

OTTIMIZZAZIONE DI DISPOSITIVI PIEZOELETRICI PER ACCUMULO DI ENERGIA

D. Benasciutti^a, E. Brusa^a, L. Moro^a, S. Zelenika^{a,b}

^a *Università degli Studi di Udine, Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Gestionale e Meccanica, Laboratorio "Tech-Up" di Tecnologie Ubique e Pervasive via delle Scienze, 208 – 33100 Udine, e-mail: denis.benasciutti@uniud.it, eugenio.brusa@uniud.it, luciano.moro@spes.uniud.it*

^b *Università di Rijeka, Facoltà di Ingegneria, Vukovarska 58, 51000 Rijeka, Croazia, e-mail: sasa.zelenika@riteh.hr*

Sommario

La realizzazione di sistemi elettronici "wireless" a basso consumo richiede lo sviluppo di generatori di potenza trasportabili, compatti e autonomi. Questa esigenza motiva il crescente interesse per le tecniche di "energy harvesting" per il recupero di energia. Tra le soluzioni al vaglio, appaiono particolarmente promettenti le prestazioni di strutture piezoelettriche bimorfe utilizzate per convertire in energia elettrica l'energia associata a vibrazioni ambientali. In questo lavoro si esamina in via preliminare la possibilità di aumentare la potenza specifica per unità di volume prodotta da "energy scavengers" piezoelettrici, per mezzo dell'ottimizzazione della geometria. Si confrontano tra loro trasduttori a pianta rettangolare, trapezoidale diretta e inversa. Per ognuna delle configurazioni sono formulati modelli analitici e numerici (FEM) per lo studio della risposta dinamica e la stima del recupero di energia. Una prima validazione sperimentale per il caso rettangolare ha dimostrato la possibilità di utilizzare l'approccio progettuale proposto per la modellazione dei dispositivi ottimizzati.

Abstract

Low power wireless electronics requires portable, compact and autonomous power sources. This need motivates the current interest in energy harvesting. Among the proposed solutions, vibration-based piezoelectric bimorphs are characterised by marked advantages. They are used to convert vibration into electric charge storage. This work investigates the possibility to increase the specific power generation per unit of volume of piezoelectric scavengers by optimising their shape. Rectangular, trapezoidal and inverse trapezoidal configurations of piezoelectric layers are compared. Analytical and FEM simulations are implemented to study the dynamic behaviour and the energy storage of such devices. A preliminary experimental validation performed on the rectangular piezoelectric layout is discussed. This activity allowed validating the proposed design approach and modelling the behaviour of optimised layouts.

Parole chiave: materiali intelligenti, recupero di energia, piezoelettricità, mecatronica strutturale

1. MOTIVAZIONI

Il recente sviluppo di reti di sensori "wireless" a basso consumo per applicazioni nell'ambito delle tecnologie pervasive motiva la ricerca in atto sui sistemi di generazione di potenza compatti e ad

ampia autonomia [1, 2]. Questi sono oggetto di un progetto finalizzato presso l'Università di Udine, relativo alla costituzione di un laboratorio dedicato [3, 4]. Le tecnologie pervasive, infatti, sono proposte come mezzo efficace e a basso costo per garantire una sorveglianza e un monitoraggio distribuito delle persone, delle strutture e dell'ambiente. In tal senso, si basano sulla distribuzione di piccoli ed economici sensori e controllori, che sono in grado di permeare un ambiente di lavoro o abitato, in modo da fornire un monitoraggio continuo dei parametri funzionali ritenuti indispensabili per prevenire eventi catastrofici, interruzioni di servizio o, nelle persone, l'insorgenza di stati traumatici e di rischi per la salute [5]. Esempi di applicazione sono la gestione centralizzata dell'ambiente domestico, nell'ambito della cosiddetta domotica, il monitoraggio ambientale per la prevenzione di calamità, il controllo dei sistemi di trasporto, ma, soprattutto, l'assistenza e la sorveglianza del paziente anziano o delle persone non autosufficienti. Quest'ultimo settore è oggetto di studi e ricerche. Nei dispositivi "elder care" l'obiettivo è creare una rete informativa che trasmetta segnali di allarme e informazioni sui parametri biometrici vitali dal paziente monitorato al medico curante. In genere, il sistema è costituito da un sensore che rileva una grandezza fisica correlabile con lo stato di degenza del paziente (accelerazione, temperatura, pressione), da un sistema di codifica e di elaborazione dell'informazione locale, che trasmette poi alla rete o ad un archivio di dati indossabile, in modalità wireless, le informazioni necessarie al monitoraggio. Sensore, microprocessore di calcolo e sistema di comunicazione necessitano di generatori di potenza locali, che garantiscano un'adeguata autonomia, nei limiti di volume e di peso che una configurazione indossabile impone. Poiché le batterie attualmente in commercio tendono a non rispettare i vincoli di autonomia e di indossabilità citati [6], sono attualmente allo studio sistemi di conversione dell'energia miniaturizzati. Il recupero di energia operato nei cosiddetti dispositivi di "energy scavenging" vede tra le soluzioni più promettenti la generazione di potenza per conversione dell'energia cinetica di vibrazione in energia elettrica, per accumulo di carica, mediante trasduttori piezoelettrici. In particolare, sono utilizzati accumulatori piezoelettrici di tipo trapeziforme, spesso a semplice incastro, posti in vibrazione in corrispondenza della prima frequenza di risonanza strutturale [7, 8]. Nel caso in oggetto il dispositivo opera un recupero parziale dell'energia utilizzata per la deambulazione del paziente. La progettazione del dispositivo piezoelettrico deve quindi soddisfare determinati requisiti di accumulo di energia per unità di volume all'interno di una banda di frequenza di eccitazione prefissata. Il raggiungimento di tale obiettivo rende ardua la definizione di una geometria ottimizzata del dispositivo. Si vorrebbe, infatti, ottenere nel minimo volume possibile un accumulo di energia massimo, con una risposta in frequenza del dispositivo caratterizzata da un'elevata ampiezza di vibrazione per un intervallo di valori in frequenza piuttosto ampio.

