naturale del dispositivo, parametro legato allo strato di materiale rigido su cui è collegato lo strato piezoelettrico. Sotto queste ipotesi, l'energia prodotta dall'harvester è massima.

Dispositivi elettronici comuni e sistemi di immagazzinamento di energia richiedono una sorgente continua. È quindi necessario un convertitore AC-DC per ottenere una sorgente DC; inoltre il convertitore stabilizza la tensione prodotta e ottimizza la potenza erogata dall'harvester. Infine, si utilizza di solito una unità di accumulo, ad esempio un semplice condensatore, per poter incrementare la potenza erogata.

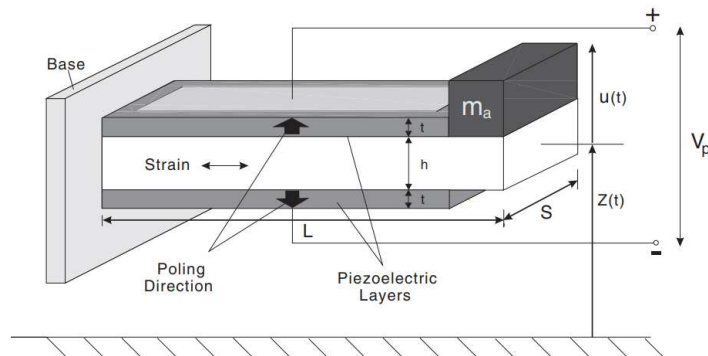
### 2.1 Modello a parametri concentrati

Esistono diversi tipi di design di generatori di energia elettrica mediante materiali piezoelettrici, tuttavia la configurazione di gran lunga più utilizzata è a “cantilever beam” (Figura 2.2). Questa consiste in una mensola collegata a una base fissa da



**Figura 2.1:** Modello a parametri concentrati di un tipico harvester piezoelettrico dotato di una struttura di accumulo [13].

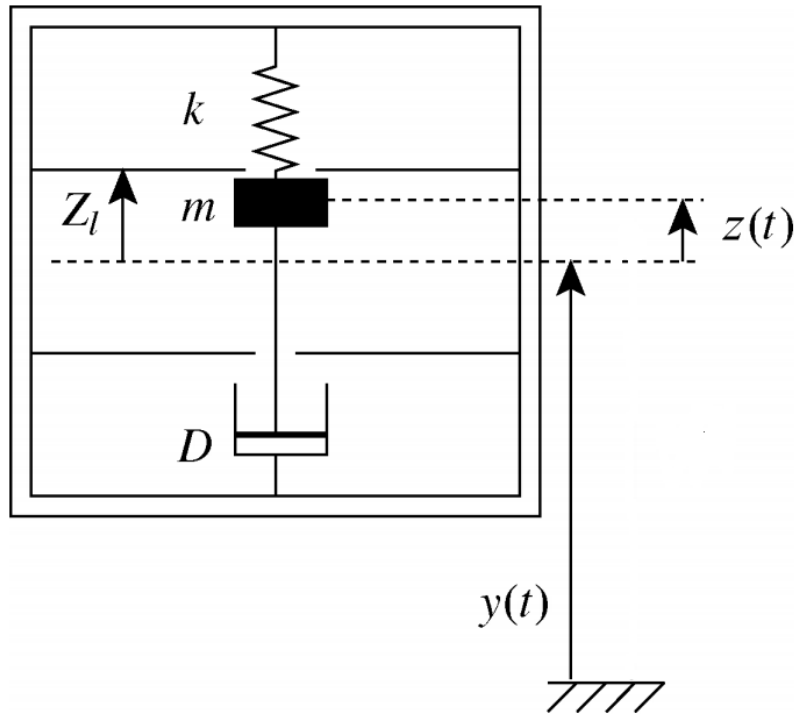
un lato, e lasciata libera di oscillare dall'altro. Diversi strati di materiale piezoelettrico sono posti nel lato lungo della mensola. All'estremità libera è collegata una "tip mass" che ha una duplice funzione. In primo luogo permette di modificare i parametri della mensola quali peso e frequenza di risonanza della stessa. In secondo luogo funziona come mezzo di trasferimento dell'energia cinetica in ingresso a energia potenziale della mensola conservata come stress meccanico [11]. Questo stress è quindi applicato agli strati piezoelettrici, che lo convertono in carica depositata lungo la mensola e che può essere estratta.



**Figura 2.2:** Generatore di energia elettrica a cantilever beam [13].

Il comportamento meccanico di un qualsiasi harvester piezoelettrico può essere analizzato prendendo in considerazione due parametri: la frequenza di risonanza e lo smorzamento. Il modello a parametri concentrati che descrive in modo efficace il comportamento del sistema è il sistema massa-molla-smorzatore (vedi Figura 2.3).

Questo è il sistema equivalente di un qualsiasi generatore di energia piezoelettrica, il quale ha una massa concentrata  $m$ , una rigidità  $K$  ed uno smorzamento equivalente  $D$  che descrivono nel modo più accurato possibile il comportamento di un harvester reale. Quando la massa oscilla alla frequenza di risonanza della potenza prodotta è massima; allo stesso tempo l'energia è estratta tramite lo smorzatore, ed è quindi legata alla costante  $D$ .



**Figura 2.3:** Modello a parametri concentrati di un cantilever beam detto sistema massa-molla-smorzatore [9].

Data un'oscillazione a frequenza  $\omega$ ,  $y(t) = Y_0 \cos(\omega t)$  è il movimento del sistema nella sua interezza e  $z(t) = Z_0 \cos(\omega t)$  la posizione effettiva della massa  $m$  rispetto alla sua posizione a riposo, valore influenzato sia dalla forza impressa al sistema che dallo smorzamento. L'equazione differenziale che governa il moto del sistema è [9]:

$$m\ddot{z} = -m\ddot{y} - D\dot{z} - kz(t). \quad (2.1)$$

Definendo la frequenza di risonanza  $\omega_n = \sqrt{k/m}$  e il fattore di smorzamento normalizzato  $\zeta = (\frac{D}{2m\omega_n})$ , si ottiene dalla (2.1) il rapporto tra la posizione netta della

massa  $m$  e il movimento del sistema come:

$$\frac{Z_0}{Y_0} = \frac{\omega_c^2}{\sqrt{(1 - \omega_c^2)^2 + (2\zeta\omega_c^2)^2}}, \quad (2.2)$$

dove  $\omega_c = \frac{\omega}{\omega_n}$  e  $Y_0$  e  $Z_0$  sono rispettivamente l'ampiezza dell'oscillazione del sistema e della massa  $m$ . La potenza meccanica generata si può ottenere dal prodotto tra la velocità  $\dot{z}(t)$  e la forza inerziale della massa  $m$  della mensola  $-m\ddot{y}(t)$  il cui modulo è pari a:

$$P = \frac{\zeta\omega_c^3 Y_0 \omega^3 m}{(1 - \omega_c^2)^2 + (2\zeta\omega_c^2)^2}. \quad (2.3)$$

La legge appena trovata vale in un sistema ideale, caratterizzato da una  $Z_0$  che può assumere qualsiasi valore. In particolare se  $\omega_c = 1$  (cioè  $\omega = \omega_n$ , ovvero la condizione di risonanza),  $Z_0$  tende a infinito e  $\zeta_{ott} = 0$ , ovvero la massa non viene smorzata e si muove con ampiezza infinita. In questa condizione si può estrarre energia infinita dalla sorgente. Al diminuire di  $Z_0$ ,  $\zeta$  diventa maggiore di 0 e la potenza ottenibile diminuisce.

Tuttavia, dato che la molla collegata alla massa si può comprimere fino a un certo punto,  $z(t)$  non può superare il valore massimo  $Z_l$ . Questa è una condizione che limita la potenza ottenibile dal sistema, e che rappresenta un possibile punto di miglioramento dell'efficienza del dispositivo. In un sistema reale allora esiste un valore massimo di potenza ottenibile. Fissato il fattore di smorzamento, derivando la (2.3) rispetto a  $\zeta$  e calcolando l'estremo relativo risulta:

$$\zeta_{ott} = \frac{1}{2\omega_c} |\omega_c^2 - 1|. \quad (2.4)$$

Sostituendo la  $\zeta_{ott}$  appena trovata nella (2.3), si può infine trovare il valore massimo di potenza che può essere convertita in energia elettrica come:

$$P_{max} = \frac{\omega_c^3 Y_0 \omega^3 m}{4|\omega_c^2 - 1|}. \quad (2.5)$$

Questo è il valore che si otterrebbe ignorando il limite fisico di  $Z_0$ , e vale dunque in un sistema ideale. Supponendo invece  $Z_0 < Z_l$ , è necessario modificare il coefficiente di smorzamento in modo che l'ampiezza  $Z_0$  rientri nel suo valore massimo. Il nuovo coefficiente di risonanza ottimale si ricava a partire dalla (2.2), e risulta:

$$\zeta_{ott,cz} = \frac{1}{2\omega_c} \sqrt{\omega_c^4 \left(\frac{Y_0}{Z_l}\right)^2 - (1 - \omega_c^2)^2}. \quad (2.6)$$



Sostituendo ancora una volta questo valore nella 2.3, si ottiene la nuova potenza meccanica massima che tiene conto dei limiti fisici del sistema. Questa vale:

$$P_{max,cz} = Y_0 \omega^3 m \frac{1}{2\omega_c} \left(\frac{Z_l}{Y_0}\right)^2 \sqrt{\omega_c^4 \left(\frac{Y_0}{Z_l}\right)^2 - (1 - \omega_c^2)^2}. \quad (2.7)$$

## 2.2 Convertitori per piezoelectric harvester

Per rendere utilizzabile l'energia prodotta dal materiale piezoelettrico, sono necessari dei convertitori in grado di prelevare la carica e successivamente stabilizzarla. Il circuito di estrazione più rudimentale è un semplice carico resistivo [1]. Al fine di analizzare tecniche diverse e più efficienti, è utile calcolare il valore della potenza estratta da questo circuito per utilizzarlo come base per un confronto. Avendo assunto la vibrazione come movimento sinusoidale, la corrente prodotta dal generatore piezoelettrico è alternata. Definendo  $I_0$  l'ampiezza di questa, se la frequenza è  $\omega$ , il massimo valore di potenza attiva è ottenuto per  $R_{load} = \frac{1}{\omega C_p}$  e vale:

$$P_{ott,Rload} = \frac{1}{4} \left(\frac{I_0^2}{\omega C_p}\right), \quad (2.8)$$

dove  $C_p$  è la capacità interna dello strato piezoelettrico. Dato che la tensione prodotta è alternata, nella pratica un circuito di questo tipo è sconveniente e di conseguenza non viene mai utilizzato.

