



# Università degli Studi di Padova

---

DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI  
INDUSTRIALI

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA MECCATRONICA

## Piccoli dispositivi di raccolta di energia elettrica per l'alimentazione di sensori wireless

*Relatore*

Prof.re Giuseppe Chitarin

*Laureando*

Massimiliano Gobbato  
Matricola 1166053

ANNO ACCADEMICO 2020-2021



# Indice

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>1. ENERGIA FOTOVOLTAICA</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1      | Panoramica generale . . . . .   | 1         |
| 1.2      | Condensatore singolo integrato . . . . .                                | 2         |
| 1.3      | GSC in serie al fine di aumentare la tensione . . . . .                 | 5         |
| 1.4      | Applicazioni . . . . .  | 6         |
| <b>2</b> | <b>2. ENERGIA ELETTROMAGNETICA<br/>(VEH vibration energy harvester)</b> | <b>9</b>  |
| 2.1      | Panoramica generale . . . . .   | 9         |
| 2.2      | Analisi teorica . . . . .   | 9         |
| 2.3      | Progettazione del generatore . . . . .                                  | 11        |
| 2.3.1    | Versione Mk1 . . . . .  | 12        |
| 2.3.2    | Versione Mk2 . . . . .  | 14        |
| 2.4      | Analisi sperimentali . . . . .  | 15        |
| 2.5      | Confronto teorico e conclusioni . . . . .                               | 18        |
| 2.5.1    | Confronto con paragrafo 2.2 . . . . .                                   | 18        |
| 2.5.2    | Conclusioni . . . . .   | 20        |
| <b>3</b> | <b>3. ENERGIA PIEZOELETTRICA (VEH vibration energy harvester)</b>       | <b>21</b> |
| 3.1      | Panoramica generale . . . . .   | 21        |
| 3.2      | Analisi teorica . . . . .   | 22        |
| 3.2.1    | Principio di trasduzione . . . . .                                      | 22        |
| 3.2.2    | Materiali piezoelettrici . . . . .                                      | 23        |
| 3.2.3    | Sottosistema di rilevamento . . . . .                                   | 24        |
| 3.2.4    | Il sottosistema di elaborazione . . . . .                               | 24        |
| 3.2.5    | Sottosistema di comunicazione . . . . .                                 | 25        |
| 3.3      | Approccio pratico . . . . .   | 27        |
| 3.3.1    | Sistema generatore MEMES piezoelettrico . . . . .                       | 27        |
| 3.3.2    | Raccolta di energia e funzionamento nodo sensore . . . . .              | 28        |
| 3.3.3    | Duty Cycle e tecniche di gestione dell'alimentazione avanzate . . . . . | 30        |
| 3.3.4    | Materiali di realizzazione . . . . .                                    | 30        |
| 3.3.5    | Problemi di alimentazione e gestione dell'alimentazione . . . . .       | 30        |
| 3.4      | Conclusioni . . . . .   | 31        |
| <b>4</b> | <b>4. ENERGIA TERMOELETTRICA</b>  | <b>33</b> |
| 4.1      | Panoramica generale . . . . .   | 33        |
| 4.2      | Analisi teorica . . . . .   | 34        |
| 4.2.1    | Effetto Seebeck-Peltier . . . . .                                       | 34        |
| 4.2.2    | Modulo TE . . . . .   | 35        |

|          |                                       |           |
|----------|---------------------------------------|-----------|
| 4.2.3    | Analisi teorica del modello . . . . . | 36        |
| 4.3      | Analisi sperimentale . . . . .        | 36        |
| 4.4      | Circuito di conversione . . . . .     | 38        |
| 4.5      | Conclusione . . . . .                 | 39        |
| <b>5</b> | <b>CONFRONTO E CONCLUSIONI</b>        | <b>43</b> |
|          | <b>Bibliografia</b>                   | <b>45</b> |

# Sommario

Il seguente elaborato fa una panoramica su alcuni dei processi di conversione di energia elettrica, **Energy Harvesting**, a partire da energie alternative disponibili nell'ambiente che ci circonda. In particolare analizza i quattro più utilizzati: **fotovoltaico, elettromagnetico, piezoelettrico, termoelettrico** parlando inoltre dei vantaggi di ciascuno e fornendo degli esempi applicativi in cui queste tecnologie vengono sfruttate. Per i vari casi scelti verrà fatta un'analisi basata su un'applicazione specifica, al fine di poter eseguire un'analisi teorica collegata ad un esempio applicativo. Le applicazioni sono limitate a componenti di piccole dimensioni, per tale motivo questi dispositivi si troveranno ad alimentare componenti efficienti e con un consumo di energia contenuto. L'elaborato si divide in cinque capitoli: il primo riguarda la fonte di energia rinnovabile più conosciuta, quella fotovoltaica, e descrive la costruzione e ottimizzazione di un circuito integrato di raccolta e conservazione di energia ricavata dalla luce; il secondo ed il terzo capitolo riguardano la generazione di energia elettrica partendo dalle vibrazioni, ma rispettivamente sfruttando la tecnologia elettromagnetica e piezoelettrica; il quarto approfondisce l'ultima tecnologia, quella termoelettrica, basata sull'effetto Seebeck-Peltier, con riferimento ad applicazioni di uso comune (a differenza delle precedenti); infine viene fatto un confronto generale tra vari progetti che sfruttano le diverse fonti di energia.



# Introduzione

Al giorno d'oggi siamo costretti a dover esplorare nuove fonti di energia rinnovabile e sistemi di produzione che abbiano un impatto ridotto sull'ambiente. Energia solare, eolica e idrica sono già diffusi nel mondo, e si pensa di poter espandere questi impianti per diminuire sempre di più le emissioni provocate dai generatori a combustibile fossile, ma non solo. Anche gli impianti di produzione delle batterie generano emissioni importanti: questi sistemi in grado di immagazzinare l'energia hanno bisogno di essere sostituiti per una periodica manutenzione. Si pensa quindi di contrastarne l'impatto cercando di creare dispositivi in grado di autoalimentarsi sfruttando l'energia disponibile che, in alternativa, andrebbe dissipata. Così facendo diminuirebbe la produzione di batterie e cavi di alimentazione. Le applicazioni possibili sono molteplici, dalle comuni automobili [1] ad impianti industriali situati in ambienti ostili [2]. Quindi, nonostante si parli di una potenza fornita in uscita da questi generatori dell'ordine dei mW, l'impatto di questa tecnologia risulta rilevante sui grandi numeri. Tutto questo ha anche un vantaggio sulla manutenzione: eliminando le batterie, o comunque rendendo non necessaria l'alimentazione diretta di, per esempio, un sensore, si va a ridurre la sostituzione di componenti presenti in luoghi ostili o difficili da raggiungere. Inoltre i sensori installati così alimentati possono essere collocati permanentemente, senza necessità di essere rimossi come nel caso dei cablati e quindi fornire informazioni in modo continuo.

Il seguente testo è una raccolta dei quattro studi diversi basati su tre fonti di energia distinte: energia **solare**, energia ricavata dalle **vibrazione** e energia **termica**. Ognuno di questi studi porta ad un risultato utile all'autoalimentazione di piccoli dispositivi, sfruttando energia rinnovabile o comunque energia dissipata. Per ogni capitolo viene affrontato un dispositivo diverso, esposto dal punto di vista teorico e pratico, con esempi di applicazioni e ottimizzazione dei sistemi al fine di migliorarne l'efficienza. Come conclusione è stato fatto un confronto tra diversi dispositivi anche non esposti nell'elaborato, al fine di evidenziare pregi e difetti tra le varie tecnologie disponibili.





# Capitolo 1

## 1. ENERGIA FOTOVOLTAICA

### 1.1 Panoramica generale

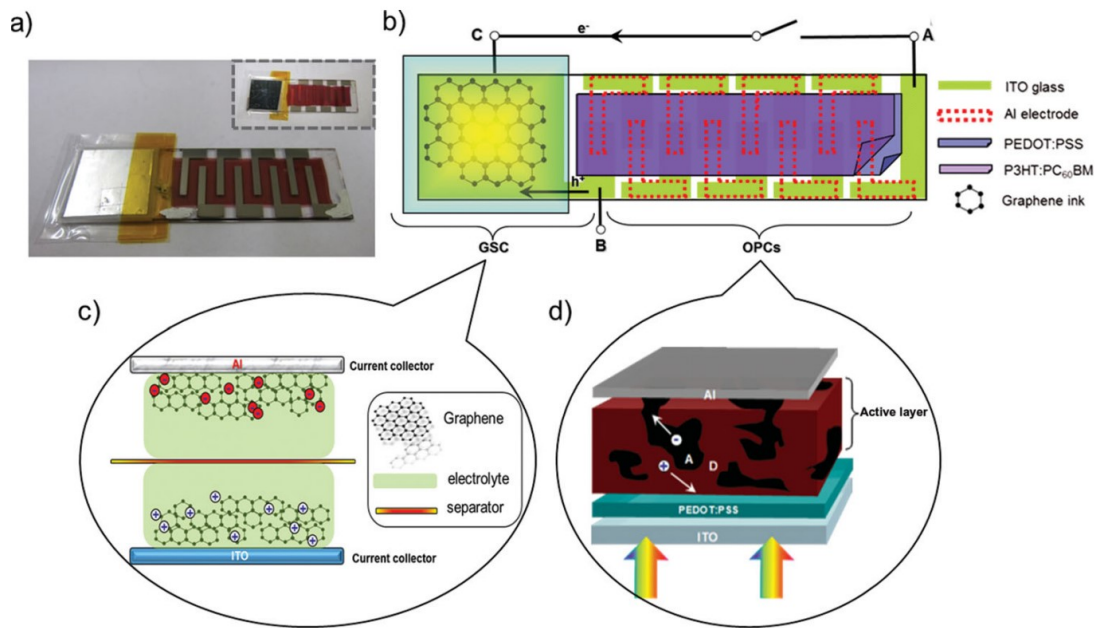
Tra le tecnologie di raccolta di energia più conosciute sicuramente quella fotovoltaica è la più diffusa. Un'energia rinnovabile presente ovunque, che ha trovato utilizzo in impianti di piccole e grandi dimensioni: abitazioni, strade, ricarica dei dispositivi portatili e progetti casalinghi. Per questi motivi sarà trattata in maniera meno approfondita rispetto alle altre tecnologie disponibili. L'energia PV ci garantisce una densità di potenza di  $10 - 100 mW cm^{-2}$ , il doppio rispetto ad altre tecnologie di Energy Harvesting. Le celle fotovoltaiche convertono i fotoni in elettricità. I fotoni possono essere ottenuti dalla luce esterna o interna, con una chiara differenza nella potenza in uscita. Nel presente capitolo verranno considerati i dispositivi OPC, Polymer Organic Photovoltaic Cells, che presentano un costo contenuto e sono quindi un'opzione promettente per i dispositivi di piccole dimensioni. Al giorno d'oggi, nella maggior parte dei sistemi, si fa affidamento alle DSSC, Dye-Sensitized Solar Cell, che in combinazione con le batterie al litio o con i condensatori elettrolitici permettono di progettare sistemi integrati con un output massimo limitato a 1V. Altro componente importante sono i supercondensatori<sup>1</sup>, grazie ai quali otteniamo quantità di energia immagazzinata da 10 a 100 volte maggiore rispetto ai classici condensatori elettrolitici. Sono utilizzati in applicazioni che richiedono molteplici cicli di carica e scarica dell'energia immagazzinata. Questo li rende dei sostituti alle batterie anche se non sono in grado di immagazzinare grandi quantità di energia. Il grafene<sup>2</sup>, strato monoatomico esagonale in 2D di atomi di carbonio, si comporta sia come un semiconduttore P che come un semiconduttore N in assenza di drogaggio. È un ottimo conduttore termico ma, cosa più importante, è il materiale più sottile al mondo, quasi trasparente, ha un carico di rottura teorico di  $130 GPa$ , un modulo di elasticità di circa  $1 TPa$  e può essere stirato fino al 20% della sua lunghezza. In particolare, CVD-grafene (Chemical Vapor Deposition), è stato sintetizzato da varie riserve di carbonio come rifiuti organici, insetti e rifiuti, rendendo così economica la sua produzione.

I componenti appena elencati ci permettono di progettare un'unica unità auto alimentata, con un output massimo di 5V e una riduzione del 43% della resistenza interna

---

<sup>1</sup>Un supercondensatore (SC), chiamato anche ultracondensatore, è un condensatore ad alta capacità molto più grande di altri condensatori, ma con limiti di tensione inferiori, che colma il divario tra condensatori elettrolitici e batterie ricaricabili. In genere immagazzina da 10 a 100 volte più energia per unità di volume o massa rispetto ai condensatori elettrolitici, può accettare e fornire la carica molto più velocemente delle batterie e tollera molti più cicli di carica e scarica rispetto alle batterie ricaricabili. [3]

<sup>2</sup>Il grafene è un materiale costituito da uno strato monoatomico di atomi di carbonio (avente cioè uno spessore equivalente alle dimensioni di un solo atomo). Ha la resistenza teorica del diamante e la flessibilità della plastica[1]. [4]



**Figura 1.1:** Fotografia e illustrazione schematica di un dispositivo standard a foglio di alimentazione integrato basato su grafene.

precedentemente causata dai cavi metallici.

## 1.2 Condensatore singolo integrato

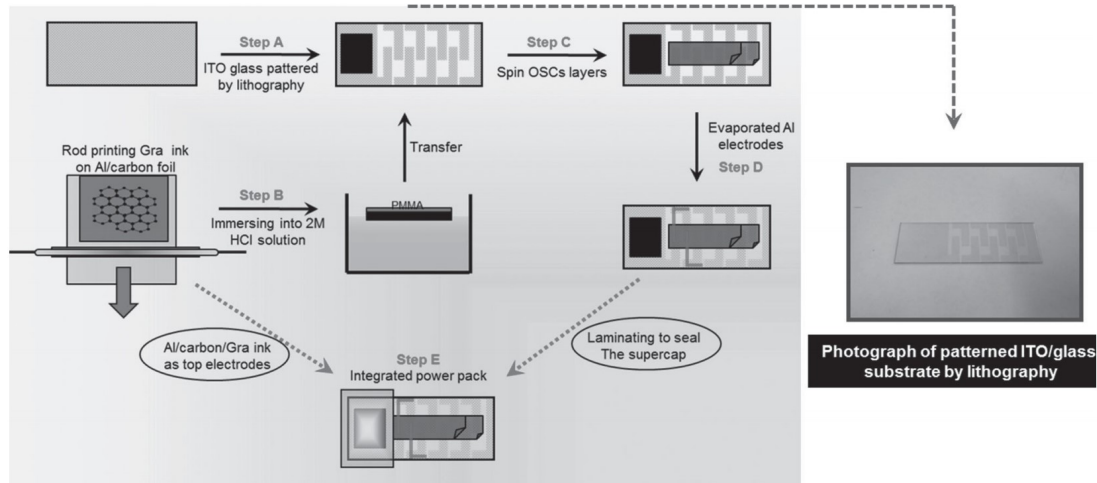
Il seguente testo é un riassunto dei risultati ottenuti nello studio descritto nell'articolo "Graphene-Based Integrated Photovoltaic Energy Harvesting/Storage Device" [5]. La figura 1.1 mostra una fotografia del dispositivo completo: a sinistra il supercondensatore e a destra la cella fotovoltaica. Il primo è un dispositivo simmetrico a doppio strato con elettrodi realizzati con barre rivestite in pasta di grafene, la seconda si basa su un  $P3HT : PC_{60}BM$  [6] organico standard stack con un 3% di efficienza di conversione per una singola cella. Entrambi sono connessi su un singolo strato da un pannello di conduzione. Vi sono tre diverse configurazioni che permettono un output continuo anche quando il supercondensatore si è caricato.

Nella figura 1.2 sono elencati gli step per la realizzazione del dispositivo:

**Step A:** Il processo inizia con la modellazione del substrato di vetro ITO (Indium Tin Oxide)

**Step B:** Per i GSC (Graphene SCroll), l'inchiostro di grafene è inizialmente rivestito a barre su un foglio di alluminio a sua volta rivestito in carbonio conduttivo, viene poi successivamente inciso e il carbonio rimanente trasferito sul modello ITO/vetro.

**Step C:** Dopo la deposizione dell'elettrodo del supercondensatore inferiore, PEDOT:PSS, lo strato attivo  $P3HT : PC_{60}BM$  e gli elettrodi Al sono depositati in sequenza per formare gli OPC.



**Figura 1.2:** Descrizione grafica del processo di realizzazione di un dispositivo standard a foglio di alimentazione integrato basato su grafene.

**Tabella 1.1:** Riassunto dei risultati del dispositivo in serie.

| Voc<br>(V) | Jsc<br>$mA/cm^2$ | FF   | %    |
|------------|------------------|------|------|
| 4,91       | 5,78             | 44.3 | 1,57 |

Otto OPC collegati in serie sono formati su un unico substrato ITO/vetro e questo consente lo sviluppo di una tensione sufficiente per il caricamento completo del supercondensatore. Successivamente, il GSC viene completamente incastonato da un separatore elettrolitico bagnato tra l'elettrodo di grafene inferiore su ITO e un secondo elettrodo di grafene stampato a barre sul foglio AI. Il GSC è infine sigillato in un laminatore utilizzando fogli PE/PP termoplastici.

La connessione di serie su lunghe sezioni di ITO si traduce in una maggiore resistenza rispetto al singolo dispositivo.

La figura 1.3 mostra la prova Galvanostatica<sup>3</sup> di carica/scarica ad una corrente costante di 0,7 mA da cui una resistenza di serie equivalente (ESR) misurata di  $\approx 150 \Omega$ . Un singolo dispositivo GSC potrebbe essere caricato fino a oltre 2 V utilizzando l'elettrolita organico ( $1 mEt_4NBF_4$  carbonato di propilene).

I diagrammi del livello di energia nella Figura 1.4 illustrano il trasporto di elettroni e di lacune all'interno del foglio di alimentazione integrato.

Durante la ricarica sotto illuminazione, i fotoni vengono assorbiti da P3HT e gli eccitoni eccitati vengono dissociati dalle interfacce per produrre elettroni e lacune libere. La differenza di lavoro di estrazione degli elettrodi genera una forza motrice per la carica di deriva verso gli elettrodi dei supercondensatori. La figura 1.5 mostra in modo schematico il collegamento di carica/scarica e l'illustrazione del circuito equivalente, il foglio di alimentazione ha un design a tre terminali che nel diagramma sono denominati A, B e C.