2. OBIETTIVI DELLO STUDIO

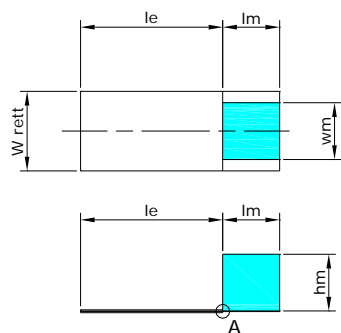
Il lavoro affronta il problema dell'ottimizzazione strutturale ed elettromeccanica di accumulatori di energia piezoelettrici di tipo trapeziforme. Per analogia con la progettazione di molle, un primo criterio analizzato è quello di massimizzare l'energia potenziale elastica accumulata in flessione dal dispositivo, per ricorso a strutture il più possibile simili a solidi di uniforme resistenza [7]. Tale approccio, peraltro classico nella meccanica, è confrontato con i requisiti imposti dall'accoppiamento elettromeccanico tra piezoelettrico e struttura di supporto. Si noti che per motivi costruttivi, nonostante l'efficienza dell'accoppiamento fornito dal trasduttore piezoelettrico sia migliore in condizione di carico assiale, nei dispositivi basati sulla conversione dell'energia cinetica di vibrazione del corpo elastico in energia elettrica, si tende a utilizzare la deformazione flessionale del trasduttore per l'entità delle deformazioni originarie [9]. Risulta, infatti, rilevante la quantità di carica elettrica generata dal trasduttore piezoelettrico, a fronte degli stati di tensione e di deformazione indotti. Da un'indagine sulla letteratura specializzata emerge che per tale fine sono utilizzati dispositivi a pianta rettangolare. In questo studio si analizzano le prestazioni di geometrie a pianta trapezoidale. L'analisi è condotta dapprima in forma analitica [1] e successivamente con il metodo degli elementi finiti. La procedura di ottimizzazione è basata sul calcolo della tensione elettrica media e distribuita prodotta dal trasduttore, nonché dell'accumulo di carica e della potenza dissipata su resistori esterni, connessi per via circuitale. Il dispositivo di riferimento è costituito da una trave semplicemente incastrata, con pianta rettangolare, equipaggiata con trasduttori piezoceramici incollati sulla superficie e una massa all'estremo libero

(Fig. 1). Le geometrie ottimizzate si presentano a pianta trapezoidale diretta e inversa, ovvero con base maggiore del trapezio in corrispondenza dell'incastro e dell'estremo libero, rispettivamente. I criteri di ottimizzazione adottano, tra le geometrie confrontate, un uguale ingombro laterale massimo in pianta oppure pari volume totale. Poiché la capacità elettrica del trasduttore piezoelettrico dipende dall'area di struttura ricoperta, i due approcci considerati offrono diversi risultati in termini di comportamento elettromeccanico. La potenza prodotta viene quindi dissipata collegando i dispositivi con differenti carichi resistivi. Tale analisi non è del tutto realistica, in quanto spesso il carico è costituito da batterie ricaricabili, che si configurano come carichi capacitivi. Il funzionamento dei sensori "wireless" prevede, inoltre, un breve periodo di attività di trasmissione dei dati raccolti, intervallato da periodi di inattività prolungati. L'approssimazione introdotta dall'ipotesi di carico resistivo permette, comunque, una prima stima della potenza generata ed la conseguente ottimizzazione del trasduttore [1].

L'attività di validazione sperimentale dei modelli e delle geometrie proposte è attualmente in corso. Tuttavia, i modelli analitici sviluppati a partire dalla letteratura sono stati verificati su un primo prototipo a geometria rettangolare. Tale attività ha permesso di verificare l'attinenza dei modelli proposti con il comportamento meccanico dei prototipi ed il loro impiego per una previsione della risposta dinamica delle strutture ottimizzate allo scopo di valutare le loro prestazioni.

3. DESCRIZIONE DEI PROTOTIPI

La configurazione di riferimento per lo studio in oggetto consiste di una trave a pianta rettangolare, parzialmente rivestita dal trasduttore piezoelettrico bimorfo su intradosso ed estradosso, semplicemente incastrata ad un estremo ed equipaggiata con una massa concentrata all'estremo libero [1]. In particolare è stato considerato il microrisonatore che presenta le caratteristiche descritte in Fig. 1. L'eccitazione dinamica dell'incastro impone una flessione della trave, per effetto dell'inerzia in gioco. I trasduttori piezoelettrici incollati sulla superficie della trave in acciaio subiscono, rispettivamente, una sollecitazione di trazione e di compressione alternata che si traduce, per accoppiamento elettromeccanico, in carica elettrica.



PARAMETRO	DIMENSIONE
Lunghezza massa	$l_m = 10 \text{ mm}$
Larghezza massa	$w_m = 10 \text{ mm}$
Altezza massa	$h_m = 10 \text{ mm}$
Lunghezza elettrodo	$l_e = 25 \text{ mm}$
Larghezza trave	$w = 14 \text{ mm}$
Spessore strato piezoelettrico	$t_p = 0.2 \text{ mm}$
Spessore strato metallico	$t_s = 0.1 \text{ mm}$
Densità massa di estremità	$\rho_m = 10 \text{ g/cm}^3$
Densità piezoelettrico	$\rho_p = 7,8 \text{ g/cm}^3$
Modulo Young piezoelettrico	$E_p = 6,6 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$
Modulo Young acciaio	$E_s = 20,6 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$
Coefficiente piezoelettrico	$d_{31} = -190 \cdot 10^{-12} \text{ m/V}$
Coefficiente di accoppiamento	$k_{31} = 0.35$
Costante dielettrica relativa	$\epsilon_r = 1800$