### Ponte raddrizzatore

Il primo accorgimento prevede di rendere l'energia prodotta utilizzabile convertendo la tensione da AC a DC. Il modo più semplice consiste nell'utilizzare un ponte a diodi con un condensatore in parallelo. Il circuito in questione è mostrato nella Figura 2.4. Il ponte a diodi raddrizza la semi-onda di tensione negativa, producendo una tensione che oscilla attorno a un valore medio a causa del ripple. Sfruttando la capacità di accumulare e rilasciare carica di un condensatore è possibile ridurre notevolmente questa ondulazione. Se la capacità  $C_0$  del condensatore è sufficientemente grande e la costante di tempo  $RC_0$  è maggiore del periodo di oscillazione di  $I_0$ , allora il ripple è trascurabile e  $V_{out}$  è pressoché costante. Definendo la tensione  $V_{po}$  ai capi della

capacità piezoelettrica (vedi Figura 2.4) come

$$V_{po} = \frac{I_0}{\omega C_p}, \quad (2.9)$$

si trova la potenza media di uscita in funzione di  $V_{out}$  e  $I_0$ . Questa è:

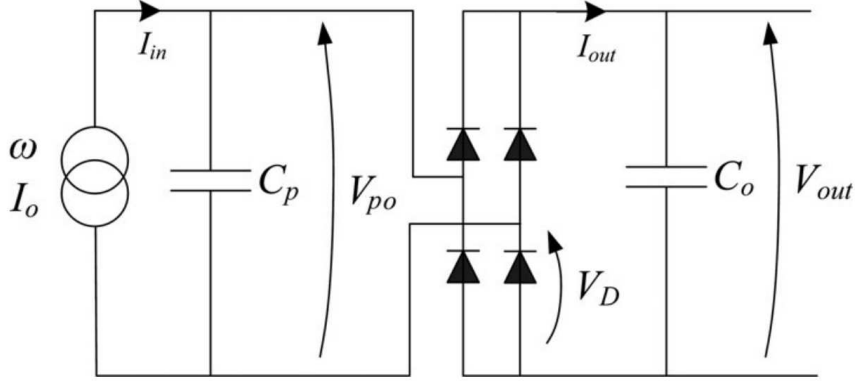
$$P_{out} = \frac{2}{\pi} I_0 V_{out} \left(1 - \frac{V_{out} - 2V_D}{V_{po}}\right), \quad (2.10)$$

dove  $V_D$  è la caduta di tensione dei diodi considerati non ideali. La tensione di uscita ottimale calcolata da  $\frac{dP_{out}}{dV_{out}} = 0$  è:

$$V_{out,ott} = \frac{1}{2}(V_{po} - 2V_D), \quad (2.11)$$

e, sostituendola nell'equazione della potenza appena trovata, si ottiene:

$$P_{max} = \frac{(I_0 - 2V_D \omega C_p)}{2\pi \omega C_p} = \frac{1}{2\pi} \left(1 - \frac{2V_D}{V_{po}}\right)^2 \left(\frac{I_0^2}{\omega C_p}\right). \quad (2.12)$$



**Figura 2.4:** Modello di un circuito AC-DC basato su un ponte a diodi [1].

Per confrontare il risultato ottenuto con quello riguardante il solo carico resistivo, è più conveniente supporre i diodi ideali, per i quali  $V_D = 0$ . In questo caso

$$P_{max, V_D=0} = \frac{I_0^2}{2\pi \omega C_p}, \quad (2.13)$$

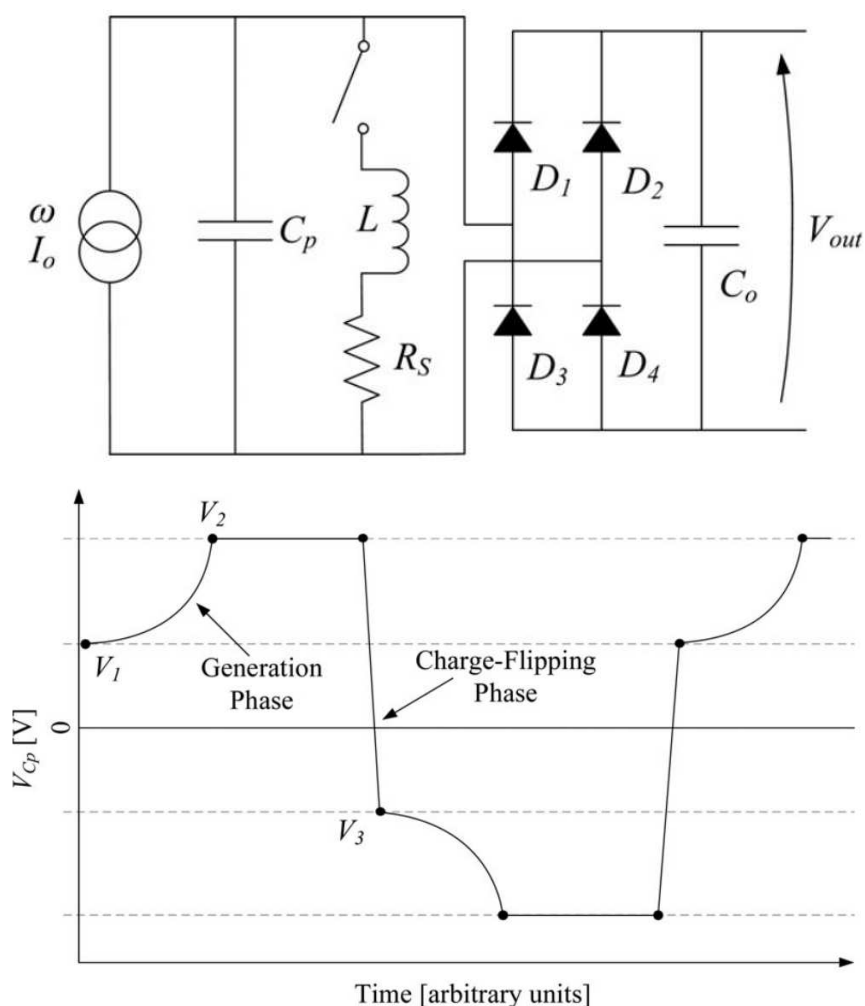
e quindi:

$$\frac{P_{rett}}{P_{Rload}} = \frac{2}{\pi} \approx 0.64. \quad (2.14)$$

La potenza estraibile con un ponte raddrizzatore è quindi sensibilmente inferiore di quella con solo un carico resistivo. Se si considerano i diodi non ideali il rapporto  $\frac{P_{rett}}{P_{Rload}}$  diminuisce ulteriormente. Nonostante questo, il ponte raddrizzatore è generalmente una soluzione più utile del circuito a solo carico resistivo in quanto offre in uscita una tensione DC.

## SSHI

L'SSHI (Synchronized Switch Harvesting with Inductor) è una tecnica di estrazione dell'energia elettrica che utilizza un induttore per invertire la corrente nel condensatore  $C_p$  due volte per periodo. In base a come è collegato l'induttore e al tipo di estrazione della potenza, si distinguono quattro tipi di circuiti: gli SSHI paralleli o serie, con carico resistivo o uscita DC. I risultati qui mostrati fanno riferimento alla configurazione di un SSHI parallelo con uscita DC (vedi Figura 2.5); le altre configurazioni garantiscono rendimenti simili.



**Figura 2.5:** Modello di un circuito AC-DC (alto) e circuito equivalente che descrive il comportamento dell'elemento piezoelettrico (basso) [1].

Osservando il grafico della forma d'onda di tensione visibile in Figura 2.5 è pos-

sibile distinguere due fasi di funzionamento del circuito. La prima fase, detta di generazione, consiste nella carica della capacità  $C_p$ ; in questa situazione la tensione ai capi del condensatore passa da  $V_1$  a  $V_2$ . Nella seconda fase, detta di inversione di carica, l'interruttore viene aperto, la corrente che lo attraversa diventa nulla e la tensione ai capi ai suoi capi cambia di segno, cambiando di conseguenza anche la polarità della carica. In questa fase la tensione passa da  $V_2$  a  $V_3$ , dove  $V_3 = -\gamma V_2$ , e che a regime stazionario coincide con  $-V_1$ . Per riportare la tensione al valore limite  $-V_2$  è necessario fornire al condensatore ulteriore carica. La differenza tra la tensione che si vuole raggiungere e quella che si ha dopo l'inversione della carica ai capi del condensatore è:

$$V_2 - \gamma V_2 = \frac{1}{C_p} \int_0^\tau I_0 \sin(\omega t) dt \quad (2.15)$$

dove  $\gamma = e^{-\frac{\pi}{2Q}}$  e  $Q = \frac{1}{R_s} \sqrt{\frac{L}{C_p}}$ . I parametri  $\tau$ ,  $\gamma$  e  $Q$  sono rispettivamente: il tempo necessario per raggiungere la tensione massima, la frazione di tensione conservata nella capacità  $C_p$  dopo l'inversione della carica e il fattore di qualità dell'induttore. Da questa equazione si ricava:

$$\cos(\omega t) = 1 - \frac{V_2}{V_{po}}(1 - \gamma), \quad (2.16)$$

che permette di calcolare l'energia fornita all'uscita in mezzo periodo, che risulta:

$$E_{\frac{T}{2}} = I_0 V_{out} \int_\tau^{\frac{\pi}{\omega}} \sin(\omega t) dt = C_p V_{po} V_{out} \left[ 2 - \frac{(1 - \gamma)(V_{out} + 2V_d)}{V_{po}} \right]. \quad (2.17)$$