<sup>3</sup>In questa prova viene controllata la densità di corrente elettrica che scorre attraverso l'elettrodo di lavoro e l'elettrodo ausiliario; nel frattempo si registra la differenza di potenziale elettrico che si stabilisce tra l'elettrodo di lavoro e l'elettrodo di riferimento. [7]

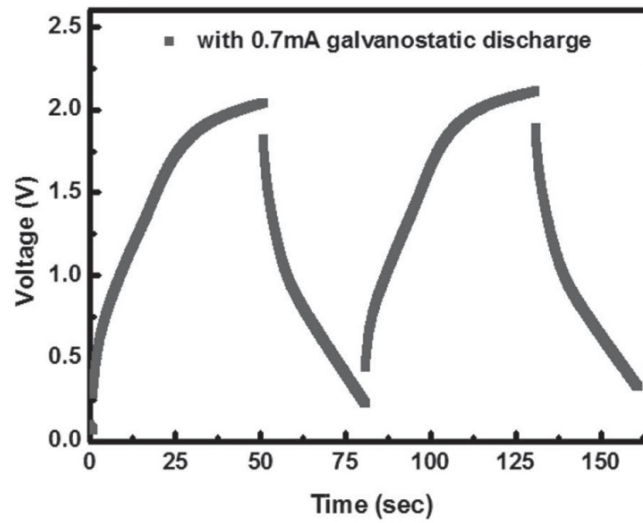


Figura 1.3: Prova Galvanostatica.

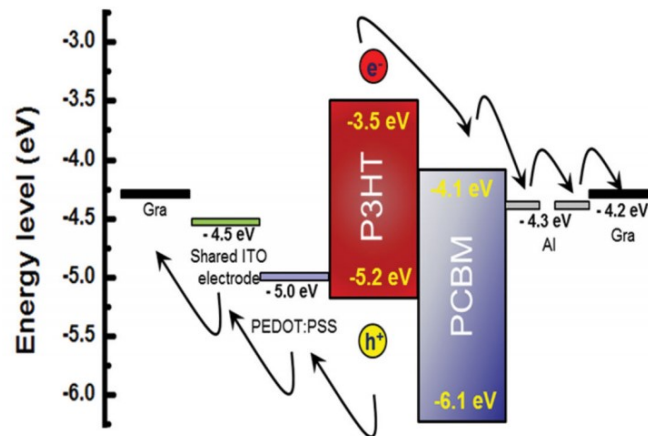


Figura 1.4: Diagramma del livello di energia.

Il terminale B è il pannello madre condiviso tra tutti i dispositivi. Durante la ricarica, i terminali A e C sono collegati per fornire un percorso di ricarica dove si muovono gli elettroni. All'apertura dello switch (scollegamento dei terminali A e C) il LED diventa l'unico percorso di scarica per il supercondensatore. La dinamica nel tempo della tensione durante la fotocarica e la scarica galvanostatica sono illustrati nella Figura 1.6. Il foglio di alimentazione è stato caricato fino a  $\approx 2,3 \text{ V}$  in circa 5 minuti, e poi scaricato ad una corrente costante di  $0,3 \text{ mA}$  per 4 minuti. La curva di scarica non lineare è attribuita all'effetto di saturazione della porosità [8].

La tensione di questo sistema è limitata dal GSC, ed è impostato dalla tensione oltre la quale l'elettrolita reagisce con l'elettrodo e si rompe, riducendo così la vita del dispositivo. Questo limite di tensione consente di verificare il corretto funzionamento del circuito alimentando un LED rosso (tensione di circa  $1,6 \text{ V}$ ).

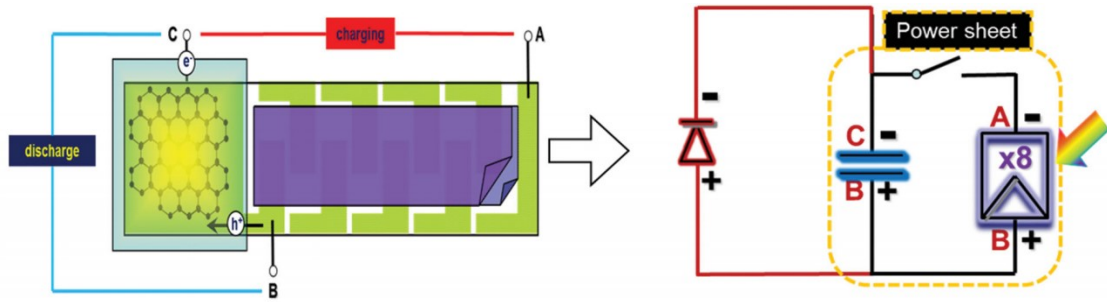


Figura 1.5: Schema equivalente del circuito di carica e scarica.

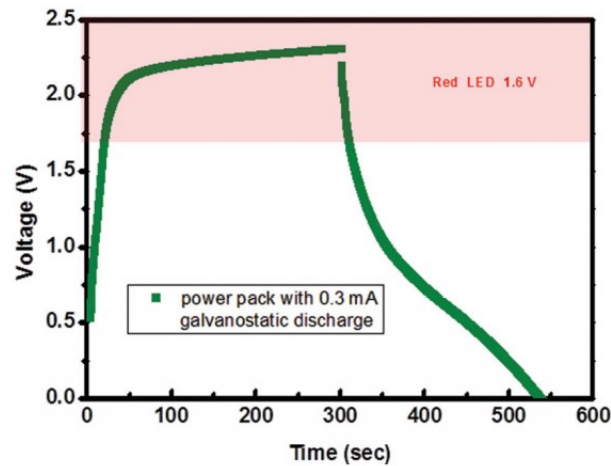


Figura 1.6: Andamento dinamico della tensione nel processo di fotocarica e scarica Galvanostatica.

### 1.3 GSC in serie al fine di aumentare la tensione

Le richieste di applicazione non si limitano alla tensione di alimentazione di 1,6 V; la soluzione a questo problema consiste nella connessione in serie dei condensatori, impilando più strati di elettrodi di grafene. Il dispositivo risultante è composto da 8 OPC collegati in serie e 2 GSC collegati in serie.

La figura 1.7 mostra la curva di carica/scarica galvanostatica a corrente costante di 0,7 mA. La resistenza equivalente ESR del dispositivo è  $\approx 270 \Omega$ . L'andamento nel tempo della tensione durante la fotocarica e la scarica galvanostatica con 0,3 mA è dato nella figura 1.8. I GSC sono stati caricati dagli OPC fino a 3,8 V dopo 10 minuti sotto l'illuminazione AM 1.5. Durante la ricarica, la velocità di carica diminuisce con l'aumento della tensione e a 3,8 V, la velocità raggiunge  $\approx 0,68 mV s^{-1}$ . La densità energetica per l'intero foglio di alimentazione è di  $\approx 0,2 J g^{-1}$ .

Come semplice dimostrazione, il nuovo circuito è stato utilizzato per alimentare un LED rosso con tensione nominale di circa 1,6 V, un LED verde con tensione di circa 2 V, e un LED blu con tensione intorno a 2,4 V come mostrato in figura 1.9. Il foglio di alimentazione integrato rappresenta una buona fonte di energia autoalimentata (generazione di energia e immagazzinamento di energia) per altri dispositivi elettronici (dissipazione di energia).

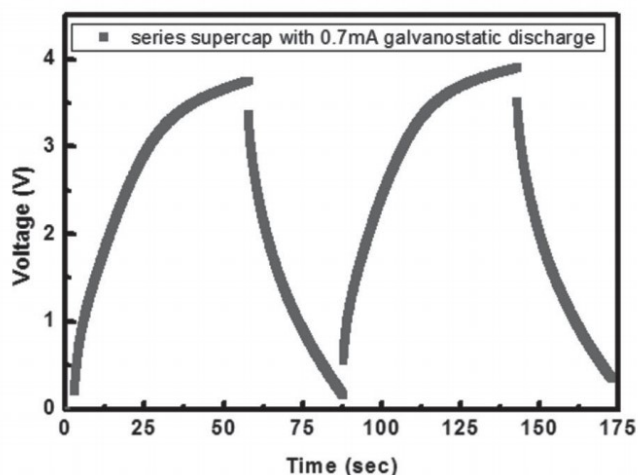
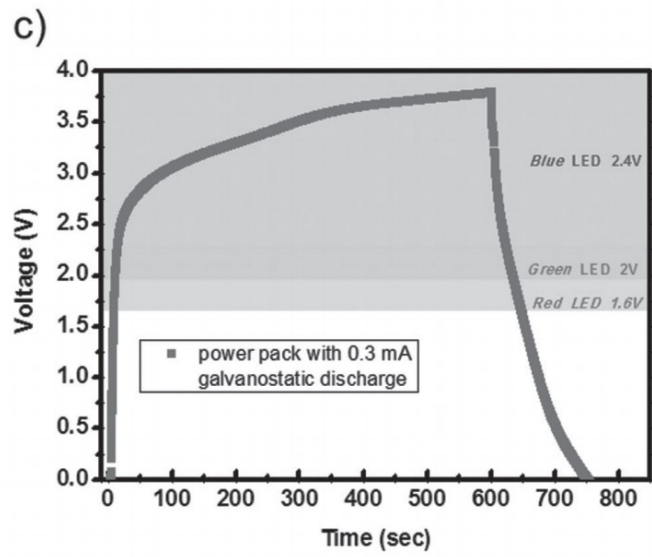


Figura 1.7: Prova Galvanostatica.

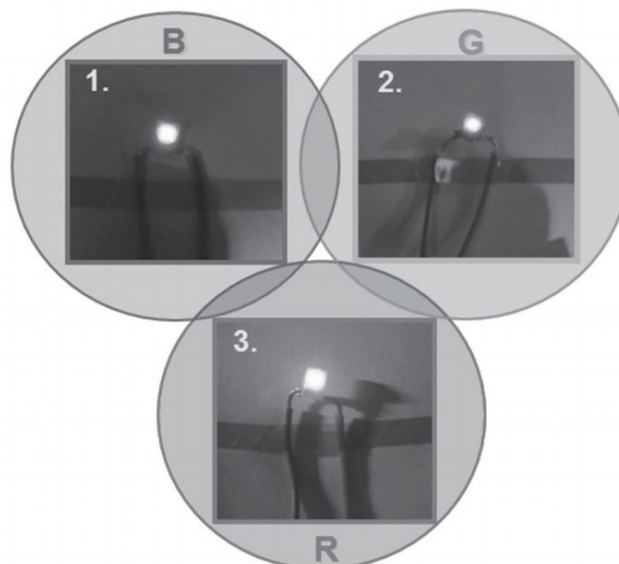
## 1.4 Applicazioni

Il grafene in diverse forme e qualità viene utilizzato per facilitare la generazione di energia e la produzione di elementi di stoccaggio per una piattaforma di alimentazione integrata. È importante sottolineare che, poiché gli strati fotoreattivi e la pasta di grafene sono entrambi soluzioni processabili, i dispositivi di raccolta e stoccaggio dell'energia possono essere stampati insieme su singoli substrati. Nei tre terminali mostrati, la tensione a circuito aperto per gli 8 OPC in serie è di  $\approx 5$  V e l'efficienza di conversione è  $\approx 1,6\%$ . Con la combinazione di OPC in serie e GSC è stata mostrata una tensione complessiva del sistema fino a  $\approx 4$  V, adatta per comandare diodi a emissione di luce rossa, verde e blu. È anche dimostrato che un foglio di alimentazione integrato con elettrodi di grafene sull'OPC è un'alternativa adatta per la produzione roll-to-roll<sup>4</sup>. Di conseguenza, il foglio di alimentazione integrato, che può essere stampato su fogli sottili, è adatto per piccoli sistemi elettronici a basso costo e consumo di energia -come i sensori wireless- che non richiedono una frequente manutenzione.

<sup>4</sup>La lavorazione roll-to-roll (R2R) è il metodo utilizzato per applicare rivestimenti, stampare o eseguire altre tecniche, iniziando con un rotolo di materiale flessibile e quindi riavvolgendo dopo il processo, per creare un rotolo in uscita



**Figura 1.8:** Andamento dinamico della tensione nel processo di fotocarica e scarica Galvanostatica.



**Figura 1.9:** Semplice test del dispositivo alimentando il led.





## Capitolo 2

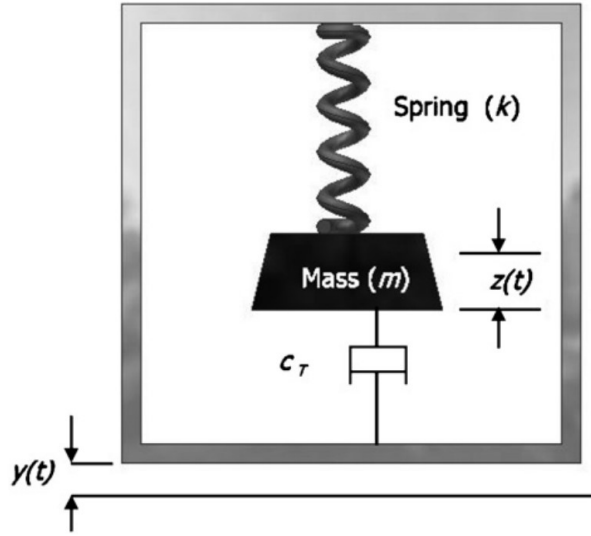
# 2. ENERGIA ELETTROMAGNETICA (VEH vibration energy harvester)

### 2.1 Panoramica generale

Il sistema che è stato analizzato nel precedente capitolo non è l'unica tra le tecnologie disponibili per la raccolta di energia. I sensori wireless hanno ottenuto molta attenzione grazie alla loro flessibilità, facilità di implementazione e possibilità di connettere vari sistemi senza il costo aggiuntivo dei cavi e della loro messa in opera. È possibile utilizzare anche l'energia cinetica presente nell'ambiente circostante al sensore trasformandola in energia elettrica. In questo capitolo verrà analizzata la conversione dell'energia meccanica, sottoforma di vibrazioni già presenti nell'area di attività del sistema, in energia elettrica, nello specifico usando l'elettromagnetismo. Le vibrazioni sono una fonte di energia disponibile in numerose applicazioni industriali e non: veicoli, macchine industriali, ponti, frigoriferi, lavatrici e molto altro. La quantità di energia ottenibile da queste risorse dipende dalla quantità e dalla forma dell'energia cinetica a disposizione, nonché dall'efficienza del dispositivo di conversione. Il testo sottostante si basa sul progetto VIBES, Vibration Energy Scavenging [9], dell'Unione Europea. Presenta lo sviluppo di un micro-generatore elettromagnetico progettato per raccogliere energia dalle vibrazioni di un'unità compressore d'aria, con vibrazione massima nell'intervallo di  $0,19-3,7 \text{ ms}^{-2}$  frequenze tra  $43 \text{ Hz}$  e  $109 \text{ Hz}$ . Il sistema è stato quindi progettato per operare all'interno di questa gamma di frequenze e per essere il più piccolo possibile, garantendo comunque livelli utilizzabili di potenza e tensione in uscita. Il documento presenta un'analisi dei generatori inerziali, la progettazione, la simulazione e il test del generatore elettromagnetico, oltre ad un confronto con altri generatori inerziali.

### 2.2 Analisi teorica

La figura 2.1 è uno schema generale del sistema molla-massa-ammortizzatore che ci permette di trasformare l'energia cinetica considerando una massa  $m$  e una molla di rigidità  $k$ . L'energia totale persa del sistema è rappresentata dal **coefficiente di smorzamento**  $c_T = c_p + c_e$  dove  $c_p$  rappresenta le **perdite parassite** (ad esempio lo smorzamento dovuto all'attrito con l'aria) e  $c_e$  **l'energia elettrica estratta** dal meccanismo di trasduzione.



**Figura 2.1:** Schema generale del sistema molla-massa-ammortizzatore.

Se assumiamo che il generatore è spinto da un'eccitazione di base armonica:

$$y(t) = Y \sin(\omega t) \quad (2.1)$$

dove  $Y$  è l'ampiezza di vibrazione,  $y(t)$  si muoverà sfasato rispetto alla massa con **sfasamento**  $z(t)$  tra la massa ed il telaio. La potenza media dissipata dall'ammortizzatore è descritta come:

$$\bar{P}_{diss} = \frac{m \xi_T Y^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^3 \omega^3}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2 \xi_T \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right]^2} \quad (2.2)$$

dove  $\omega$  è la frequenza angolare della vibrazione,  $\omega_n$  è definita come la frequenza naturale del sistema e  $\xi_T$  la **frequenza di smorzamento** totale.

Una spiegazione più dettagliata è disponibile nel testo di riferimento per lo studio di dispositivi di generazione di energia basati sulle vibrazioni [10]. Siccome la 2.2 è valida per condizioni di stato stabile,  $\bar{P}_{diss}$  equivale all'energia cinetica fornita in ogni istante dall'applicazione della vibrazione. La potenza massima dissipata è data dalla potenza media quando il sistema opera a  $\omega_n$

$$P_{diss_{MAX}} = \frac{m Y^2 \omega_n^3}{4 \xi_T} \quad (2.3)$$

Dalla 2.3 ricaviamo 3 regole:

- 1 La potenza varia in modo lineare insieme alla massa.
- 2 La potenza cresce in modo proporzionale al cubo della frequenza.
- 3 La potenza cresce in modo proporzionale al quadrato dell'ampiezza della vibrazione.

Le regole 2 e 3 dipendono entrambe dall'eccitazione di base, quelle presenti nell'ambiente.