Figura 1: Struttura di riferimento a pianta rettangolare di larghezza w_{rett}

La carica accumulata viene poi trasferita al circuito, che effettua l'immagazzinamento o la impiega per sviluppare potenza, in termini di flusso di corrente o di differenza di potenziale elettrico. In genere, il dispositivo è concepito per risultare risonante ad una prefissata frequenza di esercizio, che può essere valutata, in prima approssimazione, come:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E_p}{m k_1 k_2}} \quad \begin{cases} k_1 = \frac{6b(2l_b - l_e)}{(2t_p^3 + 24t_p b^2 + \eta t_s^3) w_{rett}} \\ k_2 = \frac{l_b^3}{3b} \frac{2}{(2l_b - l_e)} \end{cases} \quad (1)$$

In Eq. (1) m indica la massa concentrata, l_b la distanza del baricentro della massa dall'incastro, b il semispessore totale della struttura nella porzione ricoperta da piezoelettrico, mentre η indica il rapporto dei moduli di Young della struttura metallica e del piezoelettrico, rispettivamente.

E' noto che per ottenere un utilizzo più omogeneo del materiale che costituisce la trave, e di conseguenza uno stato di sollecitazione più elevato nei trasduttori ad essa applicati, in presenza di momento flettente la struttura può essere disegnata in modo tale da risultare un solido di uniforme resistenza [7]. In tal caso, la tensione flessionale indotta dal momento flettente risulta costante lungo la linea d'asse. La configurazione della trave che soddisfa tale esigenza è a pianta triangolare, nell'ipotesi di spessore costante, anche se per motivi costruttivi è qui ricondotta a geometrie trapezoidali. Si osserva che, supponendo il momento flettente massimo all'incastro, il materiale risulta assoggettato ad una tensione flessionale massima quasi uniforme su tutta la trave. Nel caso di uguale larghezza all'incastro, nella configurazione trapezoidale il valore medio della tensione tende ad essere prossimo a quello massimo della configurazione rettangolare. In caso di pari volume, la configurazione trapezoidale potrebbe in realtà offrire, in corrispondenza dell'incastro, una sezione resistente maggiore di quella rettangolare, con una sollecitazione conseguentemente minore. E' significativo notare, peraltro, che l'accoppiamento elettromeccanico dipende dalla capacità elettrica del trasduttore, a sua volta direttamente legata all'area e alla geometria del trasduttore. Un obiettivo dello studio è stato, pertanto, quello di valutare quale, tra le soluzioni precedentemente illustrate, assicuri l'accumulo di energia maggiore. Per questo motivo, nonché per offrire una superficie di appoggio più ampia alla massa aggiuntiva, si è disegnata una soluzione alternativa, che semplicemente mantiene la forma trapezoidale, ma offre la base minore all'incastro. In questo caso la ridotta sezione resistente al vincolo accresce localmente il valore di tensione meccanica e gli effetti di accoppiamento elettromeccanico, anche se, in corrispondenza della massa di estremità, la sezione è maggiore e meno sollecitata. Si noti, tuttavia, che l'inerzia in corrispondenza della massa è accresciuta e che, comunque, per evidenti esigenze costruttive, il piezoelettrico non ricopre tale porzione della trave. In relazione ai criteri sopra esposti sono state concepite due configurazioni, nel seguito denominate "trapezoidale diretta", nel caso della base maggiore del trapezio incastrata, e "trapezoidale inversa", in cui è vincolata la base minore (Fig. 2). La descrizione della larghezza della trave è fornita in funzione della distanza del baricentro della massa dall'incastro, l_b , e della posizione della sezione trasversale della trave dall'incastro, x .

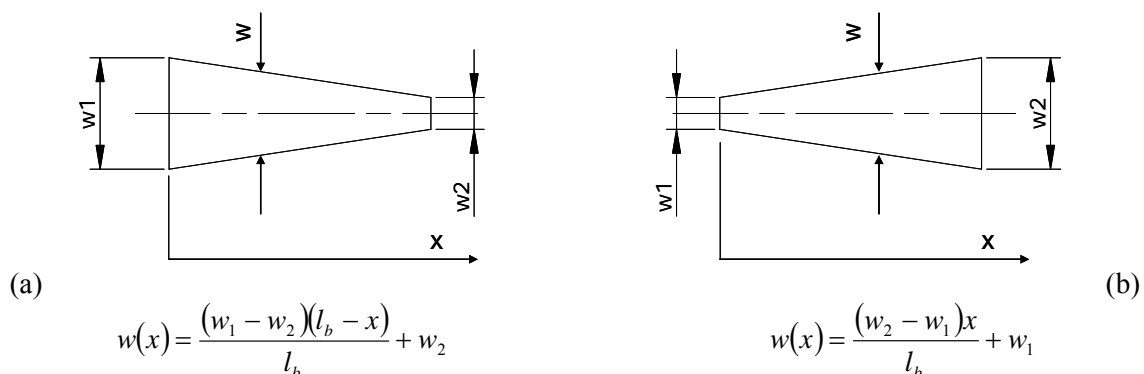


Figura 2: Dispositivi ottimizzati con un lato incastrato (w_1): configurazioni trapezoidale diretta (a) e trapezoidale inversa (b), con massa concentrata applicata al lato w_2 (non disegnata)

Per procedere ad un confronto delle prestazioni con la struttura di riferimento rappresentata in Fig. 1, si è ipotizzato, in un primo caso, di imporre un ingombro laterale massimo pari alla larghezza w_{rett} . Un secondo approccio possibile impone, invece, larghezze w_1 e w_2 tali da avere uguale volume di materiale in tutti e tre i prototipi confrontati. Questa soluzione mira ad ottenere uguale capacità

elettrica tra le geometrie oggetto del confronto, anche se le successive analisi numeriche evidenzieranno la diversa distribuzione di carica e di potenziale che si genera nel materiale piezoelettrico. In Fig. 3 sono presentati, a parità di forza inerziale applicata dalla massa di estremità, i valori di tensione meccanica in funzione della posizione della sezione trasversale rispetto all'incastro. Il calcolo ipotizza di mantenere fissa la larghezza all'incastro e di variare quella dell'estremo libero, nel caso trapezoidale diretto, mentre opera in senso opposto in quello trapezoidale inverso.