L'energia è massima se  $V_{out} = \frac{V_{po}}{1 - \gamma} - V_d$ , per la quale la potenza massima in uscita è:

$$P_{max} = \left[ 1 - \frac{\pi}{2Q} \frac{V_D}{V_{po}} \right]^2 \left( \frac{2Q}{\pi^2} \right) \left( \frac{I_0^2}{\omega C_p} \right). \quad (2.18)$$

Analogamente a quanto fatto per il ponte raddrizzatore, è più conveniente considerare i diodi ideali per rendere il confronto con il circuito a solo carico resistivo più semplice. In questo caso il primo termine di  $P_{max}$  è pari a 1 e risulta:

$$\frac{P_{||,rett}}{P_{Rl}} = \frac{8Q}{\pi^2}, \quad (2.19)$$

dove  $P_{||,rett}$  è la potenza massima in uscita prodotta dal circuito SSHI parallelo con tensione raddrizzata. Più alto è  $Q$ , più il rapporto aumenta e più efficiente è il

circuito. Nel caso reale ( $V_D \neq 0$ ) si ottiene un risultato tanto più vicino a quello ideale tanto più alti sono  $V_{po}$  e  $Q$ . Si osserva inoltre che il rapporto ottenuto nella (2.19) diversamente da quello nella (2.14) è maggiore di 1 (solitamente vale circa 9). Il miglioramento rispetto alle tecniche precedenti è sensibile, ed è ottenuto senza particolari aumenti della complessità del circuito. Le altre tipologie di SSHI non analizzate hanno prestazioni molto simili a quelle del parallelo con uscita DC.

Nelle applicazioni pratiche si utilizzano gli SSHI ad uscita continua. I ponti raddrizzatori sono meno efficienti dei primi a causa della caduta di tensione sui diodi. Per quanto riguarda gli SSHI a carico resistivo, questi non sono utilizzati a causa dell'uscita alternata che forniscono.

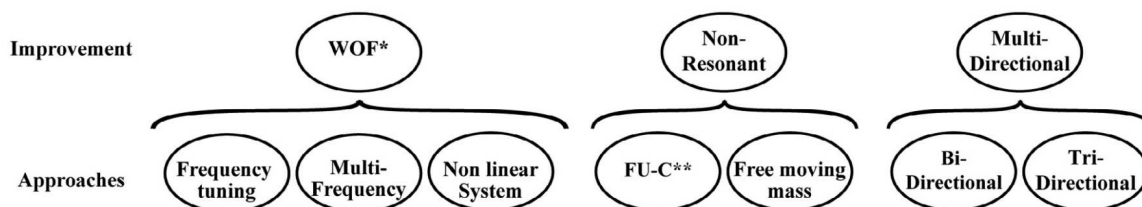


### 3. Energy harvester piezoelettrici con design ottimizzato

La ricerca sugli energy harvester è in forte crescita negli ultimi anni grazie all'elevato numero di applicazioni in cui sono utilizzati. Uno dei campi di ricerca più attiva riguarda le tecniche per il miglioramento della loro efficienza (vedi Figura 3.1) . A tal fine si stanno percorrendo diversi approcci, che vanno dal perfezionamento di un harvester singolo alla creazione di un dispositivo ibrido. Nel primo caso in letteratura si distinguono tre principali classi di dispositivi [8]:

- sistemi multifrequenza;
- sistemi non risonanti;
- sistemi multidirezionali.

Tutte queste tecniche effettuano delle modifiche al design di un harvester classico per permettere al dispositivo di lavorare in risonanza in un range più ampio di situazioni. Facendo riferimento al modello a parametri concentrati, si modificano i parametri che definiscono frequenza di risonanza ( $\omega_n = \sqrt{k/m}$ ) e smorzamento, che modificano a loro volta l'efficienza dell'harvester.



**Figura 3.1:** Tipologie di miglioramenti per un harvester. WOF: ampliamento banda di funzionamento, FU-C: “frequency up-conversion” [8].

## 3.1 Sistemi multifrequenza

In fase di progettazione, la selezione della frequenza di risonanza è fondamentale per garantire massima efficienza del dispositivo. Tuttavia non è sempre possibile poter utilizzare un harvester a tale frequenza, dal momento che spesso le vibrazioni sono distribuite in uno spettro di frequenze. Una possibile soluzione al problema consiste nel riprogettare l'harvester in modo che esso possa risultare in risonanza con quante più frequenze possibili. Nei prossimi paragrafi sono descritte alcune tecniche sviluppate con questo obiettivo: queste spaziano da modifiche strutturali effettuate al momento della fabbricazione o in risposta alle specifiche condizioni di lavoro, allo sfruttamento della teoria della non linearità per modificare il funzionamento degli harvester normali.

### 3.1.1 Sistemi a massa mobile

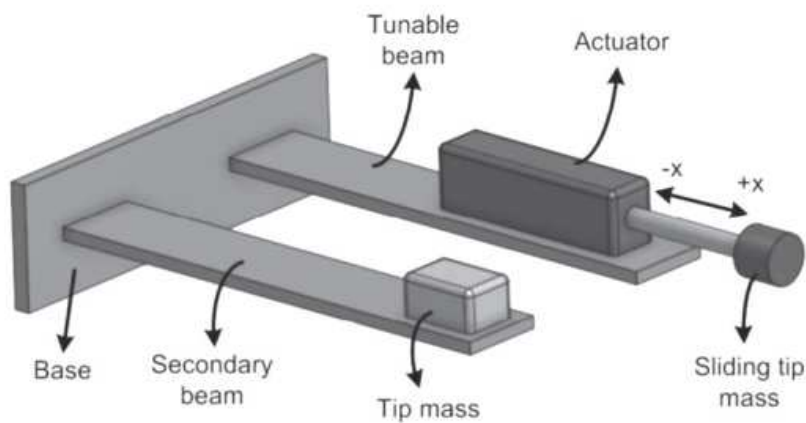
È possibile variare la frequenza di risonanza dell'harvester agendo sulla posizione di una massa mobile aggiuntiva collegata alla tip mass rispetto al dispositivo. Spostando la posizione della massa supplementare si agisce sul baricentro del sistema, modificando di conseguenza la frequenza naturale del dispositivo. L'obiettivo di questa categoria di harvester è di essere in grado di sintonizzarsi autonomamente in base alle particolari condizioni di lavoro, e con un utilizzo minimo di energia.

Nella Figura 3.2 è presentato uno schema di un dispositivo a massa mobile [8]. Questo sfrutta due diversi cantilever beam, entrambi dotati di un film piezoelettrico, ma che svolgono funzioni diverse. La prima mensola è sintonizzabile ed è utilizzata come generatore di energia elettrica. A questa è collegata una massa addizionale che può scorrere su un'asta. La posizione di questa modifica il baricentro della mensola: se la massa si trova nel punto più esterno la frequenza naturale del sistema è minima, e il suo valore aumenta man mano che viene spostata verso l'interno. La seconda mensola è necessaria per modificare la posizione della massa addizionale, spostandola in base al risultato di un opportuno algoritmo di sincronizzazione che analizza la vibrazione della mensola per ricavare la frequenza della sorgente, e tramite un attuatore che regola la posizione della massa mobile. L'operazione di sintonizzazione



richiede solamente un piccolo utilizzo di energia: il sistema aggiuntivo funziona solamente quando è necessario modificare la frequenza naturale; in tutti gli altri momenti è spento e non consuma energia.

La risposta del sistema al variare della frequenza è mostrata in Figura 3.3. I diversi picchi di tensione corrispondono a una specifica posizione della massa aggiuntiva che fa eguagliare la frequenza naturale del dispositivo a quella della sorgente del movimento. Sommando tutte le curve, la banda dell'harvester si osserva essere ora larga circa 5 Hz.

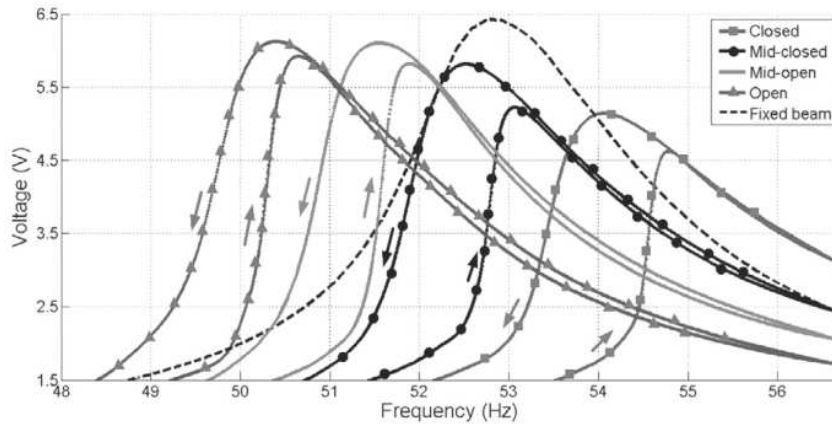


**Figura 3.2:** Harvester piezoelettrico sintonizzabile a più frequenze tramite il posizionamento di una massa aggiuntiva [8].

### 3.1.2 Sistemi a rigidità variabile

Così come è possibile cambiare la frequenza di risonanza del dispositivo modificando il baricentro della mensola, è altresì possibile ottenere risultati simili modificando la sua rigidità. Un sistema di questo tipo richiede di implementare una molla aggiuntiva, detta molla negativa, che viene realizzata sfruttando interazioni piezoelettriche, elettrostatiche o magnetiche. Le prime due opzioni tuttavia richiedono circuiti aggiuntivi, che richiedono un consumo aggiuntivo di potenza elettrica, e non sono mai utilizzate.