È necessario definire le frequenze di lavoro disponibili sulle quali bisogna basarsi per la realizzazione del generatore. Siamo limitati da  $z_{MAX}$  (definita come lo spostamento della

massa) che dipende da dimensioni, design e limiti dei materiali con i quali viene realizzato il trasduttore. Inoltre,  $z_{MAX}$  è  $Q_T$  volte maggiore di  $Y$ , dove  $Q_T$  è il **fattore di qualità totale** del generatore dato dall'equazione:

$$Q_T = \frac{\omega_n m}{c_T} = \frac{1}{2\xi_T} \quad (2.4)$$

La relazione tra  $Q_T$  e i fattori che compongono il coefficiente di smorzamento sono evidenziati della seguente equazione:

$$\frac{1}{Q_T} = \frac{1}{Q_{OC}} + \frac{1}{Q_E} = \frac{1}{2\xi_{OC}} + \frac{1}{2\xi_E} \quad (2.5)$$

Volendo evidenziare  $z_{MAX}$  andiamo a scrivere la potenza media come:

$$\bar{P} = \frac{mY\omega_n^3 z_{MAX}}{2} \quad (2.6)$$

Incorporando  $\xi_{OC}$  e  $\xi_E$  nella 2.3 otteniamo la potenza media erogata nel dominio elettrico:

$$\bar{P}_E = \frac{m\xi_E Y^2 \omega_n^3}{4(\xi_{OC} + \xi_E)^2} \quad (2.7)$$

La  $\bar{P}_E$  è massima quando  $\xi_E = \xi_{OC}$ , il che indica che le perdite meccaniche coincidono con lo smorzamento elettrico. In questo caso allora l'equazione diventa:

$$\bar{P}_{E_{MAX}} = \frac{m\xi_{OC} Y^2 \omega_n^3}{4(\xi_{OC} + \xi_{OC})^2} = \frac{mY^2 \omega_n^3}{16\xi_{OC}} \quad (2.8)$$

Nel caso reale non tutta l'energia convertita in energia elettrica sarà trasmessa al carico. In particolare, una parte viene persa nella molla. La potenza del carico reale in funzione dell'induttanza del carico e della resistenza è calcolata nella 2.9

$$P_{L_{MAX}} = \frac{mY^2 \omega_n^3}{16\xi_{OC}} \left( \frac{R_{carico}}{R_{carico} + R_{bobina}} \right) \quad (2.9)$$

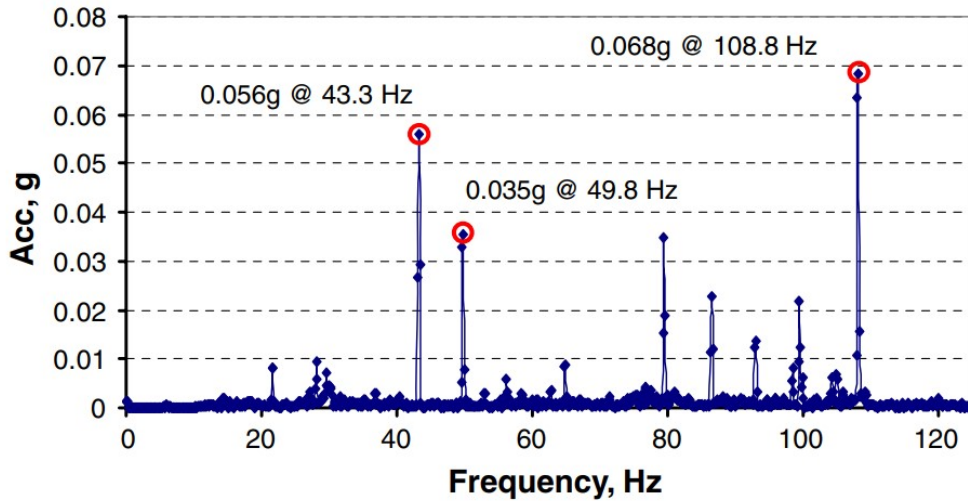
Infine, la  $R_{carico}$  e la  $R_{bobina}$  hanno un effetto sul coefficiente di smorzamento derivato dalla **trasduzione elettromagnetica**  $c_E$  espressa come:

$$c_E = \frac{(NlB)^2}{R_{carico} + R_{induttanza} + j\omega L_{bobina}} \quad (2.10)$$

dove  $N$  è il numero di giri della bobina,  $l$  è la lunghezza del conduttore e  $B$  è la densità di flusso a cui è sottoposto. Al denominatore invece troviamo rispettivamente la resistenza di carico, la resistenza e l'induttanza della bobina.

## 2.3 Progettazione del generatore

Dalle misure dei livelli di vibrazione sul compressore, viene indicato che la banda di frequenza va da  $43Hz$  a  $109Hz$ , con livelli di accelerazione di  $0,19-3,7 ms^{-2}$ . Esempi dello spettro di vibrazione sono mostrati nella figura 2.2. Il generatore sarà progettato per lavorare a queste frequenze con un'accelerazione di  $0,59 ms^{-2}$ . È stata fatta questa scelta perché questi valori sono tipici delle applicazioni trovate nel campo industriale e quindi applicabili a più sistemi.



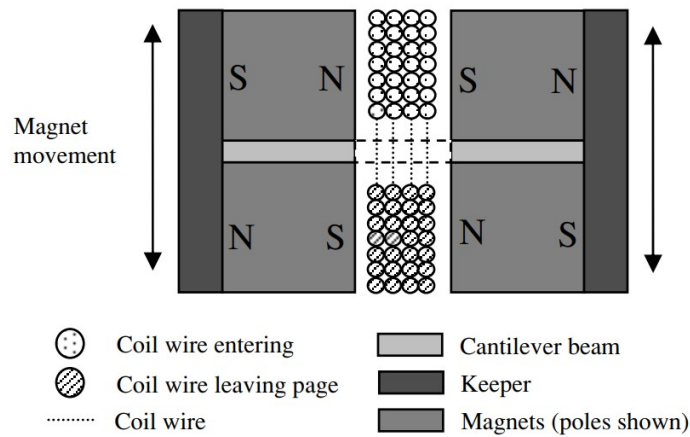
**Figura 2.2:** Esempio dello spettro delle frequenze misurate sulla superficie esterna del compressore.

### 2.3.1 Versione Mk1

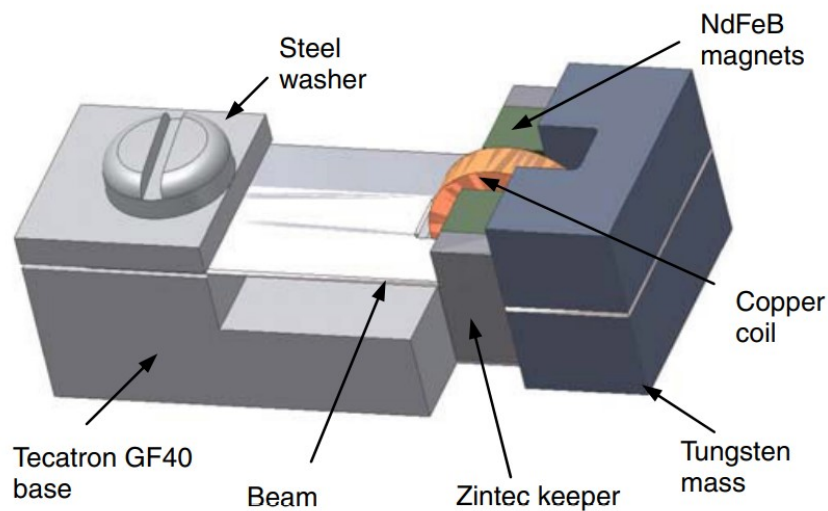
Il generatore presentato è una versione miniaturizzata del progetto esposto nel testo [9]. Viene progettato con l'obiettivo di ottenere un sistema di trasduzione in grado di sfruttare vantaggi e proprietà del materiale magnetico e alta densità di avvolgimenti, fornendo allo stesso tempo un livello di potenza utilizzabile nonostante le dimensioni compatte. Il design ridotto utilizza i magneti permanenti Neodimio-Ferro-Boro (NdFeB), un materiale relativamente raro caratterizzato da densità di flusso magnetico elevato, che viene legato con Cianoacrilato [11] sulle superfici superiore e inferiore di una trave a sbalzo, con l'aiuto di un jig per l'allineamento. I magneti sono disposti come illustrato nella figura 2.3, con dimensioni di  $1 \times 1 \times 1.5 \text{ mm}^3$ . Il circuito magnetico è completato da zinco rivestito in acciaio dolce, che permette l'accoppiamento di flusso tra i magneti superiori e inferiori.

Un'ulteriore massa viene aggiunta al generatore sotto forma di due blocchi di lega di tungsteno attaccati all'estremità libera della trave a sbalzo. La lega di tungsteno ha una densità di  $18,1 \text{ g cm}^{-3}$  fornendo una massa inerziale compatta. La densità dei magneti è di  $7,6 \text{ g cm}^{-3}$ . La trave utilizzata in questo progetto è lunga 9 mm, larga 3 mm lungo i primi 7 mm della lunghezza, e larga 4 mm per gli ultimi 2 mm. Sono stati aggiunti spazi e fori per ospitare la bobina e il bullone. Tutti gli angoli sono arrotondati per ridurre effetti di concentrazione dello stress.

Per la prima versione del generatore, le travi sono state fabbricate da dischi in silicio monocristallino a doppia lucidatura [12]. La geometria della trave e lo spessore richiesto sono stati determinati dall'analisi degli elementi finiti. Uno spessore di  $50 \mu\text{m}$  ha fornito frequenze risonanti tra 50 e 60 Hz. I dischi sono stati acquistati nello spessore desiderato (con una tolleranza del 5%, avendo quindi una finitura di alta qualità su entrambe le superfici, superiore e inferiore). L'insieme della trave a sbalzo è stata ancorata sulla base utilizzando un dado e bullone di dimensioni M1 e una rondella quadrata. Queste permettono un bloccaggio perpendicolare alla lunghezza della trave. L'elevata rigidità dei materiali fornisce un bordo di bloccaggio stabile, fondamentale per minimizzare perdita di energia sul punto di fissaggio della trave. La bobina è stata incollata manualmente a un incavo semi-circolare presente sulla base. Gli avvolgimenti hanno un raggio esterno



**Figura 2.3:** Disposizione dei quattro magneti.



**Figura 2.4:** Rappresentazione del dispositivo assemblato.

$R_o$  di 1,2 mm, un raggio interno  $R_i$  di 0,3 mm e uno spessore  $t$  di 0,5 mm. Sono stati realizzati utilizzando fili di rame smaltato di 25  $\mu\text{m}$  di diametro per un totale di 600 giri. Un disegno del generatore assemblato è mostrato nella figura 2.4. Con l'aiuto del jig per l'allineamento può essere raggiunta una tolleranza superiore a 0,1 mm assemblando manualmente i componenti. Il volume di questi è di 0.1  $\text{cm}^3$ , mentre il volume pratico, compreso anche quello della trave, è di circa 0.15  $\text{cm}^3$ .

Analizziamo ora i risultati dell'esperienza pratica. Con un'accelerazione di 60 mg ( $1g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$ ) su un carico di 110  $\Omega$  il generatore ha prodotto una potenza di picco di 10,8 W. Il livello di tensione corrispondente era di 34,5 mVrms. Il generatore ha anche dimostrato un comportamento non lineare che ha portato ad un livello significativo di isteresi. Questo si può notare nella figura 2.6, in cui la potenza in uscita è stata misurata in relazione all'aumento da un livello inferiore ad un livello superiore della frequenza di risonanza. Quando si riduce la frequenza, la potenza massima ottenibile è di 2,5  $\mu\text{W}$ . Anche i livelli di potenza erogati al carico erano sufficienti per le applicazioni richieste,

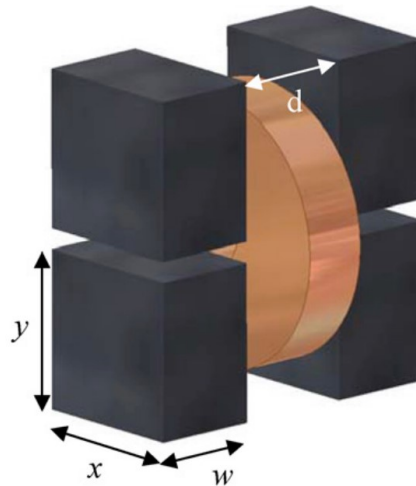


Figura 2.5: Dimensioni dei magneti per la simulazione.

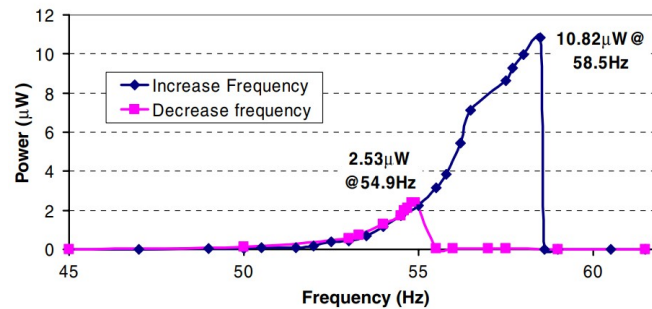


Figura 2.6: Potenza generata in funzione della frequenza.

ma il livello di tensione era troppo basso per consentire il successivo condizionamento del segnale di tensione.

### 2.3.2 Versione Mk2

Si è deciso quindi di progettare una seconda versione del generatore, con l'obiettivo di **ottimizzare il sistema e aumentare i livelli di tensione e di potenza**. In particolare, sono state rivisitate le dimensioni dei magneti, i materiali utilizzati per la realizzazione della trave e i parametri della bobina.

Per ottimizzare il circuito elettromagnetico è stato utilizzato il software ANsoft Maxwell magnetic finite element (FE) [13]. È stata studiata la tensione del circuito aperto al variare delle dimensioni del magnete, altezza  $x$  e lunghezza  $y$ , tenendo costanti a  $1,5\text{ mm}$  lo spessore  $w$  e a  $1\text{ mm}$  la distanza tra i magneti  $b$  (figura 2.5). Le simulazioni sono state effettuate con una frequenza di eccitazione di  $60\text{ Hz}$  e un'accelerazione di  $0,59\text{ m s}^{-2}$ .

- In primo luogo, la dimensione  $y$  è stata fissata a  $1\text{ mm}$  e  $x$  è stata variata tra  $1$  e  $3\text{ mm}$ . La tensione generata dal picco aumenta con l'aumento di  $x$ , ma il tasso di miglioramento si riduce oltre  $2,5\text{ mm}$ .

Poiché, per un determinato volume, l'aumento della larghezza del magnete provoca una riduzione delle dimensioni della massa di prova, la dimensione  $x$  è stata fissata a  $2,5\text{ mm}$ .

**Tabella 2.1:** Risultati dell'analisi teorica.

| Induttanza | Diametro del cavo $\pi[\mu m]$ | Numero di giri | $R_{bobina}$ $[\Omega]$ | Fattore di riempimento |
|------------|--------------------------------|----------------|-------------------------|------------------------|
| A          | 25                             | 600            | 100                     | 0,67                   |
| B          | 16                             | 1200           | 400                     | 0,45                   |
| C          | 12                             | 2300           | 1500                    | 0,53                   |

- Successivamente, con  $x$  fisso,  $y$  è stato regolato tra 1 e 3  $mm$ . I risultati della simulazione mostrano ancora una volta un miglioramento della tensione generata con un aumento  $y$  fino a 2  $mm$ .
- La simulazione ha identificato una dimensione pratica ottimale del magnete di  $2,5 \times 2 \times 1,5 mm^3$ , con ulteriori aumenti delle dimensioni del magnete che hanno prodotto decremento nella tensione a scapito dell'aumento delle dimensioni del generatore e della ridotta massa.

Le travi in silicio monocristallino utilizzati nel generatore Mk1 sono risultate troppo fragili da maneggiare durante l'assemblaggio. Pertanto, sono stati studiati materiali metallici alternativi in rame berillio (BeCu) e acciaio inossidabile tipo 302 full hard, che possiedono proprietà meccaniche adatte a questa applicazione. La frequenza di risonanza del generatore è definita dalla geometria del fascio, dal materiale e dalla massa inerziale.

Oltre alla bobina utilizzata nel generatore Mk1 sono state studiate altre due bobine di dimensioni identiche. Le tre bobine, A, B e C, sono state formate da filo di rame rispettivamente 25, 16 e 12  $\mu m$  di diametro (2.1). La lunghezza del filo utilizzato per ogni bobina può essere calcolata da

$$L_{\omega} = \frac{R_{bobina} A_{\omega}}{\rho} \quad (2.11)$$

dove  $A_{\omega}$  è l'area trasversale del filo e  $\rho$  la resistività del rame ( $1,7 \times 10^{-8} \Omega m$ ). In questo modo si conferiscono lunghezze di filo di 2,9, 4,7 e 10  $m$  rispettivamente per le bobine A, B e C. Il fattore di riempimento della bobina,  $F_{bobina}$ , (il rapporto tra il volume del conduttore e quello della bobina) è dato da:

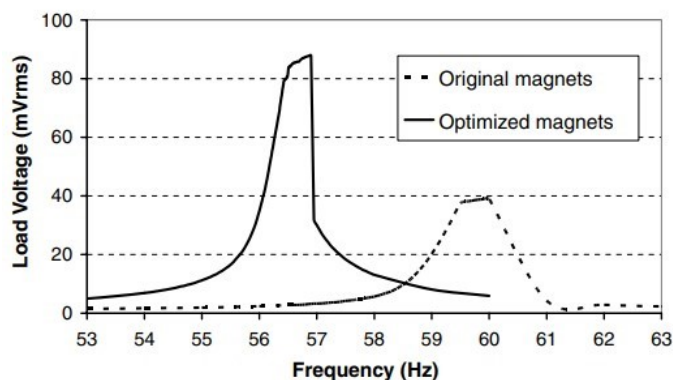
$$F_{bobina} = \frac{L_{\omega} \Phi^2}{4(R_o^2 - R_t^2)t} \quad (2.12)$$

Da questa equazione otteniamo un  $F_{bobina}$  di 0,67 per A, 0,45 per B e 0,53 per C. Questo dimostra che c'è una differenza nella densità degli avvolgimenti in ciascuna delle bobine a causa delle variazioni nel processo di avvolgimento. È preferibile un fattore di riempimento più elevato, poiché indica un numero maggiore di giri all'interno di un determinato volume.

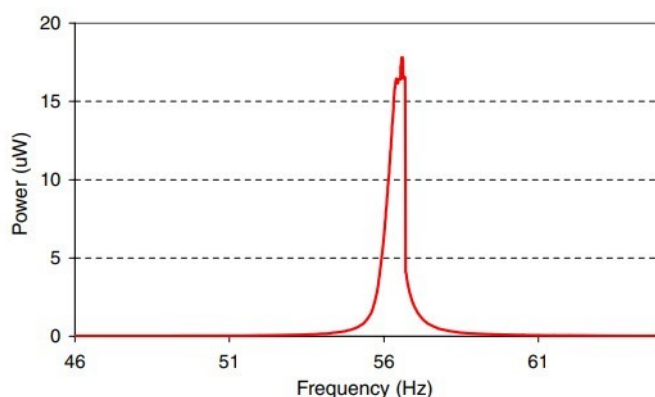
## 2.4 Analisi sperimentali

I test del generatore sono stati svolti utilizzando un'unità shaker con un accelerometro di feedback e un carico resistivo programmabile. Il sistema è controllato dal software LabView, che consente all'utente di programmare lunghe sequenze di test e caratterizzare in modo automatico ogni generatore su una serie di livelli di accelerazione, di resistenze al carico e di frequenze.





**Figura 2.7:** Tensione di output generata nella versione con magneti ottimizzati.



**Figura 2.8:** Potenza di output ottimale della versione con magneti ottimizzati.

I seguenti risultati sono stati presi ad un livello di accelerazione di 60 mg, se non diversamente indicato. Il primo esperimento ha confrontato i magneti da  $1 \times 1 \times 1,5 \text{ mm}^3$  alle dimensioni ottimizzate;  $2,5 \times 2 \times 1,5 \text{ mm}^3$  utilizzando la bobina A.

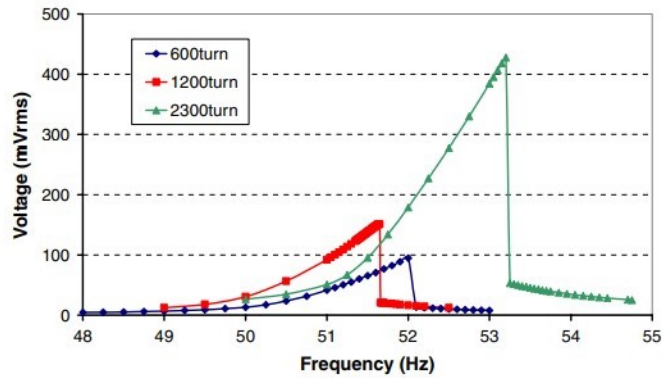
Il confronto è illustrato nella figura 2.7 che mostra la misura di tensione su una resistenza al carico di  $9 \text{ M}\Omega$  rispetto alla frequenza. La frequenza di risonanza ottenuta di 56,6 Hz indica un accordo ragionevole, entro il 10%, del risultato previsto. La differenza è dovuta alla tolleranza sullo spessore della trave e sulla risposta non lineare del generatore. La tensione di uscita di picco aumenta da 39  $\text{mVrms}$ , con i magneti originali, a 88  $\text{mVrms}$  con la nuova configurazione, registrando un aumento del 225%.