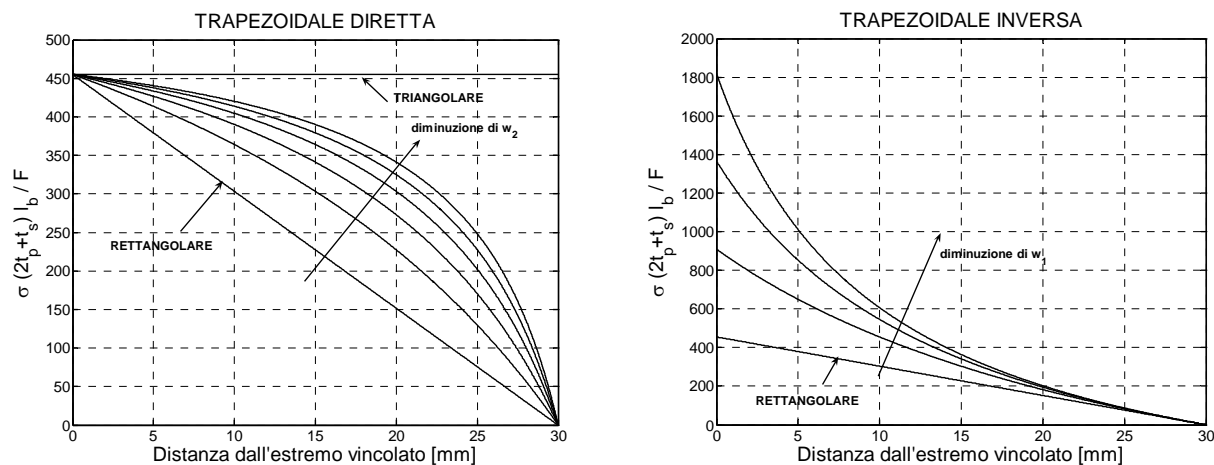


Figura 3: Indagine, a parità di forza inerziale applicata F , sullo stato di tensione lungo la linea d'asse del dispositivo al diminuire di w_2 (trapezoidale) o w_1 (trapezoidale inversa)

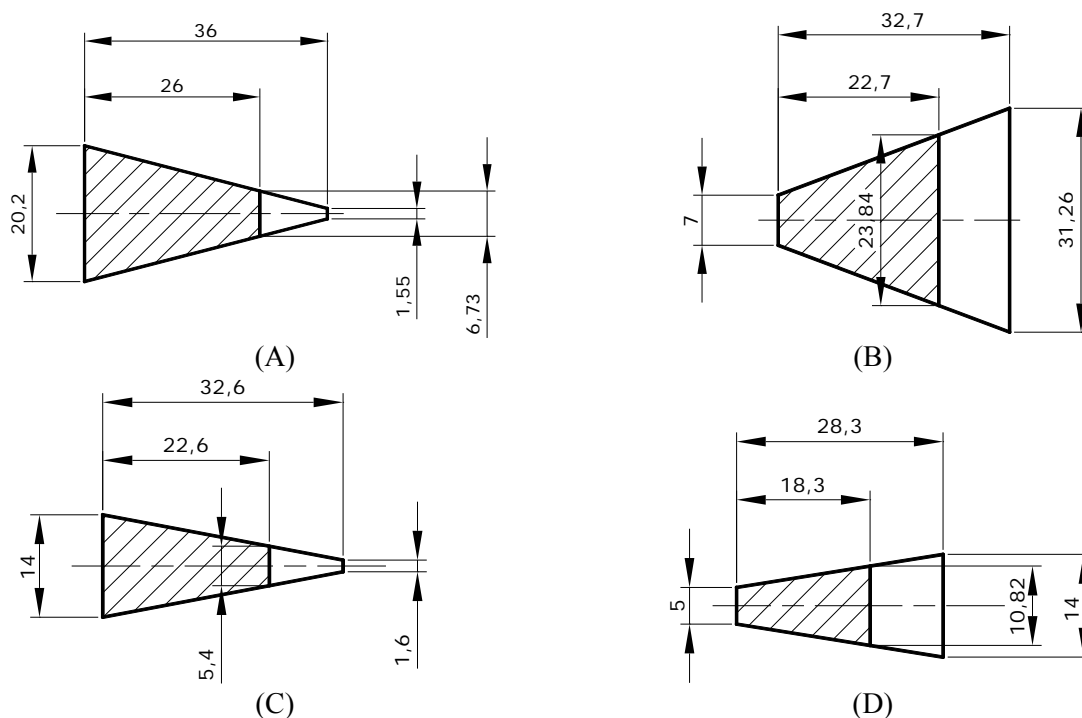


Figura 4: Prototipi di "energy scavenger" ottimizzati, di pari frequenza di risonanza e uguale volume (A, B) o uguale ingombro laterale (C, D), rispetto alla geometria a pianta rettangolare [Unità: mm]

Entrambe le configurazioni offrono un incremento interessante delle tensioni agenti sul piezoelettrico. Tuttavia, un limite evidente all'estrapolazione del risultato nel caso di estremo libero che si riduce è il fatto che la configurazione triangolare non permette di fatto il montaggio della massa di estremità, come d'altra parte un'eccessiva riduzione della larghezza all'incastro rischia di indurre il superamento dei limiti di resistenza dei materiali. Si noti, poi, che le variazioni geometriche illustrate condizionano il valore della frequenza propria del primo modo di vibrazione della struttura, descritta nel caso di "energy scavenger" rettangolari dall'Eq. (1).