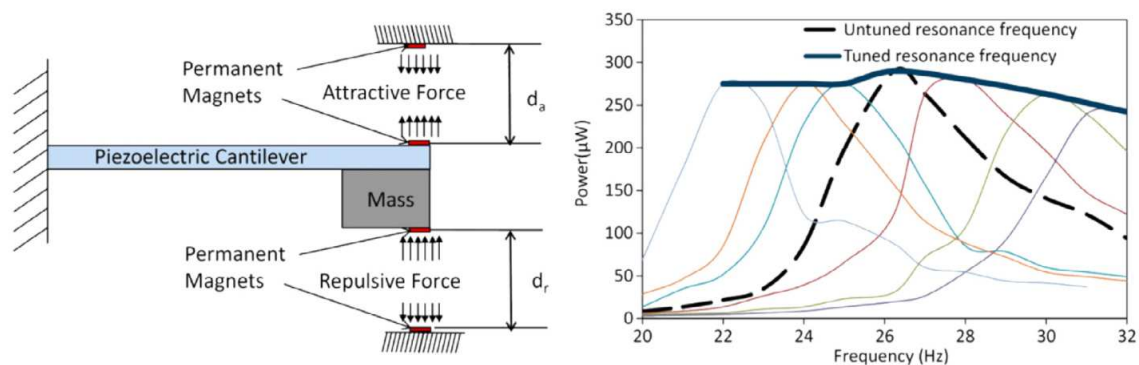
La Figura 3.4 mostra un sistema capace di variare rigidità della struttura vi-



**Figura 3.3:** Tensione prodotta al variare della frequenza dell'harvester piezoelettrico sintonizzabile a più frequenze [8].

brante. Ancora una volta è ripreso lo schema di un harvester a cantilever beam, al quale sono fatti due accorgimenti. Anzitutto sono aggiunte due coppie di magneti: due posizionati a ciascun lato dell'estremità libera della mensola, gli altri a una piccola distanza dai primi. Inoltre anche la mensola è modificata, ora ancorata su un morsetto mobile. Cambiandone la posizione verticale è possibile variare la distanza relativa tra le coppie di magneti. Questo permette di modificare la forza magnetica, essendo questa dipendente dalla distanza tra i magneti. La forza magnetica agisce sull'elemento vibrante, cioè la mensola, modificandone la rigidità; di conseguenza, anche la frequenza naturale dell'harvester varia. Se la forza è repulsiva la rigidità aumenta, mentre se è attrattiva diminuisce. Anche per questo sistema si osservano sensibili miglioramenti nelle prestazioni dell'harvester.

Nel grafico in Figura 3.4 è mostrata la potenza in uscita del sistema in funzione della frequenza in due situazioni. La curva tratteggiata corrisponde al funzionamento dell'harvester con la frequenza di risonanza non sintonizzata. È chiaro come in questo caso si ottiene un solo picco di potenza per una specifica frequenza della sorgente. La linea continua in grassetto corrisponde invece al funzionamento dell'harvester se la frequenza naturale è sintonizzata. In questo caso la linea è data dalla somma dei picchi colorati: approssimativamente l'harvester lavora in risonanza per una banda larga 10 Hz.

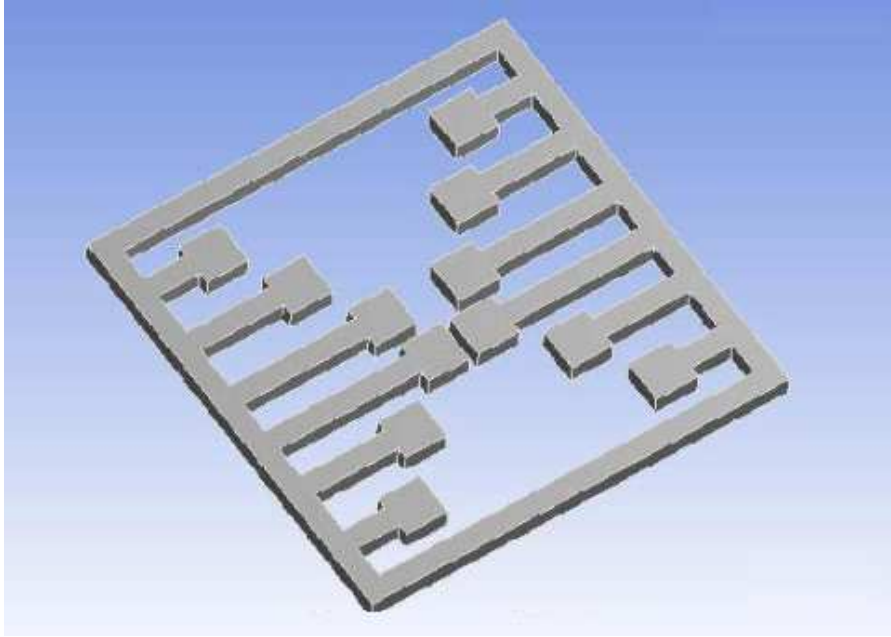


**Figura 3.4:** Modello di un harvester piezoelettrico in grado di modificare la propria costante elastica (sinistra) e relativa potenza in uscita (destra) [8].

### 3.1.3 Sistemi accordati su più frequenze

I due dispositivi esposti nei due paragrafi precedenti modificano di volta in volta la propria frequenza naturale per adeguarsi alle specifiche condizioni di lavoro. Un approccio differente consiste in un sistema che è simultaneamente sintonizzato su più frequenze. L'idea alla base è semplice: collegare tra loro diversi componenti elementari e sintonizzare ciascuno su una frequenza diversa. Quando una forza esterna agisce su questa struttura, tutti i sottosistemi cominciano a vibrare; se la frequenza dell'eccitazione è compresa nella banda del dispositivo, allora almeno uno dei sottosistemi risulta in risonanza. Questi tipi di sistemi presentano vantaggi e svantaggi: se da un lato sono semplici da realizzare, dall'altro richiedono molto più spazio rispetto al singolo cantilever, rendendo questa soluzione impraticabile nei dispositivi di piccole dimensioni.

La configurazione più utilizzata prende il nome di "cantilever array". Come suggerisce il nome, i componenti elementari sono delle mensole. Modificando numero e lunghezza di queste è possibile regolare le proprietà del sistema con l'obiettivo di avere uno spettro di frequenze che sia il più continuo e uniforme possibile. La potenza totale prodotta è data dalla potenza sviluppata da ciascun elemento; la difficoltà sta nel trovare il rapporto ottimale tra area occupata, potenza prodotta e banda di frequenze coperta. Date le diverse possibilità derivanti dalle combinazioni tra lunghezza e numero di mensole, questo sistema si presta per un'ampia varietà di applicazioni.



**Figura 3.5:** Esempio di harvester piezoelettrico con configurazione a cantilever array [10].

### 3.1.4 Sistemi non lineari

La teoria della non linearità suggerisce come gli oscillatori non lineari possono potenzialmente essere più efficienti meglio dei dispositivi classici [4]. Esistono diversi principi di non linearità, e sono già stati creati diversi dispositivi che ne fanno uso. In alcuni casi però l'aumento delle prestazioni non giustifica il livello di complessità aggiunta rispetto a un harvester classico.

L'obiettivo degli oscillatori non lineari è di avere un sistema poco complesso, semplice da realizzare, e capace di sfruttare la non linearità a valori sia alti che bassi di frequenza e ampiezza. Il primo passo è solitamente l'introduzione di un termine non lineare che agisce come forza di ripristino. La forza di ripristino tenta di riportare un sistema al suo stato di equilibrio, che negli harvester piezoelettrici si considera essere la condizione di lavoro in risonanza.

#### Non linearità di Duffing

Considerando le vibrazioni, la non linearità più importante è la non linearità di Duffing, dal dispositivo omonimo oscillatore Duffing [4]. L'equazione Duffing è usata

per descrivere il movimento oscillatorio di un sistema smorzato con un potenziale più complesso rispetto a quello di un semplice movimento armonico (ad esempio una molla che non obbedisce alla legge di Hooke). L'equazione è [14]:

$$\gamma \cos(\omega t) = \ddot{x} + \delta \dot{x} + x + \beta x^3, \quad (3.1)$$

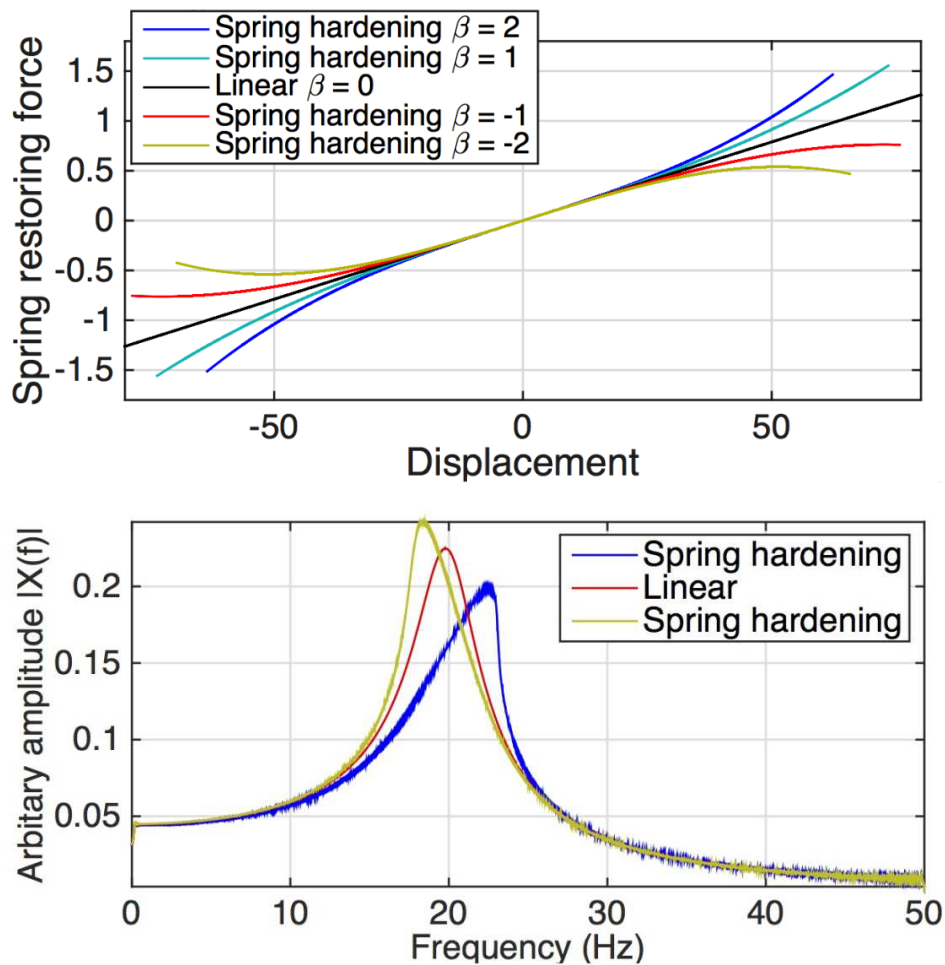
dove  $x$  è la posizione,  $\dot{x}$  la velocità e  $\ddot{x}$  l'accelerazione. I parametri indicano:

- $\delta$  lo smorzamento del sistema;
- $\alpha$  l'elasticità lineare del sistema;
- $\beta$  la quantità di non linearità della forza di ripristino. Se  $\beta = 0$  l'equazione descrive un sistema smorzato e con un'oscillazione armonica;
- $\gamma$  e  $\omega$  rispettivamente l'ampiezza e la pulsazione della forza impressa al dispositivo.

La forza di ripristino è ottenuta dalla combinazione lineare di due forze elastiche, una lineare e l'altra no. Le caratteristiche della forza sono definite dal parametro  $\beta$ : più alto è  $\beta$ , più grande è il range di variazione della forza di ripristino (vedi Figura 3.6). Sfruttando la forza di ripristino è possibile modificare il comportamento del picco di risonanza, che può essere spostato in modo da coprire una banda di frequenze più larga. I test pratici dell'oscillatore Duffing tuttavia mostrano qualche problema. Il sistema presenta effettivamente una banda più larga sotto impulsi sinusoidali; tuttavia questi non sono sufficientemente accurati per descrivere le eccitazioni reali. Sperimentalmente, quando sottoposto a eccitazioni reali (quindi vibrazioni che provengono da diversi tipi di sorgenti e spesso non sinusoidali) la potenza media prodotta dall'oscillatore Duffing ha lo stesso ordine di grandezza degli oscillatori lineari. Questo è dovuto al fatto che in situazioni reali le condizioni per accedere alla banda più larga sono difficili da raggiungere. Attualmente l'oscillatore Duffing è quindi vantaggioso solo se le condizioni di lavoro sono note a priori.

## 3.2 Sistemi non risonanti

I dispositivi analizzati finora sono sistemi dinamici pensati per lavorare in condizione di risonanza. La maggior parte degli harvester di questo tipo però è in grado di la-



**Figura 3.6:** Forza di ripristino della molla secondo diversi  $\beta$  (alto) e impatto sulla frequenza del picco di uscita per diversi  $\beta$  (basso) [4].

vorare in modo efficiente solo a frequenze sopra i 50 Hz. In molte applicazioni la sorgente vibrante è tuttavia a bassa frequenza. Risulta quindi interessante esaminare le tipologie di harvester che lavorano in queste condizioni. L'idea fondante dei sistemi non risonanti consiste nell'avere un'efficienza indipendente dalla frequenza. Si distinguono due classi di harvester non risonanti: i *Frequency-up Conversion Systems* (FU-C) e i sistemi con una massa libera [8].

Il primo gruppo di dispositivi combina tra loro un dispositivo che lavora a bassa frequenza e uno ad alta frequenza. Inizialmente l'eccitazione esterna viene assorbita come energia potenziale dal sistema a bassa frequenza. Tramite un urto, l'energia cinetica è quindi trasferita al secondo che la converte in energia elettrica. La particolarità dei FU-C è che possono utilizzare come base due sistemi risonanti. È quindi

possibile riprendere le proprietà specifiche di questi dispositivi, come l'averne un picco di tensione sviluppata in frequenza di risonanza per migliorare ulteriormente le capacità dei FU-C.

Il punto di forza degli harvester a massa libera è che vantano complessità ridotta. L'idea alla base consiste di una massa inserita in un contenitore e libera di muoversi. Ricoprendo le pareti del contenitore con un film di materiale piezoelettrico, quando la massa muovendosi entra in contatto con le pareti e trasferisce energia cinetica al film. Dispositivi di questo tipo attingono principalmente a fonti di energia caratterizzate da basse frequenze e grandi ampiezze o che sono casuali (come i movimenti umani).

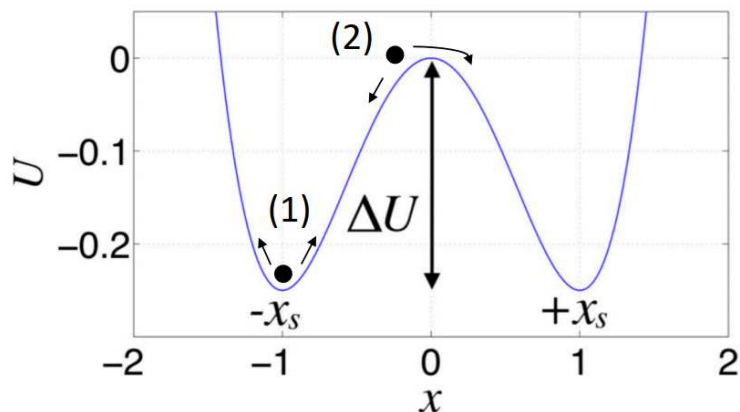
## **Bistabilità**

Con la non linearità è possibile creare un harvester non risonante tramite la bistabilità. Questo è un sistema dinamico caratterizzato dall'averne due punti di equilibrio stabili. La forza di ripristino è in tal caso data da due molle a costanti elastiche negative. Si può dedurre il principio di funzionamento di un sistema bistabile dal grafico dell'energia potenziale in Figura 3.7 corrispondente a un dispositivo di questo tipo[4]. Ci sono due buche di potenziale nelle quali il sistema è stabile; per passare da una all'altra è necessario fornire al sistema un'energia tale da superare il potenziale di barriera che le separa.

Energia elettrica è sviluppata in due modi diversi: tramite il metodo visto finora di conversione di energia meccanica in elettrica quando il sistema si trova in una delle due regioni stabili, o attraverso il rilascio di energia prodotto dal passaggio del sistema da una regione all'altra. Nel secondo caso l'energia rilasciata è pari a  $\Delta U$  cioè il potenziale di barriera. La proprietà più importante dei sistemi bistabili è che il potenziale di barriera è indipendente dalla frequenza dell'eccitazione ma dipendente dall'ampiezza dell'oscillazione. Questi sistemi possono quindi lavorare alla massima efficienza sotto la sola condizione di grandi ampiezze. Data questa proprietà, la bi-stabilità costituisce una alternativa migliore agli harvester classici nelle applicazioni a bassa frequenza. L'unico svantaggio è dato dal fatto che la risposta oscillatoria del sistema nelle buche di potenziale produce meno energia rispetto agli

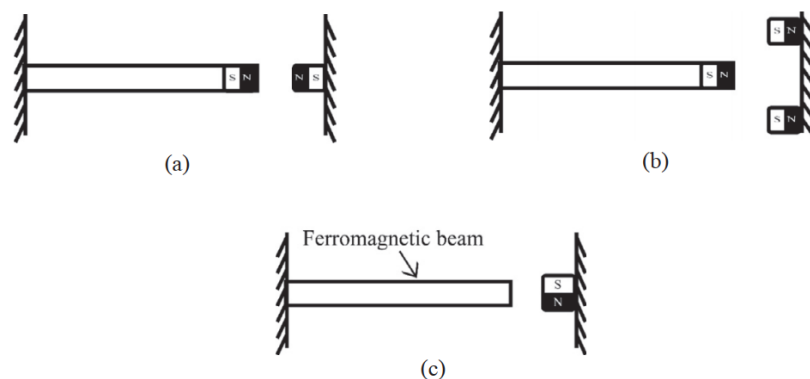
harvester lineari a causa dello stress maggiore imposto alla mensola per indurre la bistabilità.

Un esempio di sistema bistabile è dato da un cantilever beam soggetto a una forza magnetica. Solitamente, sono impiegati due o più magneti: un magnete è posto all'estremità libera della mensola; la posizione degli altri dipende dal tipo di configurazione adottato. La Figura 3.8 mostra tre possibili configurazioni. Nella configurazione (a) è sfruttata la repulsione: quando la mensola si trova sopra o sotto il magnete il sistema si trova in una buca di potenziale; per passare da una parte all'altra deve essere fornita energia corrispondente al potenziale di barriera. Nella configurazione (b) vengono usati invece due magneti per attrarre la mensola nelle zone stabili tra i due. Nella configurazione (c) è utilizzata una mensola di materiale ferromagnetico. Questa è respinta da entrambi i poli: posizionando il magnete opposto alla mensola, si creano due zone stabili sopra e sotto il magnete ricreando il funzionamento del caso (a). La distanza tra mensola e magnete libero influenza la risposta del sistema. Aumentando la distanza diminuisce la forza di ripristino in un comportamento simile a quello dell'oscillatore di Duffing per  $\beta$  minori di 0.