Le bobine di tipo A, B e C e i relativi gruppi di fascio si trovavano ciascuna su un base del generatore. La tensione di uscita risultante per ogni tipo di bobina è illustrata nella figura 2.9.

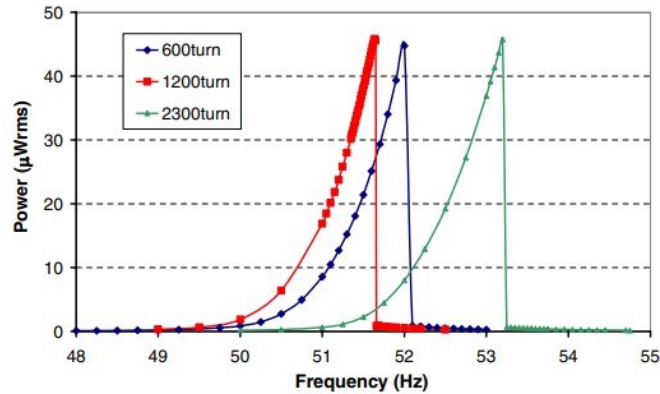
Come previsto, la tensione di uscita aumenta con un numero crescente di giri con 95, 151 e 428  $\text{mVrms}$  generati rispettivamente dai 600, 1200 e 2300 avvolgimenti di bobina. L'energia generata è molto simile per ogni dispositivo, come mostrato nella figura 2.10 e con il set completo dei risultati riepilogati nella tabella 2.2.

L'energia generata è essenzialmente la stessa per ogni dispositivo perché la tensione di output è compensata dall'aumento della resistenza alla bobina. Questo viene reso evidente dall'equazione per il fattore di smorzamento (2.9). L'aumento della tensione per





**Figura 2.9:** Tensione di output per 600/1200/2300 avvolgimenti della bobina per la resistenza ottimale.



**Figura 2.10:** Potenza di output per 600/1200/2300 avvolgimenti della bobina per la resistenza ottimale.

il generatore con bobina C per oltre  $400\text{ mVrms}$  dovrebbe essere sufficiente per consentire la raddrizzamento passiva e implementare il circuito di step-up. Inoltre, la potenza di uscita del generatore è aumentata fino a  $45\mu\text{W}$  a  $60\text{ mg}$  di eccitazione. Ciò è dovuto ai miglioramenti nell'assemblaggio del dispositivo, in particolare il bloccaggio e l'allineamento del fascio, che porta a una riduzione dell'energia parassita di smorzamento e a un aumento del fattore  $Q$  del circuito aperto. L'elevato  $Q_{O/C}$  significa che questi generatori hanno dimostrato comportamento non lineare a livelli di accelerazione molto bassi ( $<3\text{ mg}$ ) e il fattore  $Q$  non può essere determinato da una frequenza come quella mostrata nella figura 2.10. Quindi è stato misurato osservando il decadimento del segnale di tensione dal generatore. Nel caso della bobina C il generatore è stato inizialmente portato a risonanza

**Tabella 2.2:** Risultati dell'analisi.

| Induttanza | Frequenza di risonanza | Resistenza di carico | Potenza di risonanza   | Tensione di risonanza |
|------------|------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|
| A          | 52.1 Hz                | $200\ \Omega$        | $44.7\ \mu\text{Wrms}$ | $95\ \text{mVrms}$    |
| B          | 51.64 Hz               | $500\ \Omega$        | $45.8\ \mu\text{Wrms}$ | $151\ \text{mVrms}$   |
| C          | 53.2 Hz                | $4\ \text{k}\Omega$  | $45.7\ \mu\text{Wrms}$ | $428\ \text{mVrms}$   |

a 20 mg per poi fermare bruscamente l'eccitazione. La figura 2.11 mostra il decadimento del generatore d'uscita a circuito aperto su 6,5 s, la figura 2.12 mostra il decadimento immediatamente dopo aver spento l'eccitazione e la figura 2.13 mostra il segnale circa 1,5 s più tardi. Il fattore  $Q$  può essere calcolato con l'equazione 2.13

$$Q = \frac{\pi f_0 \Delta t}{\ln \frac{V_1}{V_2}} \quad (2.13)$$

dove  $f_0$  è la frequenza,  $V_1$  e  $V_2$  sono le ampiezze di tensione ad un intervallo di tempo  $\Delta t$ . Il fattore  $Q$  calcolato da 2.12 è 520, mentre il fattore  $Q$  in 2.13 è 274. Ciò indica che lo smorzamento parassita è una funzione dell'ampiezza e diminuisce con l'aumento dei livelli di accelerazione dell'eccitazione. Questo comportamento potrebbe essere dovuto ai magneti che estendendosi oltre l'influenza della bobina alle ampiezze superiori che, anche a circuito aperto, produce un effetto di smorzamento.

## 2.5 Confronto teorico e conclusioni

### 2.5.1 Confronto con paragrafo 2.2

Dato il comportamento non lineare dei generatori ad alto fattore  $Q$ , il generatore utilizzato per valutare la dimensione ottimale del magnete permanente è stato confrontato con i dati della teoria. Questo dispositivo è molto più smorzato e non ha dimostrato comportamenti non lineari di frequenza o smorzamento al di sotto di  $0,29 \text{ ms}^{-2}$  di accelerazione.

Il generatore è stato confrontato con i calcoli teorici per l'alimentazione fornita dall'ambiente 2.3, con l'energia erogata al dominio elettrico 2.9 e con l'energia erogata al carico 2.10.

- In primo luogo, i fattori di qualità del loop chiuso e aperto sono stati misurati ad un livello di accelerazione inferiore a quello corrispondente al comportamento non lineare. I valori misurati di  $Q_T$  e  $Q_{OC}$  a 20 mg sono rispettivamente 119 e 232 e, dall'equazione 2.5, risulta che  $Q_E$  è uguale a 244.

Si può vedere che le condizioni ottimali di smorzamento sono state raggiunte ed è ragionevole utilizzare equazioni 2.8 e 2.9.

- Le resistenze di bobina e carico,  $R_{bobina}$  e  $R_{carico}$  2.9, sono rispettivamente a 100 e 200  $\Omega$ . La potenza in uscita prevista dalle equazioni e l'output misurato dal generatore sono stati tracciati rispetto all'accelerazione fino a  $0,29 \text{ ms}^{-2}$  (figura 2.14). Ciò dimostra un ottimo accordo tra i livelli di potenza previsti e misurati, dimostrando che il microgeneratore sta convertendo il 30% della potenza totale dissipata in energia elettrica.

A causa delle relative  $R_{bobina}$  e  $R_{carico}$ , un terzo della potenza convertita nel dominio elettrico viene persa all'interno della bobina.

- L'equazione 2.9 evidenzia l'importanza della riduzione della resistenza della bobina e dell'aumento della resistenza al carico, mantenendo le condizioni di smorzamento ottimale.

I risultati teorici e pratici mostrano un eccellente accordo fino a  $0,29 \text{ ms}^{-2}$ . Superato questo valore, il comportamento non lineare altera la risposta di frequenza e i livelli di smorzamento parassita, rendendo difficile determinare dei valori teorici accurati.

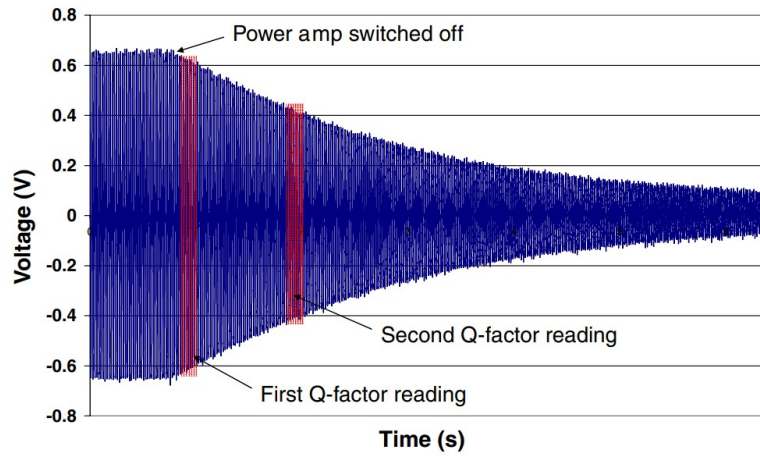


Figura 2.11: Decadimento di tensione di uscita del generatore con bobina C.

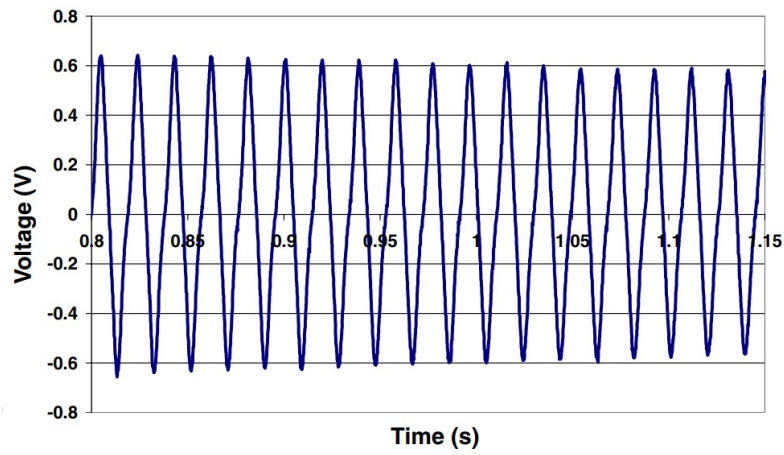


Figura 2.12: Decadimento immediatamente dopo aver spento l'eccitazione.

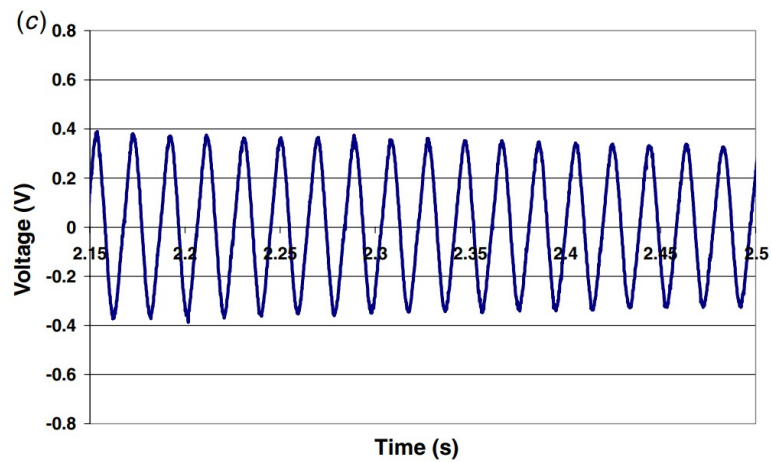


Figura 2.13: Decadimento 1,5 s più tardi.

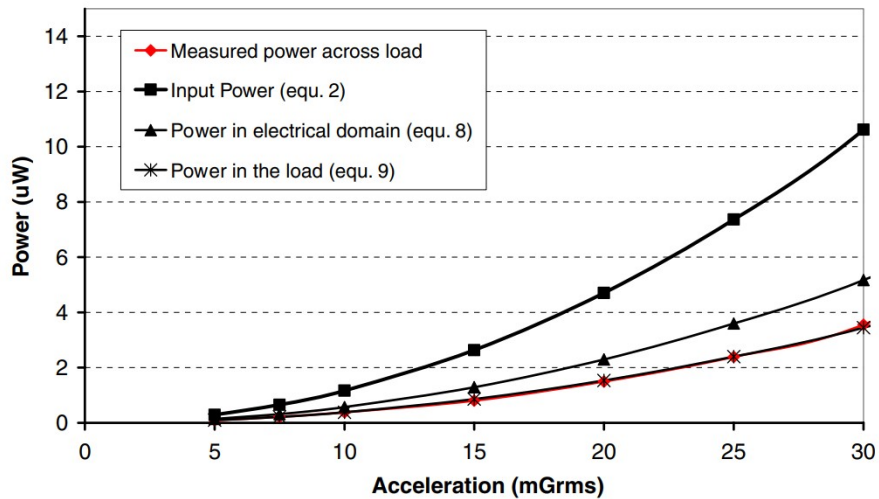


Figura 2.14: Confronto dati teorici e sperimentali.

### 2.5.2 Conclusioni

Il dispositivo è in grado di produrre energia utile da un livello di vibrazione di 60 mg, fornendo  $46 \mu W$  a un carico resistivo di  $4 k\Omega$  quando il dispositivo viene eccitato alla sua frequenza di risonanza di  $52 Hz$ . Questa corrisponde ad una densità di potenza di  $307 \mu W m^{-3}$ . Il generatore fornisce il 30% della potenza totale dissipata nel generatore sotto forma di energia elettrica nel carico. Dalle equazioni di base che governano il generatore è risultato che l'energia trasmessa diminuisce con il volume del dispositivo e la riduzione dell'accelerazione delle vibrazioni di ingresso. Uno degli obiettivi di questo studio è stato quello di dimostrare che era possibile progettare un dispositivo di questo volume in grado di produrre energia utile a partire da soli  $0,59 ms^{-2}$  di vibrazione. Per dimostrare che l'energia di output del dispositivo è "utile" (cioè di un livello di tensione che ne consente la rettifica e lo stoccaggio), è stato montato un circuito di rettifica e amplificazione sul generatore. Esso ha infatti dimostrato di essere in grado di caricare un condensatore per alimentare la trasmissione di un segnale radio. Con ulteriori ottimizzazioni si possono ottenere valori tali da poter alimentare dispositivi di trasmissione wireless.

## Capitolo 3

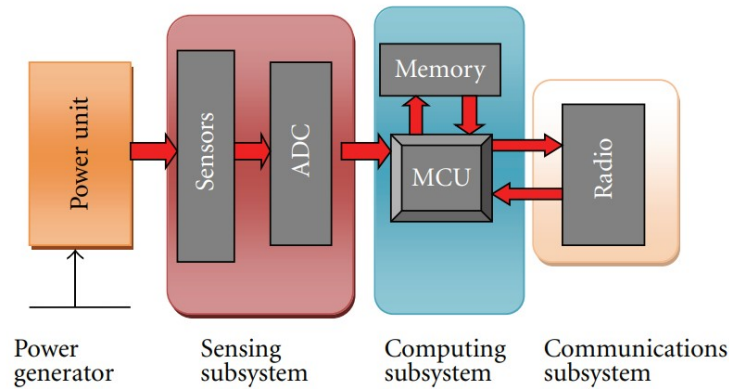
# ENERGIA PIEZOELETTRICA (VEH vibration energy harvester)

### 3.1 Panoramica generale

Come già esposto nei precedenti capitoli, la raccolta di energia è il modo più promettente per superare le sfide attualmente presentate da fonti di alimentazione a vita finita come le batterie. Il processo di raccolta di energia implica lo sfruttamento dell'energia dissipata nell'ambiente del dispositivo sensore, convertendola in energia elettrica utilizzabile. Al contrario delle batterie, la raccolta di energia presenta una potenziale fonte infinita di energia per alimentare dispositivi sensori wireless e in generale elettronica incorporata.

La raccolta di energia solare è una tecnologia abbastanza consolidata, ma non è la miglior scelta per i dispositivi mobili, impiantabili (dispositivi medici attivi) e incorporati nell'elettronica dove l'energia solare non è accessibile. L'energia meccanica sotto forma di vibrazioni ambientali offre una fonte di energia che è disponibile ampiamente e nella maggior parte delle situazioni interessate. I materiali piezoelettrici possono essere utilizzati per raccogliere questa energia poiché permettono di convertire l'energia di deformazione meccanica in energia elettrica utile. Dispositivi piezoelettrici per la raccolta di energia, sotto forma di generatori MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) o nanogeneratori, sono una fonte di energia alternativa affidabile per alimentare dispositivi sensori wireless. A differenza dei convenzionali generatori MEMS, i nanogeneratori hanno l'ulteriore vantaggio di essere fonti di alimentazione flessibili e pieghevoli, l'ideale per applicazioni come sensori biomedici impiantabili o indossabili [14] [15].

Le vibrazioni meccaniche presentano una densità di energia relativamente alta che potrebbe potenzialmente sovraperformare i sistemi basati sull'energia solare (questo in applicazioni interne o in aree nuvolose come edifici e terreni forestali, dove l'accesso diretto alla luce solare spesso non è disponibile o la fonte di energia solare potrebbe non essere una scelta adeguata). Inoltre, le vibrazioni sono una scelta attraente essendo una delle fonti più diffuse di energia, e rappresentando gran parte della categoria "meccanica" delle fonti di energia presenti nell'ambiente. Le vibrazioni meccaniche facilmente sfruttabili attraverso la tecnologia MEMS sono onnipresenti nelle applicazioni a livello di microscala. Ci sono tre principali meccanismi attraverso i quali le vibrazioni possono essere convertite in energia elettrica: elettromagnetici (visti nel precedente capitolo), elettrostatici e piezoelettrici. Tra questi, la conversione dell'energia attraverso le tecnologie piezoelettriche ha ricevuto molta attenzione, poiché possiede un alto accoppiamento meccanico, non richiede una fonte di



**Figura 3.1:** Nodo sensore e la sua struttura schematizzata in sottosezioni

tensione esterna ed è particolarmente attraente per l'uso in MEMS. Inoltre consente ad un dispositivo di essere autonomo, senza la necessità di un accumulo esterno di energia. Infine, i dispositivi piezoelettrici per la raccolta di energia hanno poche parti meccaniche in movimento e sono in grado di generare potenza con livelli di tensione che possono essere facilmente condizionati.

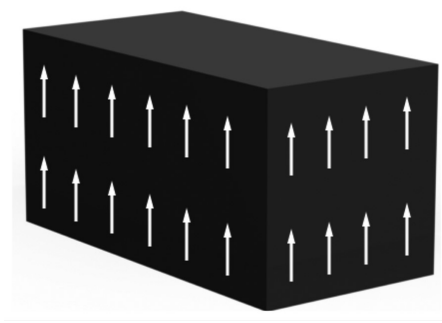
Questo capitolo si basa sull'articolo *Piezoelectric Energy Harvesting Devices: An Alternative Energy Source for Wireless Sensors* [16] che discute i progressi in microgenerazione e generazione di energia su scala nanometrica utilizzando materiali piezoelettrici per applicazioni con sensori a bassissima potenza.

## 3.2 Analisi teorica

Un nodo sensore wireless è progettato per eseguire l'operazione di sensing, di acquisizione dati, di elaborazione localizzata e comunicazione wireless ed è normalmente alimentato a batteria. Un generatore di potenza che estrae energia dall'ambiente del sensore può essere potenzialmente utilizzato per la ricarica della batteria o direttamente per l'alimentazione del nodo sensore. Un tipico schema del nodo sensore wireless è mostrato nella figura 3.1, suddiviso in sottosistemi con i propri requisiti di alimentazione. Questi sottosistemi mostrano essenzialmente la potenza consumata dagli elementi del nodo sensore, in base alla funzionalità e la figura 3.5 mostra il loro tipico consumo di potenza in percentuale [17].