Poiché l'obiettivo è quello di confrontare le prestazioni a parità di frequenza di eccitazione, in questo caso sintonizzata sul valore tipico della rete (50 Hz), i casi esaminati e sopra descritti hanno portato alla progettazione di quattro prototipi, attualmente in fase di realizzazione. In Fig. 4 le configurazioni A e B rispettano pertanto il requisito di pari volume, mentre le configurazioni C e D hanno uguale ingombro laterale massimo, pari a 14 mm. Il materiale piezoceramico corrisponde al tipo PZT 5A (titanato-zirconato di piombo), commercializzato da Piezosystems Ltd. (USA), mentre la struttura metallica è in acciaio.

4. MODELLI PER L'ANALISI DEL COMPORTAMENTO ELETTROMECCANICO

Una preliminare e rapida valutazione della potenza generata da un trasduttore piezoelettrico trapeiforme bimorfo a sbalzo è notoriamente effettuata nella letteratura per mezzo dell'analogia elettromeccanica [1, 10]. La risposta dinamica del sistema elettromeccanico accoppiato viene predetta, cioè, tramite lo studio di un circuito elettrico equivalente in cui i parametri meccanici in gioco vengono introdotti per mezzo di componenti elettrici equivalenti, secondo lo schema descritto in Fig. 5. Massa, rigidità e smorzamento della trave equipaggiata con trasduttori piezoelettrici vengono rappresentati come componenti di un circuito LRC, ove l'induttanza equivale all'inerzia meccanica, la resistenza allo smorzamento e la capacità alla rigidità. Un generatore di tensione equivalente rappresenta la tensione meccanica applicata, mentre l'accoppiamento è interpretato come un trasformatore, che collega il sottosistema meccanico al carico capacitivo del piezoelettrico e ad un eventuale carico esterno, nell'esempio di tipo resistivo.

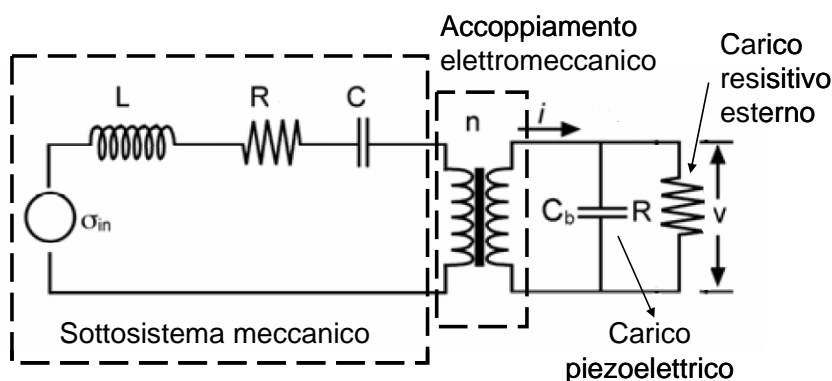


Figura 5: Modello semplificato dell'accoppiamento, basato sull'analogia elettromeccanica

Roundy dimostra che la potenza istantanea generata su un carico resistivo R ad una frequenza di oscillazione corrispondente alla risonanza, è [1]:

$$P = \frac{A_{in}^2 R C_b^2 \left(\frac{2E_p d_{31} t_p}{a \varepsilon k_2} \right)^2}{2\omega^2 [(k_{31}^4 + 4\xi^2)(R C_b \omega)^2 + 4\xi k_{31}^2 R C_b \omega + 4\xi^2]} \quad \text{con:} \quad k_{31} = \sqrt{\frac{d_{31}^2 E_p}{\varepsilon}} \quad (2)$$

In Eq. (2) si assume che A_{in} sia l'ampiezza dell'eccitazione armonica sinusoidale del vincolo, applicata dalla sorgente di vibrazione, C_b sia la capacità elettrica del trasduttore piezoceramico, mentre ξ è il fattore di smorzamento meccanico [8]. Si osservi che i due trasduttori applicati rispettivamente sull'intradosso e sull'estradosso, possono essere connessi per via circuitale a formare una serie o un parallelo. Di questo tiene conto la costante a , che è pari a uno nel collegamento in serie e a due nel collegamento parallelo.

Il modello descritto dall'Eq. (2) è stato sperimentalmente validato sul prototipo rettangolare di "energy scavenger", confermandone la sostanziale attendibilità. È stato, quindi, implementato per valutare le prestazioni in termini di potenza delle configurazioni allo studio. Tale modello, tuttavia, non offre una descrizione puntuale della distribuzione di carica sulla superficie del piezoelettrico, necessaria per

valutare il comportamento elettrico associato alla deformazione dei trasduttori piezoceramici. Per completare l'analisi, sono stati quindi sviluppati alcuni modelli numerici mediante il metodo degli elementi finiti, tramite il codice ANSYS. Dapprima è stata affrontata l'analisi modale della struttura completa, composta di trave e massa, per la verifica delle frequenze naturali, nonché per distinguere i modi di tipo flessionale da quelli di tipo torsionale e assiale [8]. A questo ha fatto seguito un'analisi dinamica forzata per la determinazione degli spostamenti reali in corrispondenza dei modi di vibrazione, per il successivo sviluppo della soluzione elettromeccanica accoppiata, volta alla determinazione della distribuzione del potenziale sul materiale piezoelettrico. Per una puntuale indagine, le geometrie proposte sono state modellate in tre dimensioni, includendo la massa di estremità. Il modello FEM ha utilizzato una "mesh" strutturata, composta da 1120 elementi solidi tipo SOLID45 per la struttura metallica, 4480 elementi solidi tipo SOLID5 per i due trasduttori piezoelettrici e 500 elementi solidi tipo SOLID45, per descrivere la massa inerziale, per un totale di 22780 gradi di libertà (meccanici ed elettrici). È stata, quindi, eseguita un'analisi modale, per determinare frequenze proprie e modi di vibrazione della struttura. I primi quattro modi di vibrare sono riportati, per la struttura rettangolare di riferimento, in Fig. 6. Si osserva che l'inerzia della massa concentrata porta ad avere un modo torsionale come secondo modo proprio. Ciò è significativo se si considera che la letteratura talora suppone che i modi propri siano tutti flessionali.