**Figura 3.7:** Grafico energia potenziale per un sistema bi-stabile [4].





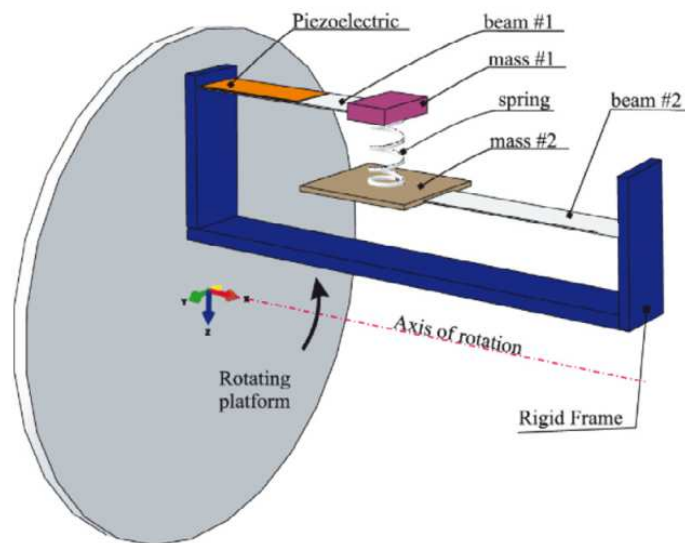
**Figura 3.8:** Diverse posizioni relative tra un cantilever beam e un magnete. (a) Singola repulsione, (b) Doppia attrazione, (c) Mensola ferromagnetica con un singolo magnete [8].

### 3.3 Harvester multidirezionali

La maggior parte degli harvester sono progettati per reagire a impulsi unidirezionali. Considerando però la natura tridimensionale del movimento, una logica evoluzione degli harvester prevede la capacità di produrre energia a partire da una qualsiasi eccitazione. Gli harvester multidirezionali si basano su questo principio. In letteratura si distinguono in due classi: gli harvester bidirezionali e tridirezionali.

L'harvester bidirezionale più semplice è costituito da due cantilever beam perpendicolari. È facile notare come questa sia semplicemente la sovrapposizione di due dispositivi unidimensionali; generalmente, queste categorie di dispositivi prevedono l'utilizzo di più sottosistemi che possono interagire o meno tra loro. In Figura 3.9 è presentato un harvester che utilizza una struttura rotante come base a due cantilever beam [2]. Questo è uno dei pochi "Rotational Energy Harvester" (REH) che si trovano in letteratura. Essi sfruttano dispositivi che ruotano, come le ruote di un'auto, per far ruotare su sé stessa la piattaforma alla base dell'harvester (in questo caso alle due mensole). La forza agente sulle mensole è data dalla somma tra la forza di gravità e la forza centrifuga: se queste due sono variabili ma comparabili tra loro, le mensole vibrano. Dato che il sistema è in continuo movimento, il modulo della forza centrifuga continua a cambiare. È possibile che il sistema raggiunga la condizione di equilibrio (le due forze sono uguali e opposte); questa condizione tut-

tavia non è mai permanente, essendo appunto il sistema in continua evoluzione. Di conseguenza le mensole sono sempre in vibrazione e l'harvester produce energia elettrica. Agendo su parametri quali lunghezza, larghezza e posizione rispetto all'asse di rotazione delle mensole, è possibile modificare la forza centrifuga e sincronizzare la frequenza di risonanza del dispositivo alla frequenza dell'eccitazione esterna in modo da massimizzare le prestazioni. Collegare con una molla lineare le due mensole permette di evitare movimenti imprevedibili del sistema che possono causare problemi (arrivando anche alla rottura del dispositivo) e facilita allo stesso tempo la modifica della geometria delle mensole. Inversamente, è possibile utilizzare una molla non lineare: si sacrifica la sicurezza data dalla prevedibilità del sistema per ottenere una potenza prodotta più alta. Questo sistema funziona principalmente a basse frequenze, e produce livelli di potenza (50-100  $\mu\text{W}$ ) sufficienti ad alimentare piccoli dispositivi wireless.



**Figura 3.9:** Harvester piezoelettrico posto su una piattaforma rotante [8].

## 4. Harvester ibridi

Nel precedente capitolo sono stati analizzati diversi metodi tramite i quali è possibile incrementare le prestazioni degli harvester piezoelettrici modificandone il design. Una seconda via per ottenere risultati simili prevede invece di creare degli harvester ibridi. Questi possono essere suddivisi in due categorie in base alle strategie di conversione utilizzate. Una prima possibilità consiste nello sfruttare più meccanismi di conversione energetica e una sola sorgente vibrante. La combinazione più studiata abbina un sistema piezoelettrico ad uno elettromagnetico. Integrando tali sistemi è possibile incrementare notevolmente le prestazioni rispetto ad un singolo harvester piezoelettrico. Una seconda possibilità è quella di sfruttare diverse sorgenti di energia: ad esempio il movimento umano è fonte contemporaneamente di vibrazioni e calore, quindi è possibile progettare un sistema in grado di estrarre energia elettrica sfruttando due fonti di energia differenti [7].

Data la grande disponibilità nell'ambiente di calore ed energia cinetica, la maggior parte degli harvester ibridi si focalizza su metodi per ricavare energia da queste due fonti. Per quanto riguarda l'energia cinetica si distinguono tre diversi meccanismi di conversione: piezoelettricità, elettromagnetismo e triboelettricità. Energia elettrica è ottenibile tramite elettromagnetismo creando corrente indotta in una bobina a seguito di una variazione del flusso magnetico dovuto al movimento di un magnete. Per quanto riguarda la triboelettricità, questa consiste nella comparsa di una tensione su due materiali dopo averli strofinati tra loro. Un'altra possibilità è quella di creare un dispositivo che sfrutti uno dei tre metodi appena descritti combinato a un generatore termoelettrico. Generalmente, l'energia cinetica è accompagnata da una variazione della temperatura, quindi la combinazione tra questi due effetti è facile da ottenere. L'harvesting da sorgenti di calore consiste in due metodi: termoelettricità e piroelettricità. Entrambi richiedono una variazione della temperatura: di natura spaziale nel primo caso, e temporale nel secondo.

Un sistema che unisce differenti meccanismi di conversione è tuttavia solo il

primo passo verso un dispositivo che sia più vantaggioso di un harvester classico. Nella creazione degli harvester ibridi si sono infatti riscontrati dei problemi che impediscono di sfruttare a pieno le potenzialità di questi dispositivi e che è necessario risolvere. Anzitutto la poca sinergia tra i vari metodi di conversione si traduce in sistemi che sono semplicemente l'unione di due diversi harvester che non interagiscono tra loro. Questo può portare a grandi differenze di performance tra i meccanismi, con una bassa efficienza complessiva del dispositivo. Un ulteriore problema è invece legato ai convertitori dell'energia elettrica. Ogni diverso metodo di conversione al momento richiede un circuito a sé stante, con notevole complessità e incremento dello spazio occupato dal convertitore. Idealmente si vorrebbe ottenere un harvester la cui potenza prodotta sia pari alla somma delle due potenze massime che possono produrre i due meccanismi separatamente. Un risultato di questo tipo non è ottenibile solo tramite la semplice integrazione in un dispositivo di due meccanismi di conversione separati, ma richiede un'effettiva sinergia tra i due metodi. La maggior parte delle ricerche è quindi attualmente focalizzata nel trovare una soluzione a questi problemi.

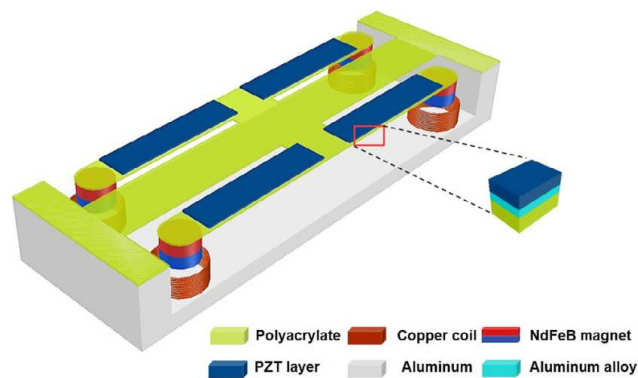
## 4.1 Harvester piezoelettrici-elettromagnetici

Gli harvester piezoelettrici-elettromagnetici (PE-EM) sono i più utilizzati, data la loro semplicità di realizzazione. Per integrare la conversione elettromagnetica in un harvester piezoelettrico sono necessarie poche modifiche al design, in quanto l'aggiunta di una bobina e di un altro convertitore dell'energia elettrica prodotta sono sufficienti. Un semplice esempio lo si può individuare nell'harvester con una massa libera discusso nella sezione 3.2. Se la massa è un magnete, l'aggiunta di una bobina vicino al contenitore permette di sfruttare il movimento della massa anche per creare una variazione di flusso magnetico.