### 3.2.1 Principio di trasduzione

L'effetto piezoelettrico converte la sollecitazione meccanica in corrente o tensione elettrica. Esso si basa sulla struttura fondamentale di un reticolo cristallino. Alcune strutture cristalline hanno un equilibrio di carica con polarizzazione negativa e positiva che nel complesso risultano neutre lungo un'asse. Quando questo equilibrio di carica viene perturbato da sollecitazioni esterne applicate sulla maglia del cristallo, l'energia viene trasferita da portatori di carica elettrica i quali generano una corrente che scorre nel cristallo. Viceversa, con l'effetto piezoelettrico un ingresso di carica esterno creerà uno squilibrio nello stato di carica neutra causando stress meccanico.



**Figura 3.2:** Struttura monocristallina.



**Figura 3.3:** Struttura policristallina

Vi è un'evidente connessione tra l'effetto piezoelettrico e la struttura (in particolare la simmetria) dei cristalli. L'effetto piezoelettrico si osserva nei cristalli senza centro di simmetria e la differenza può essere spiegata con strutture monocristalline e policristalline.

In una struttura monocristallina gli assi polari di tutti i portatori di carica presentano caratteristiche unidirezionali, come mostrato nella figura 3.2. Questi cristalli dimostrano simmetria: gli assi polari in tutto il cristallo giacciono nella stessa direzione anche se fosse diviso in pezzi.

Una struttura policristallina è invece caratterizzato da diverse regioni all'interno del materiale con differenti assi polari, come mostrato nella figura 3.3. È asimmetrico perché non esiste un punto in cui il cristallo potrebbe essere tagliato ottenendo due pezzi aventi i medesimi assi polari risultanti. Questo permette di ottenere polarità di carica inverse per compressione e trazione del materiale. È interessante notare che se applichiamo una tensione alternata al materiale policristallino, questo vibrerà con la stessa frequenza del segnale di ingresso.

La relazione più importante per questa tipologia di raccolta di energia è quella tra lo stress applicato, l'energia e la costante  $d$ . Nel caso statico la generazione di energia a circuito aperto è definita come:

$$D = d\sigma \quad (3.1)$$

dove  $D$  è la densità di carica e  $\sigma$  la sollecitazione meccanica applicata. Viceversa lo stesso coefficiente  $d$  indica anche la relazione tra la deformazione sviluppata ed il campo elettrico applicato. La costante  $d$  varia a seconda di come viene applicata la deformazione.

### 3.2.2 Materiali piezoelettrici

Quando una forza o una sollecitazione viene applicata a un materiale piezoelettrico, essa induce una carica elettrica attraverso il materiale. Questo è noto come effetto



**Tabella 3.1:** Caratteristiche dei moduli sensore.

| Sensore                  | Tensione<br>[V] | Corrente<br>[mA] | Potenza<br>[mW] | Tempo di campio-<br>namento [s] | Energia per cam-<br>pionamento [ $\mu J$ ] |
|--------------------------|-----------------|------------------|-----------------|---------------------------------|--|
| Temperatura              | 3.3             | 0.008            | 0.026           | 0.0002                          | 0.00528                                    |
| Luce                     | 3.3             | 0.03             | 0.099           | 0.0002                          | 0.0198                                     |
| Umidità                  | 3.3             | 0.3              | 0.99            | 0.8                             | 792  |
| Vibrazioni               | 3.3             | 0.6              | 1.98            | 0.02                            | 39.6                                       |
| Pressione<br>barometrica | 5.0             | 7.0              | 35.0            | 0.02                            | 0.7  |

piezoelettrico diretto. Al contrario, l'applicazione di una carica o di un campo elettrico allo stesso materiale comporterà un cambiamento di deformazione meccanica. Questo è noto come effetto piezoelettrico indiretto. Il primo tra questi due effetti viene impiegato nella raccolta di energia <sup>1</sup>. Ad oggi, la ceramica piezoelettrica più comunemente usata è la PZT, principalmente perché ha un'altissima capacità di accoppiamento elettromeccanico. Tuttavia, è un materiale estremamente fragile e questo presenta una limitazione alla resistenza a tensione. Il polivinilidenefluoruro (PVDF) è un altro polimero piezoelettrico comune. È più flessibile e può essere utilizzato nelle applicazioni di raccolta dell'energia [18].

### 3.2.3 Sottosistema di rilevamento

Il sottosistema di rilevamento dei nodi sensore consiste principalmente in una conversione da analogico a digitale (ADC) ossia è responsabile della conversione del fenomeno fisico di interesse in forma di segnale digitale. La potenza consumata nel sottosistema di rilevamento deriva dal campionamento del sensore, che include il tempo di risveglio e stabilizzazione associato al sensore e il tempo di acquisizione dati. In tutti gli altri istanti i sensori sono completamente spenti e non consumano energia. Il consumo energetico dell'ADC è tipicamente proporzionale alla quantità dei campioni acquisiti alla frequenza di campionamento (SR, sampling rate) utilizzata. Nella figura 3.4 si può vedere il consumo di corrente in un circuito di campionamento/conversione AD a 12 bit al variare della frequenza [19]. Con un ADC a bassa frequenza e sensori passivi, otteniamo un sistema di rivelamento tra quelli che consumano meno energia. Tuttavia, se la frequenza di campionamento dell'ADC richiede una potenza elevata e/o è necessario utilizzare sensori per una particolare applicazione, allora il consumo di energia del sottosistema di rilevamento può raggiungere i livelli del sottosistema di comunicazione. Alcune specifiche di consumo energetico per vari tipi di sensori utilizzati in un sistema di gestione degli edifici [20], sono mostrati nella tabella 3.1 per dare un'idea generale dell'ordine dell'energia richiesta.

### 3.2.4 Il sottosistema di elaborazione

Il sottosistema di elaborazione è composto da un'unità di elaborazione che si suddivide in un'unità microcontrollore (MCU) e l'elettronica di supporto. Questo sottosistema controlla tutte le attività del nodo sensore ed esegue alcune elaborazioni locali. Quando non elabora i dati e non controlla il funzionamento del sistema, il processore è in una modalità di sospensione a basso consumo. La tabella 3.2 mostra una panoramica dei requisiti di alimentazione di alcuni dei sistemi a microprocessore autonomi impiegati

<sup>1</sup>Esempi di ceramiche che mostrano l'effetto piezoelettrico sono piombo-zirconato-titanato (PZT), piombo-titanato (PbTiO<sub>2</sub>), piombo-zirconato (PbZrO<sub>3</sub>) e bario-titanato (BaTiO<sub>3</sub>).



| R <sub>2</sub> Value<br>(Ω) | Sample Rate   | Supply Current           |                       |
|-----------------------------|---------------|--------------------------|-----------------------|
|                             |               | Complete Circuit<br>(μA) | A/D converter<br>(μA) |
| 1M                          | 1Hz (approx.) | 50                       | 25                    |
| 91k                         | 90Hz          | 100                      | 40                    |
| 15k                         | 524Hz         | 335                      | 121                   |
| 9.1K                        | 840Hz         | 510                      | 180                   |
| 4.7k                        | 1500Hz        | 860                      | 297                   |

**Figura 3.4:** Valori di funzionamento di un circuito di campionamento/conversione AD a 12 bit

**Tabella 3.2:** Parametri del microprocessore.

| Microprocessore | Corrente fornita [mA] | Tensione fornita [V] | Frequenza di funzionamento [MHz] | Corrente in modalità di riposo, $I_{pd}$ [μA] |
|-----------------|-----------------------|----------------------|----------------------------------|---|
| C8051F930       | 4.25                  | 0.9                  | 25                               | 0.05  |
| PIC18F4620      | 16                    | 4.2                  | 40                               | 0.1   |
| MC9s08GT        | 6.5                   | 3                    | 16                               | 2.5   |
| AMTEGA 128L     | 5.5                   | 3                    | 4                                | <5  |
| MSP430CG4618    | 0.4                   | 2.2                  | 1                                | 0.35  |
| ML610Q431       | 0.65                  | 1.1                  | 4                                | 0.25  |

nelle tecnologie dei sensori wireless. L'energia richiesta dal sottosistema di calcolo per completare un'attività, ( $E_{elaborazione}$ ), è approssimata dall'equazione 3.2:

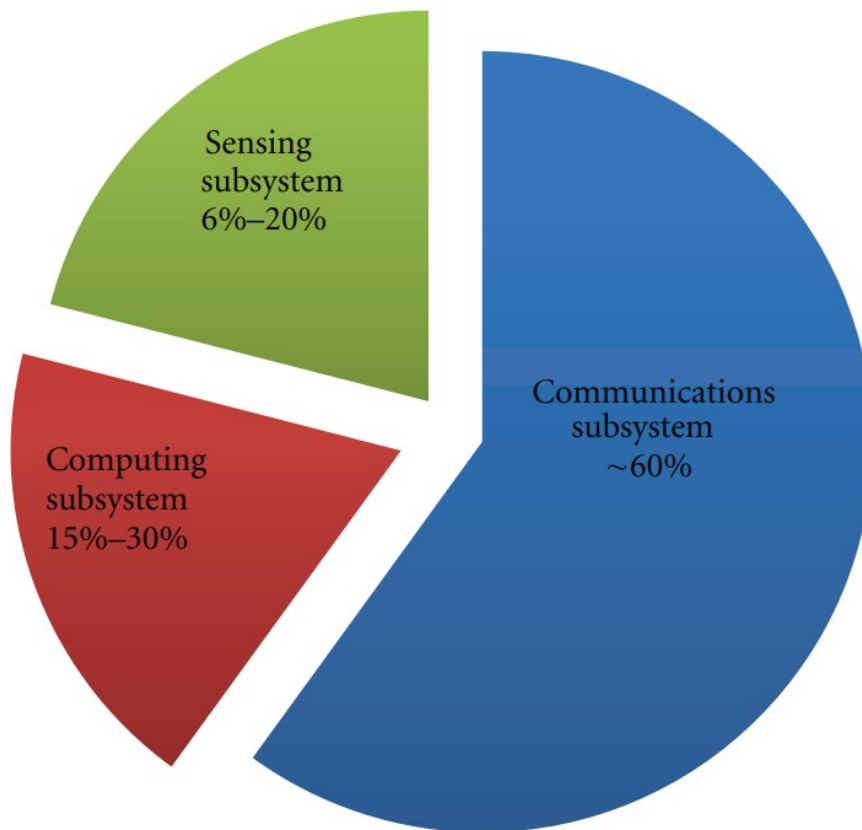
$$E_{elaborazione} = O(p) \gamma \left( \frac{f}{k} + \varepsilon \right) \quad (3.2)$$

dove  $O(p)$  è la complessità computazionale,  $f$  è la frequenza del processore,  $\gamma$  è la capacità di commutazione e  $\omega$  e  $k$  sono costanti specifiche dell'hardware.

### 3.2.5 Sottosistema di comunicazione

Il sottosistema di comunicazione comprende principalmente il ricetrasmittitore radio (RF, transceiver), gli amplificatori e l'elettronica associata. Il ricetrasmittitore consente al modulo wireless di comunicare e trasmettere i dati sensore del elaborati. Quando il ricetrasmittitore non sta trasmettendo o ricevendo, si trova in una modalità di sospensione a basso consumo. Come mostrato nella figura 3.3, il sottosistema di comunicazione (trasmissione, ricezione e ascolto) domina lo scarso budget energetico occupando il 60% del consumo di energia totale. Il suo consumo energetico è valutato da parametri come tensione di alimentazione, corrente di trasmissione, corrente ricevuta e corrente in modalità di spegnimento. L'energia consumata dal sottosistema di comunicazione, ( $E_{comunicazione}$ ) può essere stimata dall'equazione 3.3:

$$E_{comunicazione} = \frac{p_i B}{b} (F r^2 (2^b - 1) + G) \quad (3.3)$$



**Figura 3.5:** Consumo di potenza in un nodo sensore.

dove  $r$  è la distanza di trasmissione,  $p_i$  è il numero di bit da trasmettere durante l'evento di trasmissione  $i$ ,  $B$  è la risoluzione di campionamento in bit per campione,  $b$  è l'impostazione di modulazione per il trasmettitore,  $F$  e  $G$  sono costanti specifiche dell'hardware.

La tabella 3.3 mostra le specifiche di consumo energetico di alcuni moduli RF. Tra quelli elencati, il modulo RF CC2420 ha la potenza più bassa in termini di corrente nelle diverse modalità di funzionamento e di tensione di alimentazione. Allo stesso modo, il consumo di energia del modulo RF CC2420 può essere quotato a  $36,5mW$  in modalità di trasmissione,  $41,4mW$  in modalità di ricezione,  $41,4mW$  in modalità inattiva e  $42\mu W$  in modalità sospensione. La modalità inattiva consuma quasi la stessa potenza della modalità di trasmissione e quindi accendere la radio in modalità di sospensione è una tecnica critica per il risparmio energetico.

La famiglia di microcontrollori MSP430 di Texas Instruments [21] rappresenta una scelta competitiva a bassissima potenza per un tipico sottosistema di elaborazione di un nodo di sensori wireless. Consuma  $2mA$  a  $8MHz$  e  $3,0V$  e pochi  $\mu A$  di corrente in modalità di sospensione a basso consumo. Questo corrisponde a un consumo energetico di circa  $750pJ$  per istruzione. Pertanto, una corrente superiore a  $30mA$  e a una tensione di alimentazione di almeno  $3V$  è sufficiente per supportare la routine lavoro di un tipico nodo di sensori wireless. Il consumo di energia può essere ridotto al minimo ottimizzando la quantità di tempo trascorso in modalità di sospensione a basso consumo e riducendo il tempo in modalità attiva. Ovvero, i nodi del sensore wireless trascorrono la maggior parte del loro tempo in modalità di riposo. L'unica parte del sistema che rimane sveglia è l'orologio in

**Tabella 3.3:** Parametri del microprocessore [58].

| Modulo RF   | V [V]   | Corrente in modalità di ricezione, $I_{RX}$ [mA] | Corrente di modalità di trasmissione, $I_{TX}$ [mA] | Corrente in modalità di riposo, $I_{pd}$ [ $\mu A$ ] |
|-------------|---------|--|---|--|
| CC2420      | 2.1~3.6 | 18.8   | 17.4  | 0.9  |
| MC13192     | 2.0~3.4 | 42   | 35  | 1  |
| UZ2400      | 2.7~3.6 | 18   | 22  | 2  |
| xBee        | 2.8~3.4 | 50   | 45  | <10  |
| xBee-PRO    | 2.8~3.4 | 55   | 270   | <10  |
| NanoPAN5360 | 2.8~3.6 | 35   | 78  | 1.5  |
| NanoPAN5361 | 2.8~3.6 | 35   | 78  | 1.5  |

tempo reale (RTC, Real Time Clock) necessario per tenere traccia del tempo e risvegliare il sensore wireless per la misura dell'input. Un nucleo di elaborazione veloce permette al microprocessore di eseguire l'algoritmo di controllo molto rapidamente, consentendo un rapido ritorno alla modalità di sospensione a basso consumo e quindi riducendo al minimo il consumo di energia. Con un'ottimale gestione del controllo dell'alimentazione, un sensore wireless ideale ha un consumo energetico di circa  $100\mu W$ .

### 3.3 Approccio pratico

#### 3.3.1 Sistema generatore MEMES piezoelettrico

Vi sono vari tipi di generatori piezoelettrici che si differenziano per strutture, materiali e dimensioni [22]:

- Trave a sbalzo (Cantilever type)
- Tipo piatto (Cymbal type)
- Tipo sovrapposto (Stack type)
- Tipo guscio (Shell type)

La struttura piú semplice e piú diffusa é quella a trave a sbalzo.

Una massa è sospesa da una trave a sbalzo su cui poggia uno strato piezoelettrico. Quando la massa vibra, la leva piezoelettrica viene deformata meccanicamente e si genera una tensione. I sistemi di raccolta dell'energia piú comuni sono strutture a sbalzo progettate per funzionare alle loro frequenze di risonanza [23]. Tali strutture sono popolari perché consentono livelli di sollecitazione relativamente elevati sul materiale piezoelettrico, riducendo al minimo le dimensioni del dispositivo. La figura 3.6 rappresenta un sistema di questa tipologia (simile in certi versi al sistema presentato nel precedente capitolo) composto da un cerotto piezoelettrico legato alla superficie della trave a sbalzo che viene sottoposta a uno stato di deformazione alternata. Quando il fascio è eccitato da vibrazioni meccaniche nella struttura ospite, una tensione viene indotta nel materiale piezoelettrico generando una tensione alternata (AC) tra gli elettrodi. La tensione AC viene quindi successivamente condizionata per ottenere gli adeguati valori di energia compatibili con il carico specifico.

Un metodo semplice per aumentare l'energia prodotta dal generatore é quello di utilizzare un sistema a due strati come quello mostrato in figura 3.7. In questi meccanismi

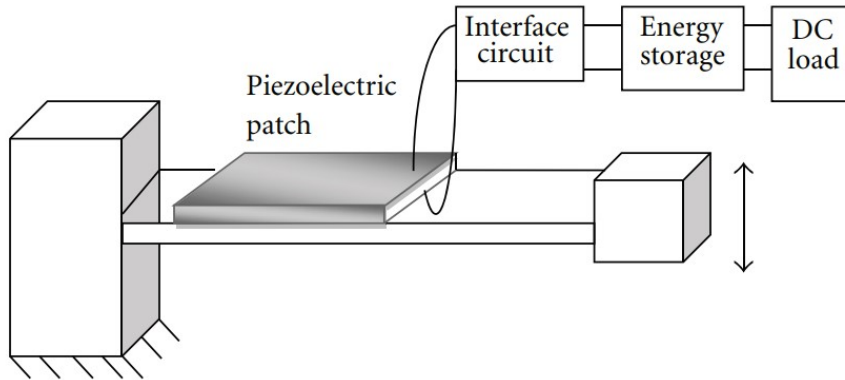


Figura 3.6: Struttura tipica del generatore piezoelettrico.

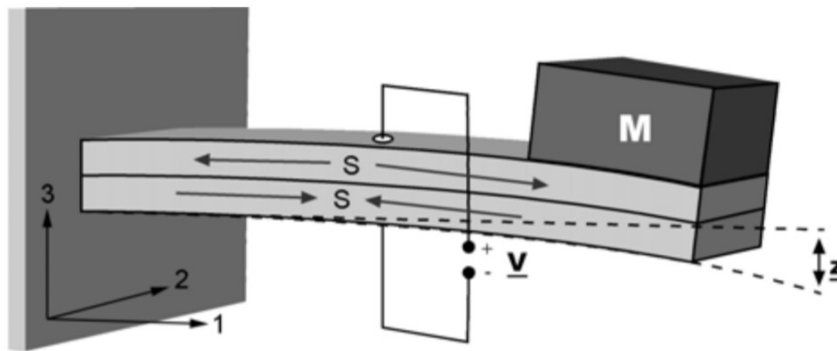


Figura 3.7: Generatore a trave a sbalzo costituito da due strati.