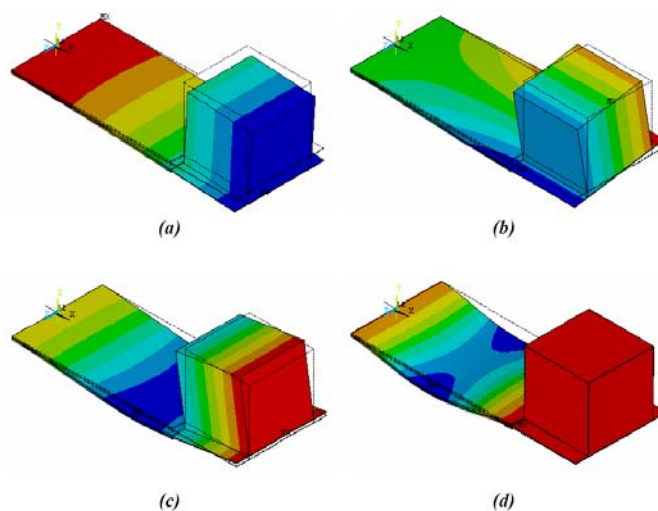


Figura 6: Analisi dei primi quattro modi di vibrare del sistema a pianta rettangolare: (a) 50 Hz, (b) 200 Hz, (c) 400 Hz, (d) 2300 Hz

L'analisi agli elementi finiti permette una prima validazione numerica dei risultati ottenuti con il modello analitico, da cui, mediante l'Eq. (2), viene estratta la potenza. In Tabella 1 sono inclusi i valori calcolati di frequenza di risonanza dei vari prototipi in corrispondenza del primo modo proprio flessionale.

La differenza sistematica riscontrabile nei valori di frequenza propria è indotta dalle approssimazioni del modello descritto dall'Eq. (1) [1]. I risultati, tuttavia, confermano che le strutture di Fig. 4 hanno sostanzialmente la prima frequenza propria coincidente, così come è stato imposto nella procedura di ottimizzazione. Per ottenere i valori di tensione e deformazione tipici della struttura in vibrazione, è stata applicata un'accelerazione di riferimento pari a 2 m/s^2 , compatibile con le applicazioni indicate e con l'apparato sperimentale. Tale dato è stato utilizzato per eseguire un'analisi dinamica forzata con frequenza pari alla risonanza del primo modo proprio e andamento sinusoidale. Per ognuno dei prototipi è stata così rilevata la forma modale e il valore dello spostamento flessionale massimo, che sono poi stati utilizzati per calcolare la distribuzione di carica e l'energia elettrica accumulata. Le prestazioni vengono valutate per due configurazioni di collegamento elettrico: piezoelettrici di intradosso ed estradosso in serie e in parallelo. Nel primo caso la differenza di potenziale massima si registra tra gli elettrodi dei due trasduttori esterni, non connessi alla trave, mentre nel secondo i due trasduttori hanno uguale tensione elettrica in modulo e segno sugli elettrodi (Fig. 7).

Tabella 1: Confronto dei risultati ottenuti con i modelli implementati

Frequenza [Hz]	PARI VOLUME			PARI INGOMBRO LATERALE	
	Rettangolare	Trapezoidale diretta (A)	Trapezoidale inversa (B)	Trapezoidale diretta (C)	Trapezoidale inversa (D)
Modello analitico	52,5	52,4	52,5	52,5	52,6
Modello FEM	48,5	48,3	46,0	47,6	45,5
Potenza massima [μ W]	521	576 (+10,5%)	602 (+15,5%)	619 (+18,8%)	649 (+25,1%)
Tensione media [V]	14,49	15,33 (+5,8%)	11,92 (-17,7%)	18,33 (+26,5%)	17,90 (+23,6%)

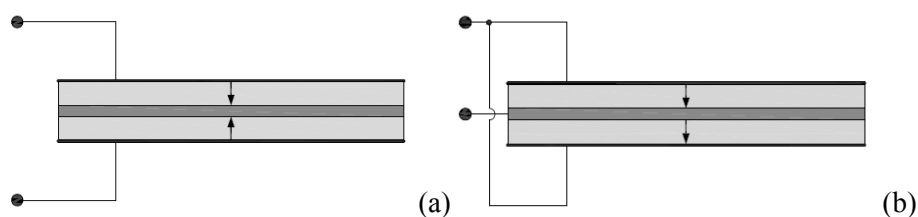


Figura 7: Schemi di collegamento in serie (a) e in parallelo (b)