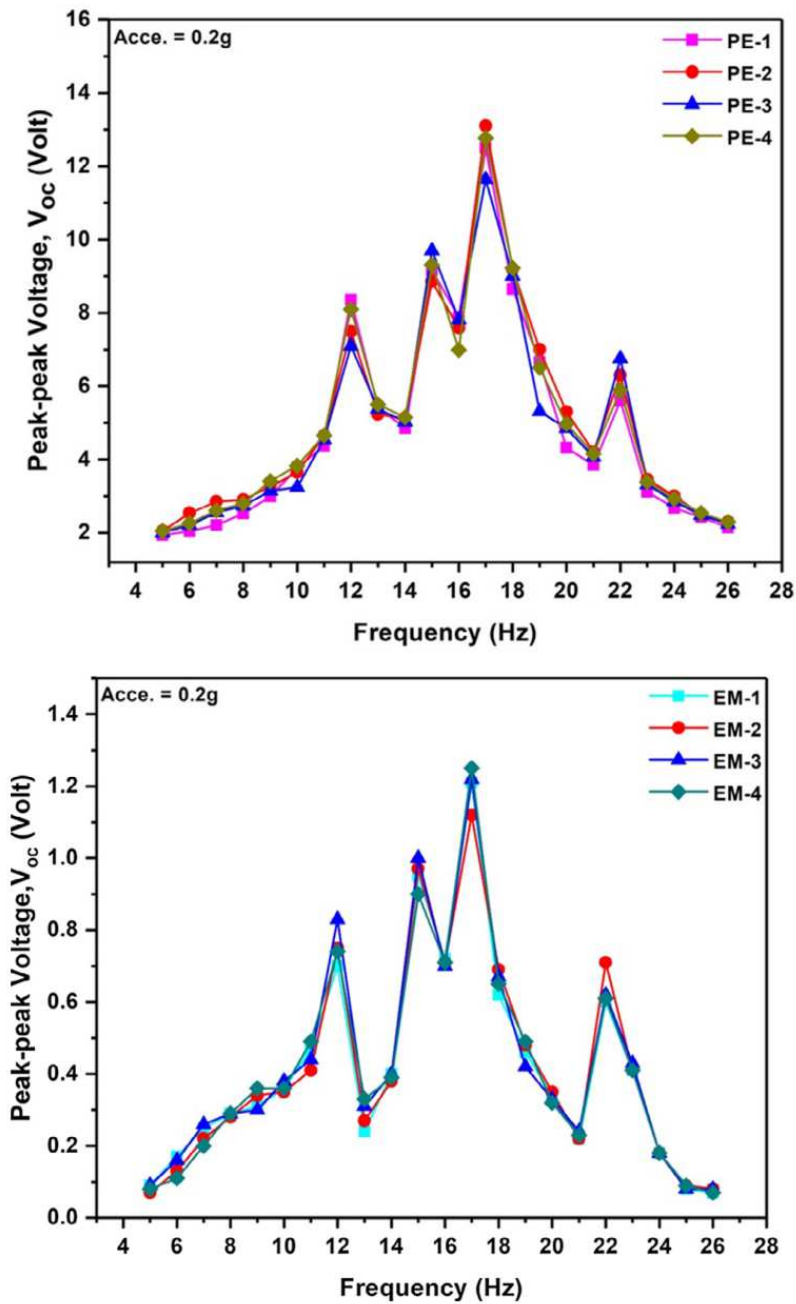
## Harvester PE-EM con configurazione a cantilever beam

In Figura 4.1 è mostrato un esempio di harvester PE-EM che utilizza dei cantilever beam, sviluppato da [12]. Questo è un sistema ibrido a più gradi di libertà, in cui ogni sottosistema interagisce con gli altri e ognuno è caratterizzato da un set di parametri diversi. La struttura di base è quella di un cantilever array. A una mensola primaria sono collegate quattro mensole laterali e simmetriche; queste sono ricoperte da un film di piezoceramica, e all'estremità di ciascuna è posto un magnete. Vicino a ognuno di questi è posizionata una bobina. Sfruttando il solo movimento delle mensole si attivano entrambi i meccanismi di conversione senza occupare spazio aggiuntivo.

Ogni mensola è costruita in modo da avere parametri (frequenza di risonanza e smorzamento) diversi dalle altre. Se una mensola è eccitata alla sua frequenza naturale, l'harvester lavora in risonanza. Nel range delle basse frequenze (tra 10 Hz e 20 Hz) ci sono quattro picchi di tensione prodotta, corrispondenti a quattro diverse frequenze di risonanza (vedi Figura 4.2). Questo harvester ha quindi una banda di funzionamento di circa 10Hz, con otto diversi generatori di energia elettrica (quattro piezoelettrici e quattro elettromagnetici). La potenza media prodotta da ciascun harvester è circa 0.25 mW, sufficiente ad alimentare piccoli dispositivi e sensori. L'integrazione dei circuiti di estrazione tuttavia richiede l'utilizzo di parte della potenza sviluppata. La potenza rimanente è quindi minore della somma delle potenze prodotte da ogni singolo elemento, ma comunque maggiore di quella ottenibile dagli harvester classici.



**Figura 4.1:** Modello dell'harvester ibrido a più multipli gradi di libertà [12].



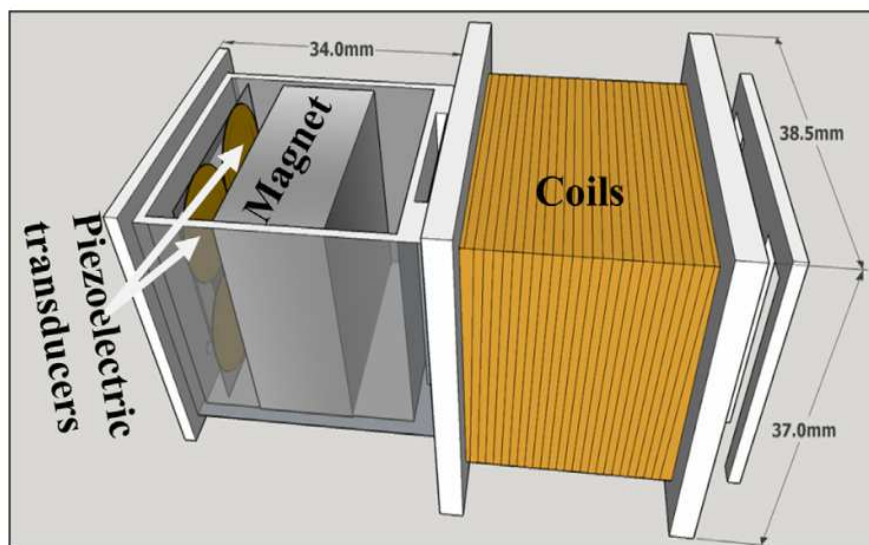
**Figura 4.2:** Risposta a diverse frequenze dei quattro generatori piezoelettrici (alto) e elettromagnetici (basso) [12].

### Harvester PE-EM con configurazione a massa libera

In [3] viene descritto un dispositivo indossabile che sfrutta i movimenti umani come fonte di energia cinetica. L'obiettivo di questo harvester è di alimentare come fonte di energia supplementare principalmente piccoli dispositivi come smartwatch, ma

può essere utilizzato anche per dispositivi più grandi come degli smartphone.

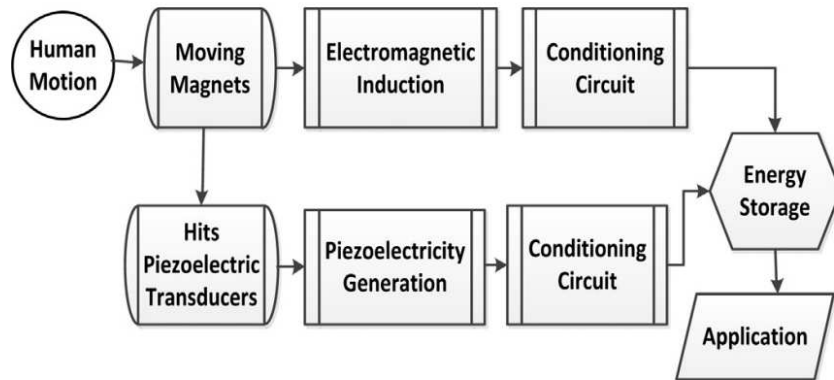
Il modello, mostrato in Figura 4.3, riprende lo schema di un harvester con una massa libera: sulle pareti di un contenitore è posto del materiale piezoelettrico, mentre un magnete al suo interno è libero di muoversi vicino a una bobina per produrre una forza elettromotrice indotta. In Figura 4.4 è descritto il processo di conversione dell'energia per questo sistema. Come detto precedentemente, sono impiegati due circuiti diversi per estrarre l'energia elettrica dai due meccanismi, e l'integrazione di entrambi richiede un consumo aggiuntivo di energia. Da questi è infine ricavata della carica che è poi immagazzinata nell'apposita unità di accumulazione. Un ulteriore problema è legato alla natura e al design dei convertitori. L'harvester elettromagnetico comincia a produrre energia elettrica appena il dispositivo è messo in movimento; l'harvester piezoelettrico invece produce energia solo quando il magnete colpisce i trasduttori piezoelettrici posti sulle pareti.



**Figura 4.3:** Modello dell'harvester ibrido con configurazione a massa libera. Le due diverse trasduzioni richiedono due specifici convertitori dell'energia elettrica [3].

L'harvester PE-EM consente di recuperare più energia rispetto a un sistema basato sui singoli harvester PE ed EM indipendenti. La potenza media prodotta si aggira tra i 50 e i 130  $\mu\text{W}$ , con picchi fino a 550  $\mu\text{W}$ , risultati in linea con quelli di altri dispositivi con caratteristiche simili. Data la natura di questo harvester, che produce energia a partire da fonti a bassa frequenza e ampiezza (movimenti umani) per

alimentare come fonte supplementare dispositivi indossabili, il risultato ottenuto è soddisfacente e utilizzabile nella pratica. Un miglioramento dell'efficienza è ottenibile muovendo il dispositivo a velocità maggiori, aumentando il numero delle spire della bobina o dei trasduttori piezoelettrici. Inversamente, si può progettare un dispositivo più piccolo che mantiene lo stesso output di potenza sfruttando queste modifiche.



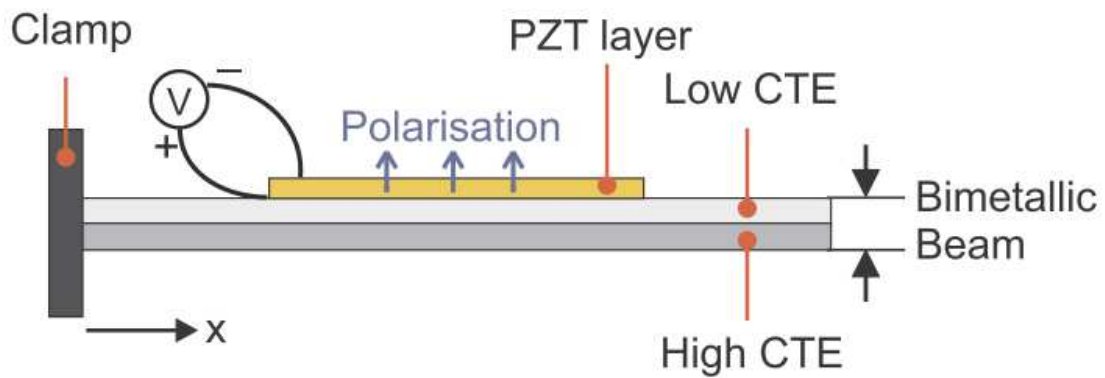
**Figura 4.4:** Diagramma a blocchi del funzionamento dell'harvester ibrido con configurazione a massa libera [3].