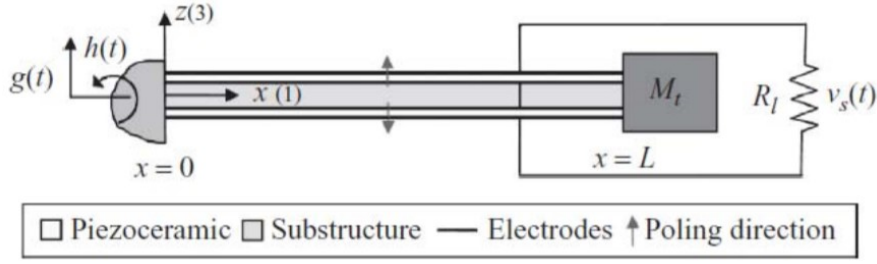
la trave é composta da due strati di materiale. Al momento della sollecitazione uno di questi si troverà in uno stato di compressione mentre il secondo si troverà in uno stato di trazione.

Gli strati piezoelettrici hanno una polarità rivolta nella direzione dello spessore come indicato nella figura 3.8, dove é illustrato anche un circuito equivalente della struttura meccanica.

### 3.3.2 Raccolta di energia e funzionamento nodo sensore

Le vibrazioni meccaniche presenti nell'ambiente vengono raccolte e convertite in energia elettrica utile che viene immagazzinata in un elemento di stoccaggio o fornita direttamente al carico. Il dispositivo di conservazione è un elemento chiave del sistema di raccolta dell'energia, perché rappresenta un ponte di stabilità tra la fonte di energia e il carico che fornisce un flusso di energia costante da una fonte ambientale altrimenti variabile. I circuiti di interfaccia di alimentazione condizionano l'energia raccolta per consentire la ricarica dei supercondensatori ed inoltre permettono la compatibilità con i requisiti di carico. Per un nodo sensore completamente alimentato dall'energia dissipata che lo circonda, la potenza media generata ( $\bar{P}_g$ ) deve essere maggiore o uguale alla potenza media consumata ( $\bar{P}_c$ ):

$$\bar{P}_g \geq \bar{P}_c \quad (3.4)$$



**Figura 3.8:** Circuito equivalente

L'energia consumata da un nodo sensore wireless è in genere da poche decine a centinaia di  $mW$ . Rispetto alla potenza erogata dai sistemi di raccolta piezoelettrici MEMS, che hanno un intervallo da un  $mW$  a decine di  $mW$  [24], risulta evidente che il dispositivo non è in grado di alimentare continuamente il nodo del sensore. La domanda quindi resta come ridurre il consumo energetico del nodo del sensore wireless in modo che la raccolta dell'energia possa gestire i requisiti di alimentazione. La risposta viene fornita dal duty cycle, che consente al sensore di operare in regime intermittente invece che in forma continua. Nell'approccio duty cycling, i nodi dei sensori wireless sono progettati per funzionare in un duty cycle ( $D$ ) molto basso, con un consumo energetico moderato in modalità attiva ( $\bar{P}_{attivo}$ ) e un consumo energetico molto basso mentre sono in modalità di riposo, ovvero in quella di inattività, ( $\bar{P}_{riposo}$ ). Il funzionamento intermittente del nodo sensore è progettato in modo tale che il processo di monitoraggio della rete del sensore wireless non sia compromesso. La potenza media consumata dal nodo del sensore è data dall'equazione 3.5

$$\bar{P}_c = \bar{P}_{riposo} + D\bar{P}_{attivo} \quad (3.5)$$

Da 3.4 e 3.5 si può osservare che se il duty cycle diminuisce, il nodo del sensore viene messo in modalità di sospensione per la maggior parte del tempo e viene attivato per eseguire il rilevamento e la comunicazione quando necessario. Ciò si traduce in una grande riduzione del consumo energetico medio del nodo del sensore wireless. Pertanto, per un dato requisito applicativo e caratteristico della fonte di raccolta dell'energia, un'attenta scelta del ciclo di lavoro appropriato è fondamentale nella progettazione di algoritmi di gestione della potenza. La fonte di energia presente nell'ambiente come le vibrazioni è di natura variabile e ci sono momenti e situazioni in cui  $\bar{P}_g < \bar{P}_c$ . Per affrontare tale situazione, è necessario un elemento di stoccaggio di energia come un supercondensatore (esposto nei precedenti capitoli) o in alternativa una batteria. Per qualsiasi lungo periodo di tempo arbitrario,  $T$ , un elemento di stoccaggio a lungo termine ( $E_{raccolta}$ ) deve essere progettato per soddisfare le condizioni di 3.6

$$E_{raccolta} \geq \max \int (\bar{P}_c - \bar{P}_g) dt \quad (3.6)$$

Poiché le reti WSN (Wireless Sensor Node) funzionano con un budget energetico limitato, sono necessarie unità di microcontrollori a bassissima potenza (MCUs, ultralow power microcontroller units) per la lavorazione e la gestione dell'alimentazione. Un MCU tipico come gli strumenti del Texas MSP430 è ideale per la raccolta di energia poiché ha una corrente di standby inferiore a  $1\mu A$  e una corrente attiva di  $160\mu A/MHz$ , un tempo di riattivazione inferiore a  $1\mu s$ , e funziona nell'intervallo da 1,8V a 3,6V [21].

### 3.3.3 Duty Cycle e tecniche di gestione dell'alimentazione avanzate

Come visto nelle precedenti sezioni, la maggior parte dei sistemi di servizi integrati supporta le modalità di riposo, rendendo l'approccio diretto al duty cycle una scelta attraente per la gestione dell'energia. Questa implementazione diretta della tecnica del duty cycling, sebbene popolare nella raccolta di energia per le reti di sensori wireless, non è sempre la scelta migliore. Oltre ad essere un approccio troppo semplicistico, un  $D$  fisso implica che se la fonte di energia fornisce più energia di quella consumata, il sistema spreca energia in eccesso una volta che il serbatoio di stoccaggio è completamente carico. Per superare alcune di queste sfide, sono state proposte tecniche avanzate di gestione dell'alimentazione con specifiche hardware rigorose. Queste tecniche sono il Dynamic Voltage Scaling (DVS), il Dynamic Frequency Scaling (DFS) e una combinazione di tra i due.

Il principio di funzionamento della tecnica DVS consiste nell'aumento della tensione di un circuito che permette un passaggio più veloce da una modalità all'altra, ma con un aumento del consumo di energia: viceversa la diminuzione della tensione del circuito fa sì che questo abbia un basso tempo di commutazione con una conseguente diminuzione del consumo di energia. Un fenomeno simile si osserva quando la frequenza di clock è aumentata o diminuita, che è la premessa di base della tecnica DFS. A differenza del sistema più semplice che va a influire sul duty cycle, in cui tutte le attività si fermano durante la modalità di sospensione, le tecniche avanzate di gestione dell'alimentazione consentono al sistema di continuare a funzionare a un ritmo più basso e con un consumo energetico ridotto, senza compromettere l'esecuzione di compiti importanti. Oltre a DVS, DFS e duty cycling, anche la tecnica MPPT (Maximum Power Point Tracking) può essere applicata al sistema di raccolta dell'energia. Nella tecnica MPPT, l'obiettivo è quello di trasferire la massima potenza al carico. Questa tecnica è tradizionalmente utilizzata nei sistemi solari che hanno una caratteristica dinamica tensione-corrente, in cui il carico ottimale per la potenza massima dipende dal punto di funzionamento. Richiede inoltre un monitoraggio costante dell'energia in entrata, per determinare il punto di funzionamento ottimale e un carico adattivo.

### 3.3.4 Materiali di realizzazione

Le prestazioni di un sistema piezoelettrico di raccolta dell'energia dipendono principalmente dalle proprietà piezoelettriche utilizzate per fabbricare i suoi componenti. Generalmente, i materiali piezoelettrici a film sottile mostrano migliori proprietà piezoelettriche rispetto a quelli sfusi. L'uso di monocristallini e nanomateriali permette, in linea di principio, di aumentare la densità di potenza e l'efficienza di conversione dell'energia, da qui l'avanzamento della miniaturizzazione del dispositivo mantenendo una ragionevole potenza erogata.

### 3.3.5 Problemi di alimentazione e gestione dell'alimentazione

La progettazione di generatori di micropotenza piezoelettrici è di per sé un'area multidisciplinare con sfide basate sulla fisica fondamentale, la scienza dei materiali, l'ingegneria meccanica e l'ingegneria elettrica. Diversi ricercatori di diverse discipline hanno riportato varie ricerche nel settore della raccolta di energia piezoelettrica. L'approccio multidisciplinare e un paradigma olistico sono forse il modo più promettente per progettare un dispositivo piezoelettrico per la raccolta dell'energia. È ancora necessario migliorare la potenza dei generatori piezoelettrici per soddisfare i requisiti dei dispositivi di sensori wireless. Questa sfida può essere affrontata utilizzando materiale con le migliori proprietà piezoelettriche, le migliori geometrie del dispositivo e la migliore elettronica di potenza

per condizionare e gestire l'output. Ciò richiede probabilmente un regime olistico di progettazione e ottimizzazione, insieme a uno standard internazionale stabilito per la raccolta dell'energia piezoelettrica.

### 3.4 Conclusioni

È stata presentata la raccolta di energia da vibrazioni utilizzando generatori piezoelettrici, in particolare il suo potenziale come fonte di energia alternativa per i dispositivi di sensori wireless. La maturità della raccolta di energia piezoelettrica come tecnologia ha portato ad una efficienza dal punto di energetico tale da eliminare la necessità delle batterie. Con l'avanzamento delle unità di microcontrollore wireless a consumo di potenza, il consumo energetico dei nodi del sensore si sta abbassando, e quindi l'energia dissipata nell'ambiente circostante può essere raccolta risultando sufficiente per l'alimentazione di piccoli dispositivi. La raccolta di energia utilizzando generatori piezoelettrici è un'interessante approccio in grado di fornire autonomia energetica a dispositivi di sensori wireless.





## Capitolo 4

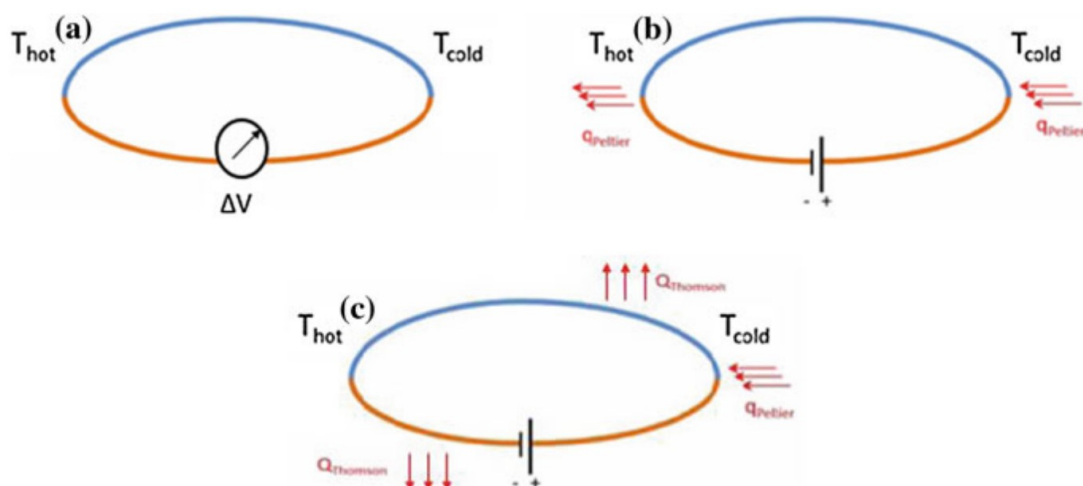
# ENERGIA TERMOELETTRICA

### 4.1 Panoramica generale

Relativamente alle precedenti fonti di energia sorge un problema: la luce e le vibrazioni in particolari situazioni sono fonti disponibili in maniera intermittente. Nelle medesime situazioni l'energia termoelettrica può essere disponibile per tempi più prolungati. I trasduttori termoelettrici trasformano in modo efficiente l'energia termica in energia elettrica. Questi trasduttori offrono i seguenti vantaggi:

- alta affidabilità
- piccole dimensioni
- basso costo
- peso contenuto
- lunga durata
- sicurezza intrinseca per ambienti elettrici pericolosi
- controllo preciso della temperatura
- conversione diretta DC con l'aiuto del modulo TE (TermoElettrici)
- rara manutenzione
- rispetto dell'ambiente grazie alla mancanza di gas refrigeranti

Quindi il modo più semplice per raccogliere tale energia di scarto è con l'aiuto di trasduttori termoelettrici. La raccolta di energia termoelettrica viene utilizzata nelle pompe termoelettriche che sono in grado di refrigerare oggetti solidi o fluidi. Questi moduli sono in grado di aumentare o ridurre le temperature, e sono tipicamente utilizzati in condizionatori d'aria domestici e frigoriferi. Una delle caratteristiche più importanti è la facilità con cui i moduli TE possono essere precisamente controllati dal punto di vista termico, il che è un vantaggio notevole per le applicazioni scientifiche, militari e aerospaziali. Sono utilizzati anche nelle terme oceaniche, nei motori a vapore, nei sensori wireless, nei motori industriali, nelle fonti biologiche, ecc. Una delle loro applicazioni tipiche è la generazione termoelettrica solare per produrre elettricità. Allo stesso modo, possono essere utilizzati anche nella ricarica per applicazioni in tempo reale. La termoelettrica comporta la conversione diretta dell'energia termica in un potenziale elettrico e viceversa;



**Figura 4.1:** Effetto Seebeck (a), effetto Peltier (b), ed effetto Thomson (c).

gli effetti termoelettrici sono gli effetti causati da questa conversione. La conversione termoelettrica avviene per tre effetti termodinamicamente reversibili, vale a dire, **effetto Seebeck**, **effetto Peltier** e l'effetto Thomson<sup>1</sup>. In questo capitolo ci concentreremo sui primi due, che sono uno l'opposto dell'altro [25].

Le seguenti analisi si basano sullo studio di moduli termoelettrici nel campo dell'energy harvesting: Efficient Energy Harvesting Using Thermoelectric Module [26].

## 4.2 Analisi teorica

### 4.2.1 Effetto Seebeck-Peltier

Quando viene applicata una differenza di temperatura  $\Delta T$  ad un modulo TE, si verifica una differenza di potenziale elettrico  $\Delta V$  in un materiale conduttivo. Questo è chiamato **effetto Seebeck**. Matematicamente questo effetto è dato da

$$\Delta V = S \cdot \Delta T \quad (4.1)$$

dove  $S$  è il coefficiente Seebeck. In pratica, se due fili elettrici sono collegati a due estremità e viene imposta una differenza di temperatura tra le due giunzioni, si osserva un aumento della tensione nel circuito. Quando si misura la tensione al suo interno, si ottiene il potenziale elettrico come mostrato in figura 4.1a.

Quando viene applicata corrente elettrica ad un modulo TE, si verifica un flusso di calore su entrambi i lati. Questo è chiamato **effetto Peltier**. Il flusso di calore generato  $q_{Peltier}$  è direttamente proporzionale alla corrente elettrica  $J$  in un circuito elettrico. Matematicamente questo effetto è dato da

$$q_{Peltier} = -P \cdot J \quad (4.2)$$

<sup>1</sup>L'effetto Thomson è un effetto termoelettrico che riguarda un conduttore omogeneo con le estremità a temperatura diversa ( $T_1$  e  $T_2$ ) percorso da corrente elettrica. Si ha cessione o assorbimento di calore a seconda che i versi della corrente e del flusso termico siano coincidenti o opposti, tale effetto è stato osservato nel 1851.

dove  $P$  è il coefficiente Peltier. Il segno negativo indica il cambiamento nelle polarità del potenziale elettrico. In pratica, se colleghiamo due fili e applichiamo una differenza di potenziale nel circuito che produce una corrente elettrica, otteniamo flusso di calore, positivo e negativo, che entra e esce dalle giunzioni. Come mostrato nella figura 4.1b, le polarità vengono invertite.

### 4.2.2 Modulo TE

Le termocoppie sono le unità di base del modulo Termoelettrico (TE). Una termocoppia correttamente calibrata è un sensore di temperatura che può convertire il gradiente di temperatura in gradiente di potenziale quando viene applicata la differenza  $\Delta T$ . Inoltre, può anche convertire il gradiente potenziale in gradiente di temperatura quando la differenza  $\Delta V$  viene applicata tra le giunzioni in rame. Le termocoppie sono realizzate con materiali termoelettrici, leghe di semiconduttori come Bismuto-Tellururo (Bi-Te), Silicio-Germanio (Si-Ge) e Bismuto-Antimonio (Bi-Sb) [27]. Tra questi, il materiale Bismuto-Tellururo ( $Bi_2Te_3$ ) lavora all'interno di un intervallo di temperatura che risulta applicabile nella maggior parte delle applicazioni elettroniche.  $Bi_2Te_3$  è la soluzione migliore rispetto ad altri materiali perché produrrà più potenza a una temperatura inferiore. Con l'aumentare della temperatura, altre leghe sono preferite per la creazione di moduli TE. I materiali termoelettrici sono pesantemente drogati per fornire singole unità o coppie che hanno caratteristiche n e p distinte, rispettivamente con carenza ed eccesso di elettroni. Entrambi i moduli termoelettrici, refrigeratori termoelettrici (TEC, Thermoelectric Cooler) e generatori termoelettrici (TEG, Thermoelectric Generator), sono costituiti da numerose termocoppie, collegate elettricamente in serie e termicamente in parallelo, come mostrato nella figura 4.3. Il collegamento in serie permette l'aumento della tensione e della potenza di uscita, mentre il collegamento in parallelo permette il flusso di calore da un lato all'altro. Questa struttura è inserita tra due piastre in ceramica. Un materiale isolante di riempimento viene inserito in tutti i TEC, ma non in tutti i TEG; inoltre le termocoppie nei TEC sono più alte e sottili di quelle dei TEG [28].

In generale le dimensioni degli elementi sono maggiori nei TEG perché si riferiscono a un flusso di calore più grande attraverso il dispositivo e forniscono una maggiore potenza.

Nei TEC le termocoppie sono più alte a causa del materiale di riempimento isolante, quindi gli effetti di contatto sono trascurabili, permettendo di raggiungere la massima cifra di merito e lavorare con efficienza. Lo spessore nei TEG è controllato in quanto può influenzare la potenza del sistema completo, mentre nei TEC lo spessore non è preciso. Nello strumento di simulazione multifisica Comsol, è stata verificata la presenza di applicazioni degli effetti termoelettrici. Quindi viene creata un'applicazione del modulo TEC con dimensioni  $7\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 2,5\text{ mm}$  [27]. La simulazione viene eseguita a una temperatura superiore a  $79,85\text{C}$  (353 K). L'effetto di temperatura prodotto in questa simulazione è mostrato nel figura 4.2.