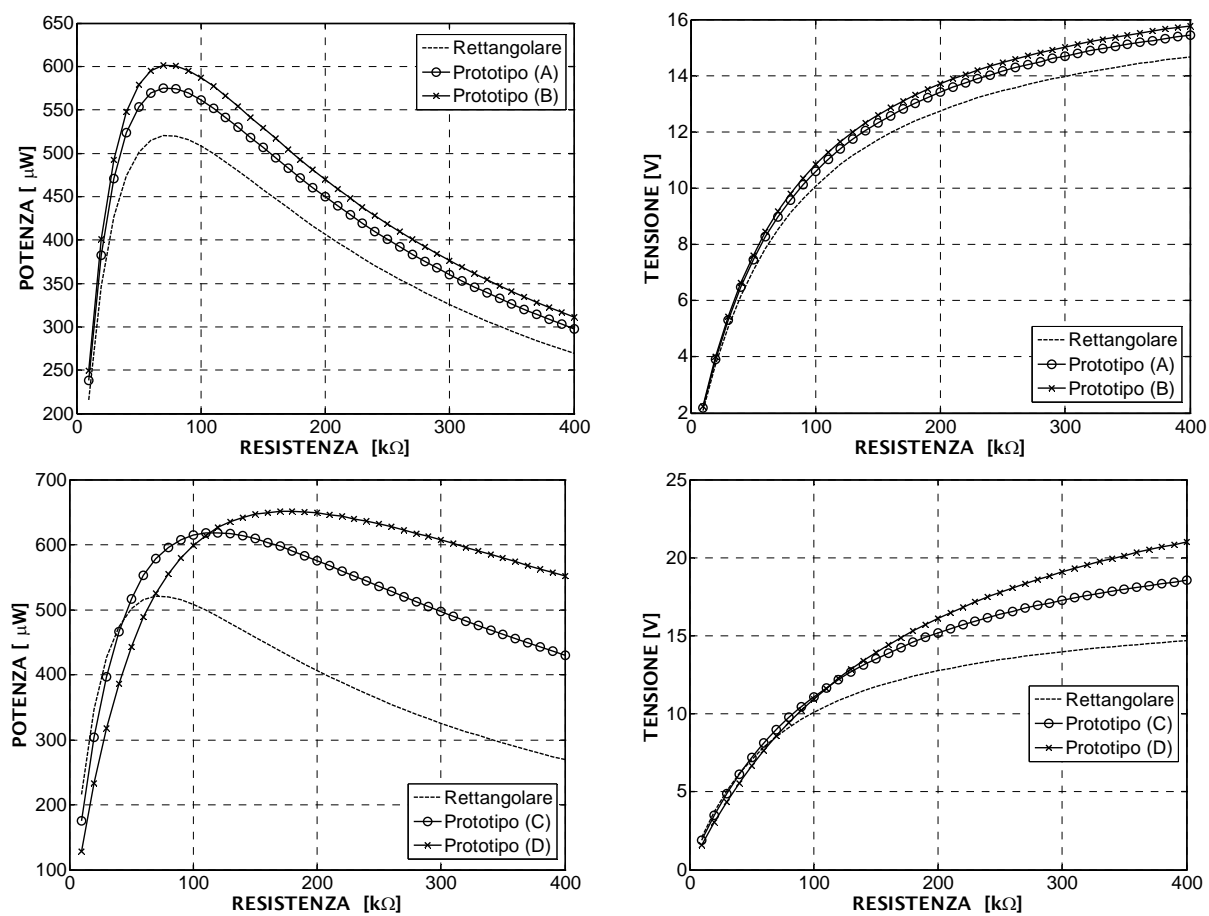


Figura 8: Prestazioni delle strutture in caso di collegamento in serie

5. ANALISI DELLE PRESTAZIONI

I modelli descritti nel paragrafo precedente sono stati implementati per ricavare il valore della potenza sviluppata su un carico resistivo di differente valore nonché la tensione elettrica media disponibile sull'elettrodo del trasduttore piezoelettrico, in caso di collegamento in serie e in parallelo e per ognuno dei prototipi. La Fig. 8 evidenzia come la potenza massima sia sviluppata dalla geometria trapezoidale inversa. In particolare, si riporta il caso del collegamento in serie, in cui il valore della potenza sviluppata appare meno sensibile alle variazioni del carico resistivo. In Tabella 1 sono inoltre confrontati i risultati ottenuti per le diverse configurazioni e tramite i modelli descritti.

Per quanto riguarda le indagini agli elementi finiti, risulta interessante osservare come si distribuisca la carica elettrica, e di conseguenza la tensione, sul trasduttore piezoelettrico, durante il transitorio dinamico (Fig. 9). In termini di tensione massima la configurazione trapezoidale inversa offre un incremento significativo rispetto a quella rettangolare, ancorché limitato alla zona d'incastro. Tuttavia, la configurazione trapezoidale diretta, nel caso di confronto a pari ingombro laterale, assicura comunque una buona distribuzione di tensione, nonché una distribuzione più uniforme sulla superficie della trave. A fronte di quest'analisi è stato possibile definire un valore medio di tensione di riferimento da utilizzare nel confronto diretto delle prestazioni, che di fatto corrisponde alla tensione a cui si porta l'elettrodo che riveste il trasduttore durante il funzionamento. Come si evince in Tabella 1, nel caso dei prototipi studiati, l'incremento di potenza sviluppata rispetto alla configurazione di riferimento è dell'ordine del 25% al massimo, mentre in valore assoluto la potenza fornita alla frequenza di risonanza è intorno al mezzo mWatt. Questa potenza è compatibile con i requisiti di autonomia dei sistemi di monitoraggio del paziente anziano tramite sensori "wireless" [5], anche se la frequenza di risonanza è quella della rete. Poiché le frequenze tipiche di deambulazione umana sono variabili, per realizzare un "energy scavenger" risonante sui valori di interesse, si potrebbe prevedere un sistema di calibrazione della frequenza di risonanza passivo [11] oppure attivo [12].