## 4.2 Harvester piezoelettrici-piroelettrici

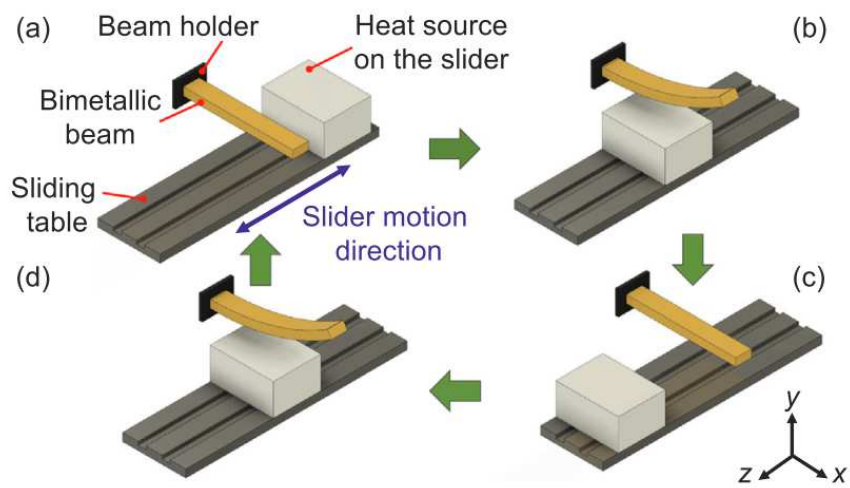
Un diverso approccio agli harvester ibridi consiste nell'utilizzo del movimento come fonte di energia cinetica e di calore. Per la proprietà che tutti i materiali ferroelettrici mostrano effetti piroelettrici, e i materiali piroelettrici mostrano effetti piezoelettrici, l'unione di questi due effetti in un unico harvester risulta abbastanza semplice [5]. Un prototipo di harvester piezoelettrico-piroelettrico è stato sviluppato da [5]. Questo dispositivo consiste di un cantilever beam ricoperto di un film di PZT-5H (Figura 4.5); la mensola è costituita da due strati di metalli diversi con diversi coefficienti di espansione termica. Quando riscaldata, la mensola si piega verso l'alto, mentre quando si raffredda ritorna alla posizione normale. Utilizzando una sorgente di calore che si muove, è quindi possibile avere contemporaneamente variazioni nel tempo della temperatura e stress meccanici del PZT-5H. Il ciclo di funzionamento dell'harvester è spiegato in Figura 4.6. Inizialmente (a) la sorgente di calore è lon-



tana dalla mensola che è quindi in posizione di riposo. Successivamente (b), la sorgente passa sotto la mensola che si piega verso l'alto; dopodiché (c) la sorgente arriva nel lato opposto e la mensola ritorna alla posizione normale. Infine (d) la sorgente ritorna al punto iniziale ripassando sotto la mensola e piegandola nuovamente. Un movimento di questo tipo è lento e continuo, di conseguenza la potenza erogata è molto bassa (si arriva a un massimo di circa  $0.5 \mu\text{W}$ ). L'importanza di questo dispositivo però non risiede nelle sue prestazioni, ma in quello che riesce a dimostrare. Oltre a essere uno dei pochi harvester piezoelettrico-piroelettrico, è anche un esperimento, che ha avuto esito positivo, per vedere se è possibile ricavare energia elettrica da sorgenti di movimento a frequenza e temperatura bassissima (si parla di frequenze molto al di sotto di  $1 \text{ Hz}$  e temperature inferiori ai  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ ).



**Figura 4.5:** Modello laterale del cantilever beam [5].



**Figura 4.6:** Schema del ciclo del calore per l'harvester piezoelettrico-piroelettrico. (a) Mensola e sorgente di calore sono nella posizione iniziale; (b) la sorgente passa sotto la mensola; (c) la sorgente arriva al lato opposto; (d) la sorgente ritorna alla posizione iniziale passando nuovamente sotto la mensola [5].

# Conclusioni

Gli energy harvester piezoelettrici sono in grado di erogare potenze molto piccole (decine di  $\mu\text{W}$ ), valore insufficiente ad alimentare un qualsiasi sistema elettronico. Gli harvester piezoelettrici base possono quindi al più svolgere il ruolo di fonte di energia supplementare. Per questo motivo sono state analizzate svariate tecniche per aumentarne le prestazioni. Tra queste spiccano quelle per ampliare la larghezza di banda di funzionamento del dispositivo.

Si è riscontrato che, rispetto all'harvester classico, l'harvester a larga banda riesce a erogare una quantità di potenza sensibilmente maggiore, arrivando alle centinaia di mW. Risultato che è soddisfacente e fa degli energy harvester a larga banda una soluzione interessante al problema posto inizialmente in questa tesi. Oltre a questo, altre categorie di dispositivi, come gli harvester multidirezionali e gli harvester ibridi, sono in grado di implementare le tecniche per ampliare la banda di funzionamento e migliorare ulteriormente le prestazioni.

Data le grandi differenze costruttive negli harvester presi in esame, non è possibile trovare un metodo di paragone efficace per confrontarli tra loro. Si è osservato come gli harvester PE-EM siano i più promettenti, essendo in grado di erogare livelli di potenza maggiori rispetto alle altre tipologie analizzate, presentando una maggiore semplicità costruttiva, ed essendo facilmente utilizzabili in diverse applicazioni. Si è riscontrato, in particolare, come l'utilizzo di tecniche per l'ampliamento della banda di frequenza, combinato a convertitori ad elevato guadagno, possa portare ad un significativo miglioramento delle prestazioni degli harvester PE-EM.

Nonostante questo, anche gli altri harvester presentati trovano diverse applicazioni, ma il loro utilizzo è limitato dalla peculiarità dell'ambiente di lavoro in cui possono essere utilizzati, come nel caso dei REH, o dal semplice fatto la potenza prodotta è ancora troppo bassa perché si possano trarre vantaggi significativi, come nel caso degli harvester piezoelettrici-piroelettrici.

In conclusione, è possibile che nel prossimo futuro si possano utilizzare alcuni

degli harvester presentati come sostituti alle batterie di piccoli dispositivi; al momento però questa è una tecnologia non ancora matura, ma con ampi margini di miglioramento, e che quindi non è attualmente in grado di rimpiazzare completamente le batterie.

# Bibliografia

- [1] James Dicken et al. “Power-Extraction Circuits for Piezoelectric Energy Harvesters in Miniature and Low-Power Applications”. In: *IEEE Transactions on Power Electronics* 27.11 (2012), pp. 4514–4529. DOI: 10.1109/TPEL.2012.2192291.
- [2] M. Febbo et al. “An out-of-plane rotational energy harvesting system for low frequency environments”. In: *Energy Conversion and Management* 152 (2017), pp. 166–175. ISSN: 0196-8904. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.09.042>.
- [3] Rawnak Hamid and Mehmet Rasit Yuce. “A wearable energy harvester unit using piezoelectric–electromagnetic hybrid technique”. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 257 (2017), pp. 198–207. ISSN: 0924-4247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.02.026>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424717303151>.
- [4] Yu Jia. “Review of nonlinear vibration energy harvesting: Duffing, bistability, parametric, stochastic and others”. In: *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 31.7 (2020), pp. 921–944. DOI: 10.1177/1045389X20905989.
- [5] Miwon Kang and Eric M. Yeatman. “Coupling of piezo- and pyro-electric effects in miniature thermal energy harvesters”. In: *Applied Energy* 262 (2020), p. 114496. ISSN: 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114496>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261920300088>.
- [6] Huidong Li, Chuan Tian, and Z. Daniel Deng. “Energy harvesting from low frequency applications using piezoelectric materials”. In: *Applied Physics Reviews* 1.4 (2014), p. 041301. DOI: 10.1063/1.4900845.
- [7] Huicong Liu et al. “Hybrid energy harvesting technology: From materials, structural design, system integration to applications”. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 137 (2021), p. 110473. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110473>.

- //doi.org/10.1016/j.rser.2020.110473. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120307590>.
- [8] Bilel Maamer et al. “A review on design improvements and techniques for mechanical energy harvesting using piezoelectric and electromagnetic schemes”. In: *Energy Conversion and Management* 199 (2019), p. 111973. ISSN: 0196-8904. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111973>.
- [9] P.D. Mitcheson et al. “Architectures for vibration-driven micropower generators”. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 13.3 (2004), pp. 429–440. DOI: 10.1109/JMEMS.2004.830151.
- [10] Nitin N. More. “Finite Element Analysis of Piezoelectric Cantilever”. In: 2013.
- [11] S.Jeba Priya et al. “A Review on Piezoelectric Energy Harvesting: Materials, Methods, and Circuits”. In: *Energy Harvesting and Systems* 4 (Feb. 2017). DOI: 10.1515/ehs-2016-0028.
- [12] M. Rahman et al. “A multimodal hybrid energy harvester based on piezoelectric-electromagnetic mechanisms for low-frequency ambient vibrations”. In: *Energy Conversion and Management* 168 (May 2018). DOI: 10.1016/j.enconman.2018.05.018.
- [13] Y C Shu and I C Lien. “Analysis of power output for piezoelectric energy harvesting systems”. In: *Smart Materials and Structures* 15.6 (Sept. 2006), pp. 1499–1512. DOI: 10.1088/0964-1726/15/6/001.
- [14] Wikipedia contributors. *Duffing equation* — *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Duffing\\_equation&oldid=1057821421](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Duffing_equation&oldid=1057821421). [Online; accessed 5-August-2022]. 2021.
- [15] Wikipedia contributors. *Piezoelectricity* — *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. [Online; accessed 5-September-2022]. 2022. URL: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Piezoelectricity&oldid=1104152068>.