Nella produzione dei moduli TE, anche i materiali che li avvolgono e quelli dei conduttori sono importanti. Le piastre in ceramica sono utilizzate per circondare entrambi i moduli perché hanno un'eccellente resistenza all'usura. Per misurare la corrente elettrica, vengono utilizzati due terminali costituiti da conduttori, e per isolarne i fili vengono utilizzati materiali in Teflon e PVC rispettivamente in TEG e TEC (il Teflon funziona in modo più efficiente rispetto al PVC a temperature più elevate). L'ultima e principale caratteristica di questi moduli è che il materiale utilizzato sul lato freddo deve avere un'elevata conduttività termica e un basso coefficiente di espansione termica [29].

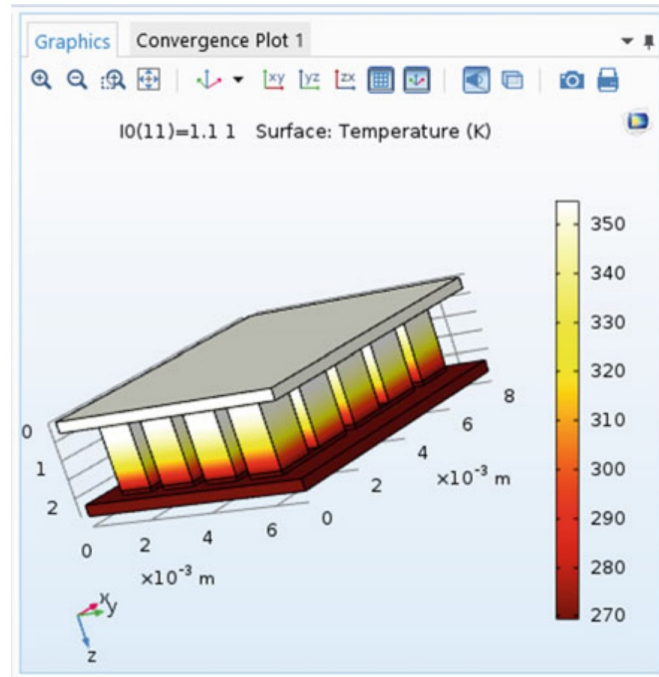


Figura 4.2: Effetto della temperatura nel modulo TEC.

#### 4.2.3 Analisi teorica del modello

Le caratteristiche di qualsiasi modulo termoelettrico includono la resistenza elettrica  $\rho$ , la conduttività termica  $k$  e il coefficiente Seebeck  $S$  che influisce sulle sue prestazioni. Di conseguenza, la cifra di merito per la temperatura  $T$  alla quale viene mantenuto il materiale è definita matematicamente come

$$ZT = \frac{S^2 T}{\rho k} \quad (4.3)$$

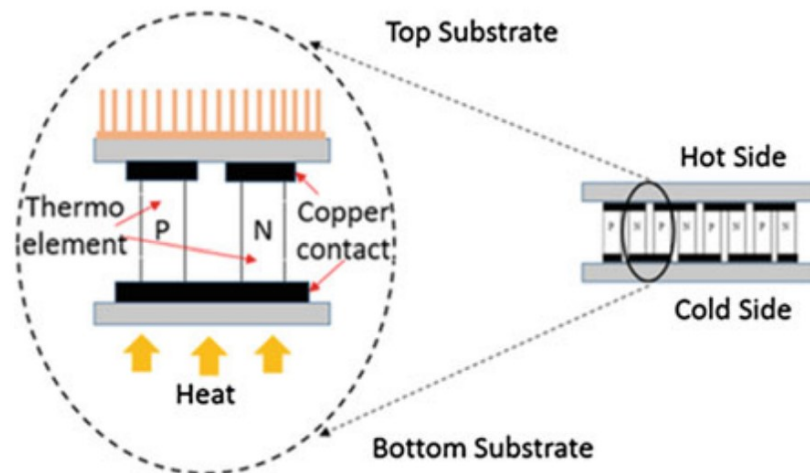
La figura di merito viene utilizzata sia per i parametri determinanti che per i materiali termoelettrici. In entrambi i casi, vengono fornite le stesse condizioni del materiale termoelettrico, e quindi è identico per i due dispositivi diversi nella stessa gamma di temperatura. Coefficiente di prestazioni è definito matematicamente come

$$\Phi_{MAX} = \frac{T_h \left( \sqrt{1 + ZT} - \frac{T_c}{T_h} \right)}{(T_c - T_h) (\sqrt{1 + ZT} + 1)} \quad (4.4)$$

dove  $T_c$  e  $T_h$  sono temperature rispettivamente ai lati freddi e caldi. Il coefficiente di prestazioni del modulo termoelettrico svolge un ruolo molto importante nella selezione di quest'ultimo.

### 4.3 Analisi sperimentale

I TEG sono progettati per funzionare con alti gradienti ad temperatura che vanno da decine a centinaia di °C. I TEC riescono a raggiungere la loro massima efficienza su gradienti a bassa temperatura, in quanto il loro obiettivo principale è quello di dissipare il calore nell'atmosfera. Un altro vantaggio è che i TEC sono più facili da reperire in commercio rispetto ai TEG. Quindi, per lavorare a temperature più basse, i TEG possono essere



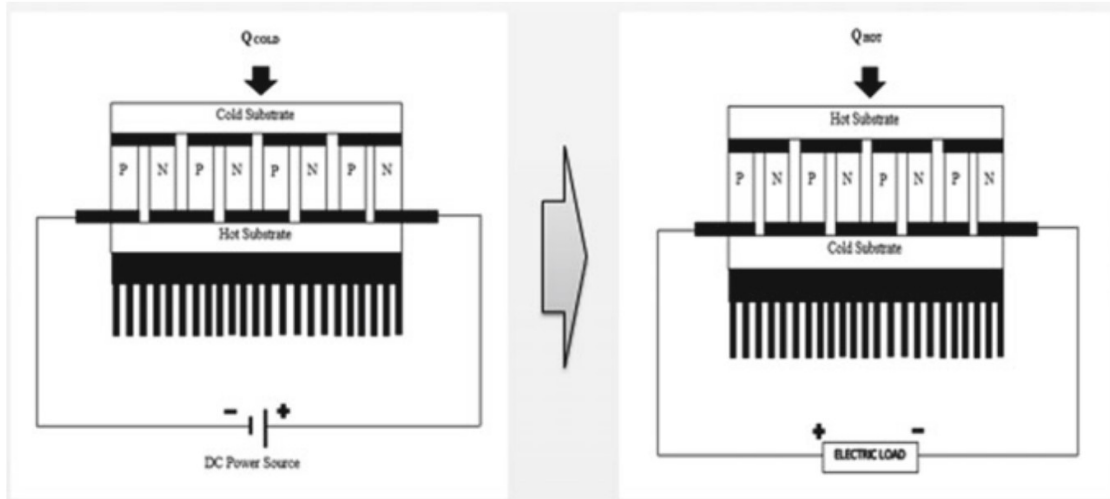
**Figura 4.3:** Struttura interna del modulo TE.

sostituiti dai TEC. Come esposto in precedenza, TEG e TEC lavorano rispettivamente sugli effetti Seebeck e Peltier che, poiché sono reversibili, sono combinabili. Tutti i materiali hanno coefficienti Seebeck, ma in molti di questi i coefficienti non sono costanti al variare della temperatura. Con il suo aumento, aumenterà anche il coefficiente che porterà a una diminuzione delle prestazioni del sistema a intervalli di temperatura più bassi. Se una corrente è guidata dal gradiente di temperatura, si osserva un effetto Peltier continuo che genera un flusso di calore. Di conseguenza, entrambi gli effetti Seebeck e Peltier appaiono insieme. In questo modo, un TEG potrebbe potenzialmente funzionare come TEC e viceversa. Matematicamente, entrambi questi coefficienti sono correlati da

$$P = S \cdot T \quad (4.5)$$

Quando applichiamo la differenza di temperatura tra entrambi i lati del modulo TEG, otteniamo potenziale elettrico attraverso i fili. Quando invece applichiamo la corrente elettrica attraverso i fili del modulo TEC, il flusso di calore si osserva ai lati del modulo in direzioni contraria, cioè, il lato freddo del TEG diventa il lato caldo del TEC e il lato caldo del TEG diventa il lato freddo del TEC. Quindi, per combinare questi due effetti, dobbiamo sostituire TEC invece di TEG in direzione inversa. Quando applichiamo una differenza di temperatura tra le piastre, si osserva un potenziale elettrico attraverso il carico, come mostrato nella figura 4.4. Poiché i moduli TEC funzionano a temperature più basse è necessario fare attenzione: dato che sono progettati per il raffreddamento, devono essere azionati al di sotto dei 100 °C al fine di mantenere costanti le prestazioni ed evitare la rottura del componente in conseguenza dello shock termico. La temperatura massima sostenibile è sempre data nelle schede tecniche del modulo, pertanto per la generazione di energia a temperature inferiori a 100 °C è possibile utilizzare i TEC al posto dei TEG<sup>2</sup>. Il modulo scelto per l'esperienza sopporta una tensione massima di circa a 16,4 V e una temperatura massima di 125 °C. Un'area di un centimetro quadrato del materiale può produrre fino a 30 μW di potenza. Un dispositivo termoelettrico posto sui corpi caldi genererà energia finché la temperatura ambiente sarà inferiore a quella del corpo. L'energia termica dissipata da oggetti quotidiani come una sacca di acqua calda, un cuscinetto termico elettrico, acqua bollente e corpo umano viene convertita in potenziale elettrico

<sup>2</sup>Modulo TEC1-12706, prodotto da Hebei I.T. (Shanghai) Co., Ltd. con 127 termocoppie



**Figura 4.4:** Utilizzo dei TEC e TEG per la raccolta di energia.

**Tabella 4.1:** Tensioni di output moduli TEC.

| Sorgente di calore dissipato | Tensione prodotta dal TEC |
|------------------------------|---------------------------|
| Sacca calda                  | 145                       |
| Cuscinetto termico elettrico | 205                       |
| Acqua in ebollizione         | 334                       |
| Calore umano                 | 96                        |

DC con l'aiuto di questo modulo. Per esempio il potenziale generato utilizzando la sacca di acqua calda è di  $145 \text{ mV}$ . I potenziali elettrici generati sono riportati nella 4.1.

#### 4.4 Circuito di conversione

Per alimentare applicazioni in tempo reale, dobbiamo elevare questi potenziali. Poiché sono state ottenute tensioni tra  $20$  e  $400 \text{ mV}$ , il modulo LTC 3108 è più adatto per questa applicazione. Questo circuito integrato opera da ingressi di  $20 \text{ mV}$  e utilizza trasformatori step-up compatti per raccogliere la potenza del sistema. Ha tensioni di uscita selezionabili di  $2.35$ ,  $3.3$ ,  $4.1$  e  $5 \text{ V}$  che possono essere ottenute combinando i pin  $V_{s1}$  e  $V_{s2}$  con i pin  $V_{LDO}$  e  $V_{AUX}$ . LTC 3108 viene utilizzato nelle applicazioni a bassa potenza in cui la raccolta di energia viene sfruttata per generare tensione per il sistema, in quanto la potenza della batteria è scomoda per molte delle applicazioni [30]. Può anche essere utilizzato per caricare un supercondensatore (come visto nel capitolo 1) o una batteria ricaricabile, utilizzando l'energia raccolta da una cella Peltier.

Nella simulazione LTspice mostrata nella figura 4.5, è stato applicato come potenziale di ingresso  $145 \text{ mV}$  ottenuto dalla sacca di acqua calda, con resistenza al modulo TEC come  $1,98 \Omega$ . Il trasformatore 1:20 viene scelto in quanto è più efficiente dei trasformatori 1:50 e 1:100. L'uscita è stata selezionata come  $5 \text{ V}$  unendo i pin  $V_{s1}$  e  $V_{s2}$  al pin  $V_{AUX}$  e un condensatore di  $10 \mu\text{F}$  viene utilizzato all'uscita per mantenere costante la carica. L'output in questa simulazione è mostrato in figura 4.6. La linea verde dà il potenziale di uscita di  $5 \text{ V}$  che può essere utilizzata per caricare i telefoni cellulari utilizzando una presa USB.

Per modificare la tensione di uscita da  $5 \text{ V}$  a tensione richiesta, è necessario un

**Tabella 4.2:** Tensioni finali ottenute.

| Circuito utilizzato   | Tensione finale ottenuta |
|---|--------------------------|
| LTC 3108 energy harvesting circuit                                      | 5 V                      |
| LTC 3108 energy harvesting circuit<br>with buck-boost converter circuit | -12 V , +12 V            |

convertitore DC-DC in grado di gestire la tensione di uscita maggiore o minore della tensione di ingresso. Ne sono state scelte due tipologie: convertitore buck e convertitore boost che possono entrambi produrre una gamma di tensioni di uscita inferiori o superiori alle tensioni di ingresso. Sono gestiti principalmente da impulsi di commutazione che si possono generare utilizzando transistor npn o pnp. È stato usato un alimentatore con una configurazione a impulsi specifica. Il circuito di simulazione in LTspice IV aggiunge il circuito di raccolta dell'energia LTC 3108 e la configurazione buck-boost come mostrato in figura 4.7. Le tensioni scelte sono di -12 e +12 V perché la maggior parte delle applicazioni viene alimentata a questi livelli di tensione, e sono positive e negative perché qualsiasi circuito digitale elettronico o sistema integrato opera su di esse. Le uscite per la simulazione del circuito di raccolta e del circuito buck-boost sono come mostrato in figura 4.8, dove le linee blu e verde danno rispettivamente i potenziali da +12 V (boosted) e -12 V (Bucked). Applicando una qualsiasi delle tensioni di uscita della tabella 4.1, è possibile ottenere diverse tensioni di uscita dal circuito di raccolta LTC 3108 e dal circuito di conversione DC-DC buck-boost. Le tensioni di uscita della simulazione sono riassunte nella tabella 4.2.

## 4.5 Conclusione

L'elaborato si concentra principalmente sulla conversione del calore di scarto in potenziale elettrico utilizzando un modulo TEC e combinando gli effetti Seebeck e Peltier. La conversione del calore di scarto da oggetti comuni in potenziale elettrico è nell'intervallo di 20-440 mV. Un potenziale elettrico così piccolo è notevolmente intensificato con l'uso di un trasformatore 1:20 collegato esternamente a un regolatore step-up a bassi livelli LTC 3108. Il potenziale elettrico di uscita di 5 V può essere utilizzato per caricare molti apparecchi elettronici come telefoni cellulari e batterie ricaricabili, non solo sensori. Inoltre, questo potenziale può essere esteso rispettivamente a -12 V e +12 V per un ulteriore utilizzo.

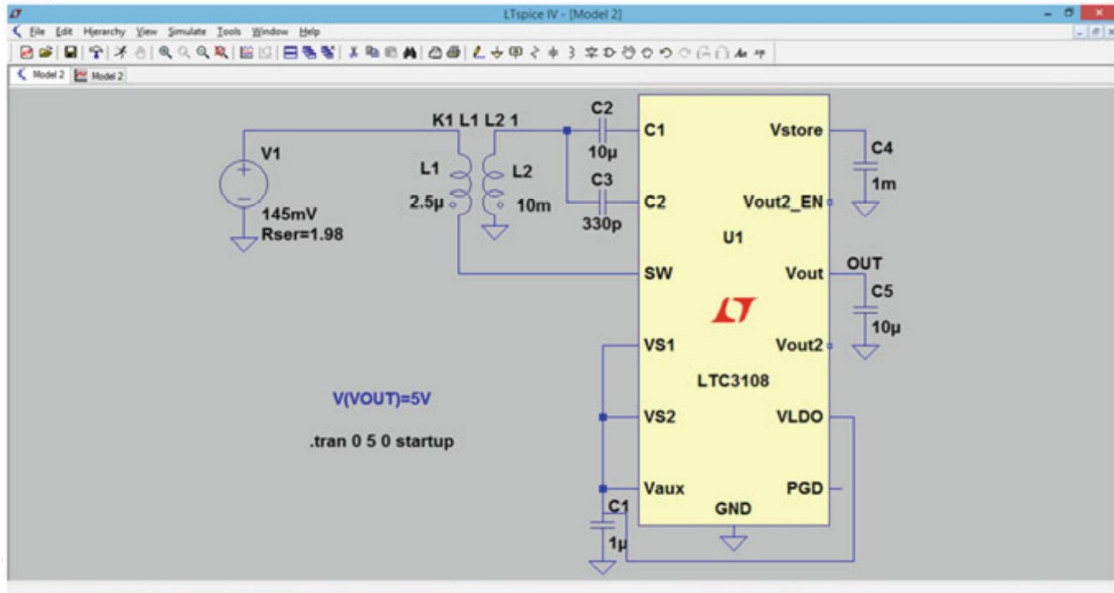


Figura 4.5: LTC 3108 circuito equivalente.

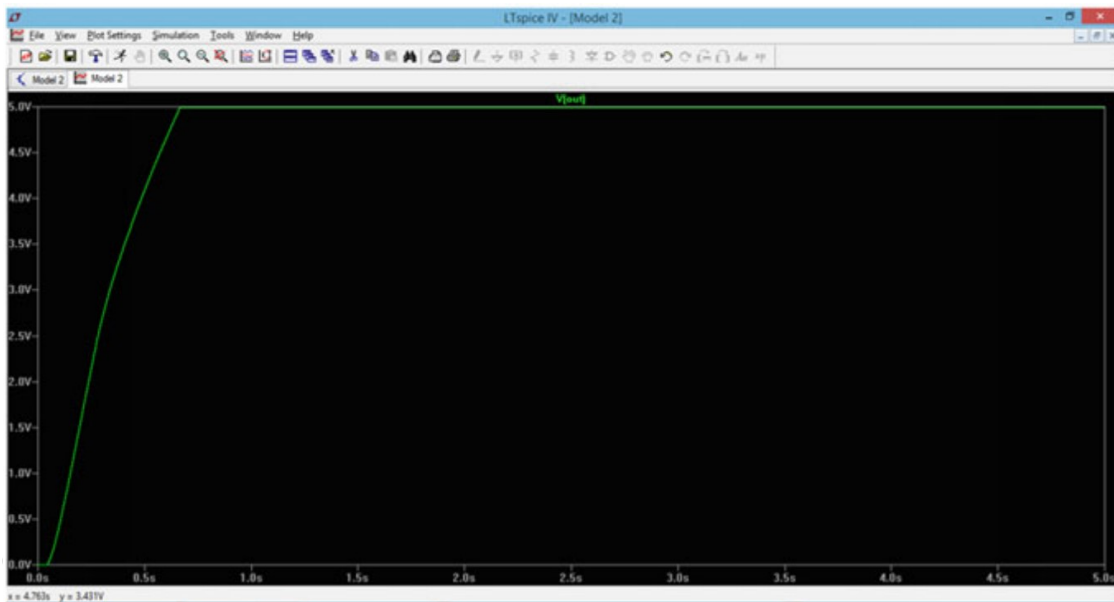


Figura 4.6: Rispettivi Output.