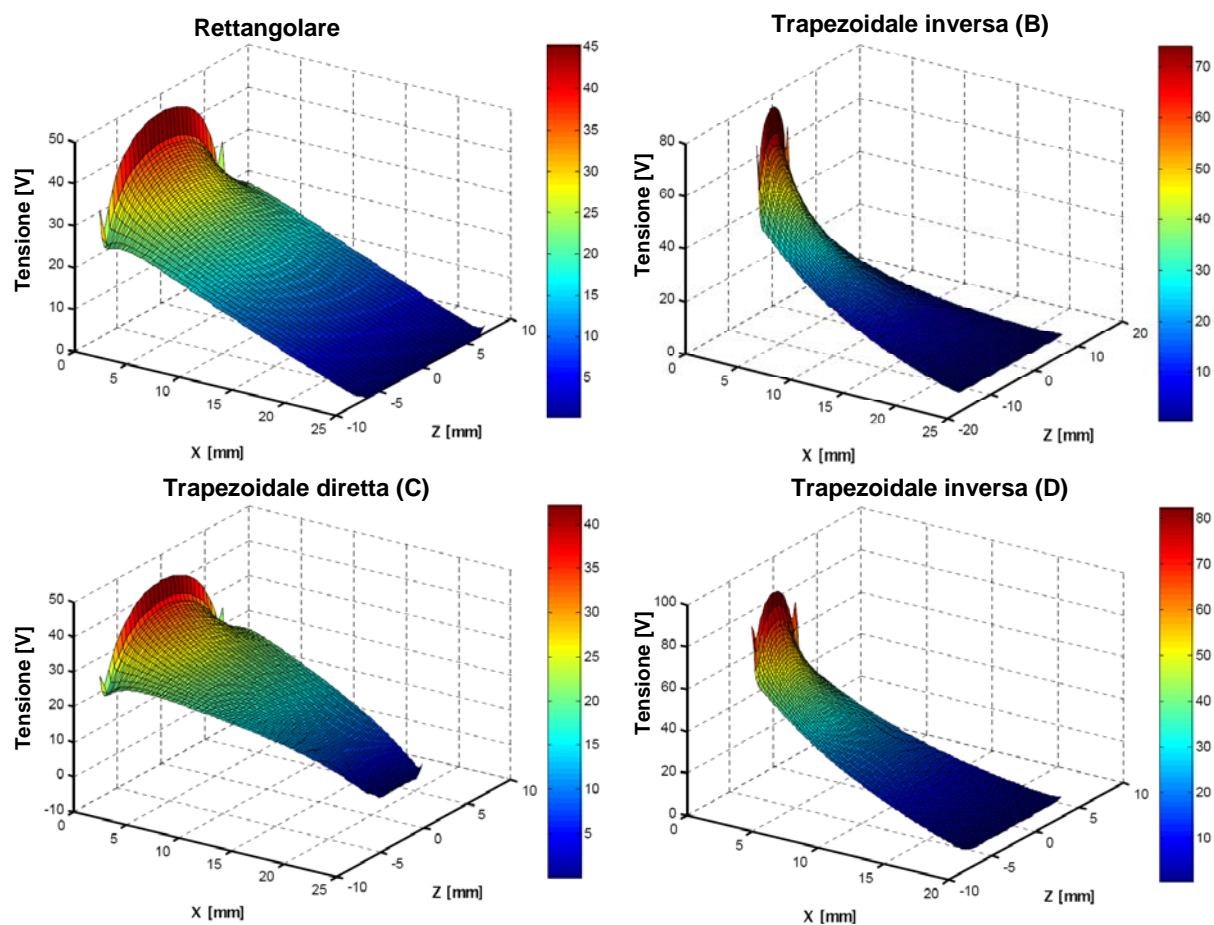


Figura 9: Analisi elettrica del comportamento di alcune delle configurazioni studiate

6. CONCLUSIONI

L'applicazione di reti di sensori "wireless" per il monitoraggio dell'ambiente e delle persone richiede lo sviluppo di dispositivi di generazione e di accumulo di energia trasportabili, denominati "energy scavengers". In questo lavoro è stata studiata l'ottimizzazione elettromeccanica della forma di risonatori piezoelettrici semplicemente incastrati, in grado di convertire in energia elettrica le vibrazioni ambientali e, nel caso di dispositivi indossabili, quelle prodotte dalla deambulazione. I metodi classici della progettazione meccanica e dell'ottimizzazione delle strutture sono stati qui impiegati tenendo conto della presenza dell'accoppiamento elettromeccanico. In alternativa a trasduttori trapezoidali a semplice geometria rettangolare, di cui si hanno vari esempi in letteratura, sono state proposte due geometrie trapezoidali, aventi la base maggiore rispettivamente all'incastro o all'estremo libero. Uno studio preliminare, basato sull'impiego tanto di un modello analitico proposto in letteratura che di modelli numerici agli elementi finiti, mostra che le geometrie proposte favoriscono un incremento di potenza disponibile rispetto alla geometria rettangolare. I livelli di potenza raggiungibili sono compatibili con le potenze richieste dai sensori "wireless" attualmente in uso. La ricerca si propone di validare, a breve, i modelli qui proposti per mezzo della sperimentazione sui prototipi di "energy scavengers" oggetto di questa trattazione e attualmente in costruzione.

BIBLIOGRAFIA

- [1] S. Roundy, P. K. Wright, "A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics", *Smart Materials and Structures*, 13, 1131-1142, 2004.
- [2] T. Starner, J. A. Paradiso, *Low-power electronics design*, CRC, 2004.
- [3] "Tech-UP - Laboratorio di Ingegneria per le Tecnologie Ubique e Pervasive", Progetto Regionale di Ricerca Scientifica e Applicata e di Iniziative di Trasferimento e di Diffusione dei Risultati della Ricerca, D. P. Reg. n. 0324/Pres., 2004.
- [4] D. Benasciutti, E. Brusa, L. Moro, S. Zelenika "Optimised piezoelectric energy scavengers for elder care", *Proc. 10th International EUSPEN Conference*, Zurich, 41-45, 2008.
- [5] A. Helal, M. Mokhtari, B. Abdulrazak, *The Engineering Handbook of Smart Technology for Aging, Disability and Independence*, Wiley, 2008.
- [6] S. Roundy et al., "Improving Power Output for Vibration-Based Energy Scavengers", *IEEE Pervasive Computing*, 14 (1), 28-36, 2005.
- [7] J. Carson, *Springs design handbook*, Dekker, 1978.
- [8] G. Genta, *Vibrations of structures and machines*, Springer, 1998.
- [9] A. Baz, *Active and passive control of structures*, Lectures of the Mechanical Eng. Dept. University of Maryland, 2000.
- [10] S. H. Crandall et al., *Dynamics of mechanical and electromechanical systems*, McGraw Hill, 1968.
- [11] S. M. Shahruz, "Limits of performance of mechanical band-pass filters used in energy scavenging", *J. Sound and Vibration*, 293, 449-461, 2006.
- [12] S. P. Beeby et al., "A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting", *J. Micromechanics and Microengineering*, 17, 1257-1265, 2007.