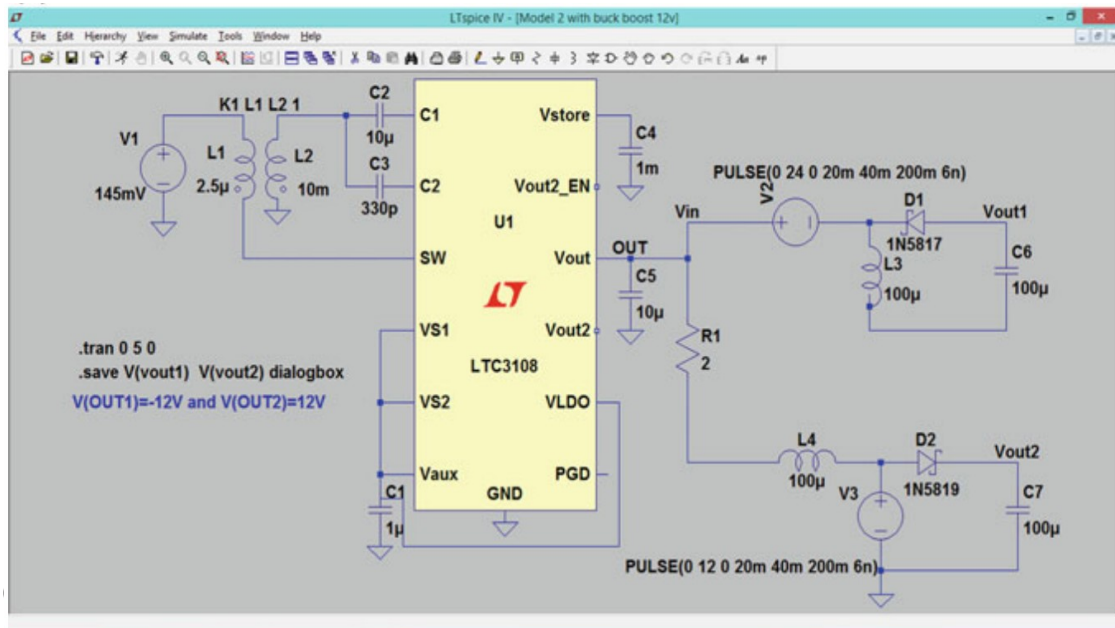


Figura 4.7: Circuito equivalente della combinazione LTC 3108 e convertitore buck-boost.

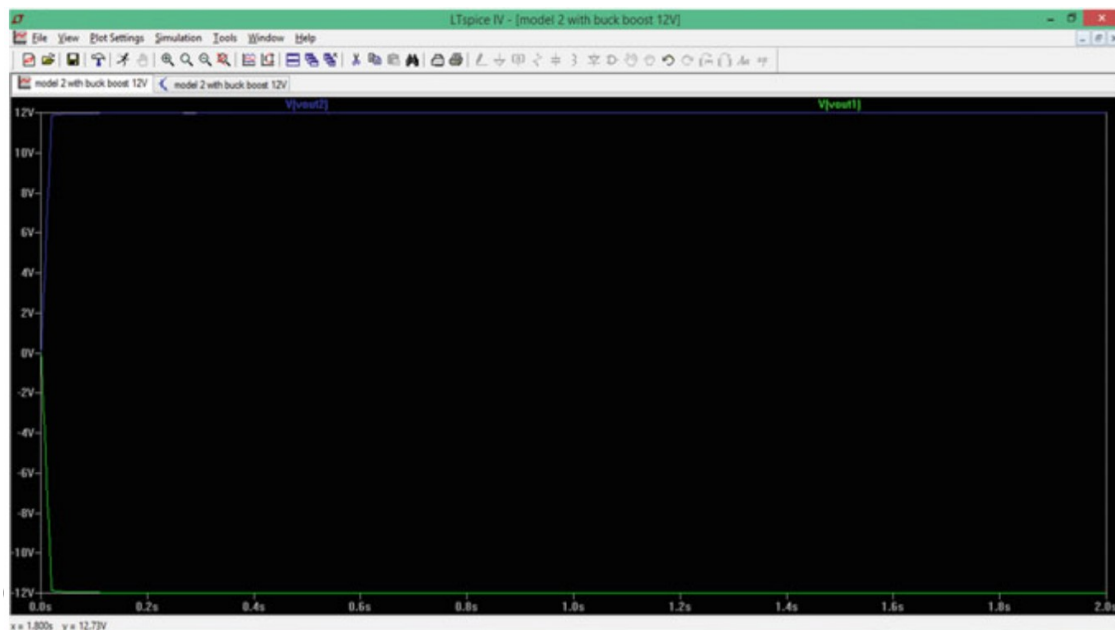


Figura 4.8: Rispettivi Output.



## Capitolo 5

# CONFRONTO E CONCLUSIONI

Confrontare diversi raccoglitori di energia non è semplice, poiché la quantità di dati presentati nei lavori pubblicati varia notevolmente. Pertanto, alcuni fattori devono essere estrapolati dai dati forniti e qualsiasi confronto deve essere trattato solo come una **guida**. Mitcheson ed altri [31] hanno presentato un confronto in cui hanno stimato i potenziali di input relativi e calcolato un'efficienza approssimativa. Da questo studio è stata ricavata una cifra per la densità di potenza normalizzata (NPD) che è semplicemente la potenza dichiarata del dispositivo normalizzato al livello di accelerazione e diviso per il volume. La frequenza non è considerata poiché i generatori di risonanza sono fissi in frequenza, mentre i livelli di accelerazione applicati durante i test possono essere variati. Né l'efficienza né la metrica NPD sono ideali, in quanto entrambe ignorano fattori importanti come la larghezza di banda. Il generatore di Perpetuum [32], per esempio, ha una larghezza di banda significativamente più ampia rispetto al generatore qui presentato, consentendogli di raccogliere energia da una più ampia gamma di frequenze. Tuttavia, il confronto di NPD per diversi dispositivi può fornire un'indicazione dei livelli di prestazioni relativi e fornire una visione utile delle tendenze e dei progressi. Poiché l'uscita di potenza varia con l'accelerazione, l'NPD calcolato è dato da  $\frac{P}{A^2V}$  dove P è la potenza dichiarata e V è il volume del generatore. La selezione e i dettagli dei raccoglitori di energia della letteratura utilizzata nel confronto sono descritti nella tabella 5.1 e un confronto è illustrato nel diagramma della figura 5.1.

Sono state approfondite le principali tecnologie utilizzate per la cattura/recupero e conservazione dell'energia, definita come **Energy Harvesting**. Ognuna di queste si basa su un progetto -esposto in modo teorico e pratico- utile alla generazione di energia da fonti disponibili nella maggior parte degli ambienti considerati. Questi, insieme a molti altri studi, contribuiscono alla diminuzione globale della produzione di batterie e materiali necessari per il collegamento a dispositivi remoti. Inoltre, essendo l'energia trasdotta energia dissipata da fonti già presenti, si prevede un'ulteriore diminuzione dell'energia prodotta dai combustibili fossili, che è destinata a sparire. Nella tabella del confronto finale 5.1, si vuole evidenziare come a seconda della fonte di energia a disposizione, delle dimensioni e della potenza richiesta, si possa scegliere la tecnologia più adatta all'applicazione di interesse. Non vi è quindi una tecnologia in generale più efficiente o comunque maggiormente conveniente rispetto alle altre.

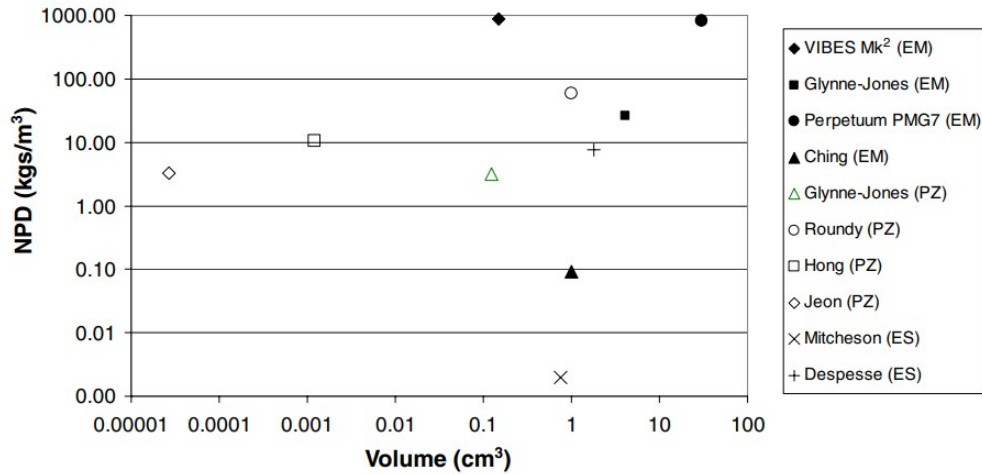


Figura 5.1: Densità di potenza normalizzata confrontata con il volume del dispositivo.

Tabella 5.1: Tabella di confronto tra i vari generatori, EM Elettromagnetico, ES Elettrostatico, PZ Piezoelettrico.

| Generatore                          | Frequenza [Hz] | Accelerazione [ $ms^{-2}$ ] | Massa inerziale [g]   | Volume [ $m^3$ ] | Potenza $\mu W$ | NDP [ $kgs m^{-3}$ ] |
|-------------------------------------|----------------|-----------------------------|-----------------------|------------------|-----------------|----------------------|
| VIBES Mk2 EM [33]<br>capitolo 2.3.2 | 52             | 0.589                       | 0.66                  | 0.15             | 46              | 883.97               |
| Glynne-Jones EM [34]                | 99             | 6.85                        | 2.96                  | 4.08             | 4990            | 26.07                |
| Perpetuum EM [32]                   | 100            | 0.400                       | 50                    | 30               | 4000            | 833.33               |
| Ching EM [35]                       | 110            | 95.5                        | 0.192                 | 1                | 830             | 0.09                 |
| White PZ [36]                       | 80             | 2.3                         | 0.8                   | 0.125            | 2.1             | 3.18                 |
| Roundy PZ [37]                      | 120            | 2.5                         | 9.15                  | 1                | 375             | 60.00                |
| Hong PZ [38]                        | 190            | 71.3                        | 0.01                  | 0.0012           | 65              | 10.67                |
| Jeon PZ [39]                        | 13900          | 106.8                       | $2.20 \times 10^{-7}$ | 0.000 027        | 1               | 3.25                 |
| Mitcheson ES [40]                   | 30             | 50                          | 0.1                   | 0.75             | 3.7             | 0.002                |
| Despesse ES [41]                    | 50             | 8.8                         | 104                   | 1.8              | 1052            | 7.55                 |

# Bibliografia

## Riferimenti bibliografici e siti web consultati

- [1] Umut Aksu e Recep Halicioglu. «A review study on energy harvesting systems for vehicles». In: *Tehnički glasnik* 12 (dic. 2018), pp. 251–259. DOI: [10.31803/tg-20180210153816](https://doi.org/10.31803/tg-20180210153816) (cit. a p. [vii](#)).
- [2] *A Water-Proof Triboelectric–Electromagnetic Hybrid Generator for Energy Harvesting in Harsh Environments*. URL: <https://doi.org/10.1002/aenm.201501593> (cit. a p. [vii](#)).
- [3] *Supercapacitors*. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor> (cit. a p. [1](#)).
- [4] *Grefene*. URL: <https://it.wikipedia.org/wiki/Grafene> (cit. a p. [1](#)).
- [5] Chih-Tao Chien et al. «Graphene-Based Integrated Photovoltaic Energy Harvesting/Storage Device». In: *Small* 11 (feb. 2015). DOI: [10.1002/smll.201403383](https://doi.org/10.1002/smll.201403383) (cit. a p. [2](#)).
- [6] ZiXuan Wang et al. «Organic photovoltaic cells: Novel organic semiconducting materials and molecular arrangement engineering». In: *Chinese Science Bulletin* 57 (nov. 2012). DOI: [10.1007/s11434-012-5202-3](https://doi.org/10.1007/s11434-012-5202-3) (cit. a p. [2](#)).
- [7] *passivazione*. URL: <https://it.wikipedia.org/wiki/Passivazione> (cit. a p. [3](#)).
- [8] Francois Beguin et al. «Supercapacitors: Carbons and Electrolytes for Advanced Supercapacitors (Adv. Mater. 14/2014)». In: *Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.)* 26 (apr. 2014), p. 2219. DOI: [10.1002/adma.201470093](https://doi.org/10.1002/adma.201470093) (cit. a p. [4](#)).
- [9] S P Beeby et al. «A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting». In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 17.7 (giu. 2007), pp. 1257–1265. DOI: [10.1088/0960-1317/17/7/007](https://doi.org/10.1088/0960-1317/17/7/007). URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0960-1317/17/7/007> (cit. a p. [9](#)).
- [10] M. El-hami et al. «Design and fabrication of a new vibration-based electromechanical power generator». In: *Sensors and Actuators A: Physical* 92 (ago. 2001), pp. 335–342. DOI: [10.1016/S0924-4247\(01\)00569-6](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(01)00569-6) (cit. a p. [10](#)).
- [11] *Cianoacrilato*. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/ea/9b/01/f2bfac1dd21a2f/US4425471.pdf> (cit. a p. [12](#)).
- [12] *doppia lucidatura*. URL: <https://patents.google.com/patent/US5571373A/en> (cit. a p. [12](#)).

- [13] *ANsoft Maxwell magnetic finite element*. URL: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell> (cit. a p. 14).
- [14] Xiao Li et al. «Controllable Hydrothermal Growth of ZnO Nanowires on Cellulose Paper for Flexible Sensors and Electronics». In: *Sensors Journal, IEEE* 15 (nov. 2015), pp. 6100–6107. DOI: [10.1109/JSEN.2015.2450179](https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2450179) (cit. a p. 21).
- [15] J.G. Rocha et al. «Energy Harvesting From Piezoelectric Materials Fully Integrated in Footwear». In: *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 57 (apr. 2010), pp. 813–819. DOI: [10.1109/TIE.2009.2028360](https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2028360) (cit. a p. 21).
- [16] Action Nechibvute, A. Chawanda e Pearson Luhanga. «Piezoelectric Energy Harvesting Devices: An Alternative Energy Source for Wireless Sensors». In: *Smart Materials Research* 2012 (mag. 2012). DOI: [10.1155/2012/853481](https://doi.org/10.1155/2012/853481) (cit. a p. 22).
- [17] V. Raghunathan et al. «Energy-aware wireless microsensor networks». In: *IEEE Signal Process. Mag.* 19 (2002), pp. 40–50 (cit. a p. 22).
- [18] Henry Sodano e Daniel Inman. «Generation and Storage of Electricity from Power Harvesting Devices». In: *Journal of Intelligent Material Systems and Structures - J INTEL MAT SYST STRUCT* 16 1 (gen. 2005), pp. 67–75. DOI: [10.1177/1045389X05047210](https://doi.org/10.1177/1045389X05047210) (cit. a p. 24).
- [19] *Application Note 43, Maxim Corporation*. URL: [12 - Bit%20Sampling%20A/D%20converter%20conserves%20power,%20July,%E2%80%9D%201998,%20http://notes-ap%02plication.abcelectronique.com/003/3-3801.pdf](https://notes-ap%02plication.abcelectronique.com/003/3-3801.pdf). (cit. a p. 24).
- [20] C. O. Mathuna et al. «Energy scavenging for long-term deployable wireless sensor networks.» In: *Talanta* 75 3 (2008), pp. 613–23 (cit. a p. 24).
- [21] *Texas MSP430*. URL: [https://www.ti.com/ww/it/msp430\\_products.html](https://www.ti.com/ww/it/msp430_products.html) (cit. alle pp. 26, 29).
- [22] Heung Soo Kim, Joo-Hyong Kim e Jaehwan Kim. «A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration». In: *International journal of precision engineering and manufacturing* 12.6 (2011), pp. 1129–1141 (cit. a p. 27).
- [23] F Cottone et al. «Piezoelectric buckled beams for random vibration energy harvesting». In: *Smart Materials and Structures* 21.3 (feb. 2012), p. 035021. DOI: [10.1088/0964-1726/21/3/035021](https://doi.org/10.1088/0964-1726/21/3/035021). URL: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/21/3/035021> (cit. a p. 27).
- [25] *Effetto Seebeck*. URL: [https://it.wikipedia.org/wiki/Effetto\\_Seebeck](https://it.wikipedia.org/wiki/Effetto_Seebeck) (cit. a p. 34).
- [29] M. Nesarajah e G. Frey. «Thermoelectric power generation: Peltier element versus thermoelectric generator». In: (2016), pp. 4252–4257. DOI: [10.1109/IECON.2016.7793029](https://doi.org/10.1109/IECON.2016.7793029) (cit. a p. 35).
- [30] Haripriya Kannan, K ReshmeT e P. Parthiban. «Thermoelectric charger». In: *2016 Online International Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET)* (2016), pp. 1–4 (cit. a p. 38).
- [31] Wright P K Mitcheson P D Reilly E K et al. «Transduction mechanisms and power density for MEMS inertial energy scavengers». In: (2006), pp. 275–78 (cit. a p. 43).
- [32] *perpetuum*. URL: <https://perpetuum.com/> (cit. alle pp. 43, 44).

- [33] S P Beeby et al. «A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting». In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 17.7 (giu. 2007), pp. 1257–1265. DOI: [10.1088/0960-1317/17/7/007](https://doi.org/10.1088/0960-1317/17/7/007). URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0960-1317/17/7/007> (cit. a p. 44).
- [34] S P Beeby et al. «A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting». In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 17.7 (giu. 2007), pp. 1257–1265. DOI: [10.1088/0960-1317/17/7/007](https://doi.org/10.1088/0960-1317/17/7/007) (cit. a p. 44).
- [35] Neil N.H. Ching et al. «A laser-micromachined multi-modal resonating power transducer for wireless sensing systems». English. In: *Sensors and Actuators, A: Physical* 97-98 (apr. 2002). Transducers'01 Eurosensors XV ; Conference date: 10-06-2001 Through 14-06-2001, pp. 685–690. ISSN: 0924-4247. DOI: [10.1016/S0924-4247\(02\)00033-X](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(02)00033-X) (cit. a p. 44).
- [36] P. Glynne-Jones, S. P. Beeby e N. M. White. «Towards a piezoelectric vibration-powered microgenerator». In: *IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology* 148.2 (2001), pp. 68–72. DOI: [10.1049/ip-smt:20010323](https://doi.org/10.1049/ip-smt:20010323) (cit. a p. 44).
- [37] Vinod Challa et al. «A vibration energy harvesting device with bidirectional resonance frequency tunability». In: *Smart Materials and Structures* 17 (feb. 2008), pp. 15035–10. DOI: [10.1088/0964-1726/17/01/015035](https://doi.org/10.1088/0964-1726/17/01/015035) (cit. a p. 44).
- [38] S Roundy e P K Wright. «A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics». In: *Smart Materials and Structures* 13.5 (ago. 2004), pp. 1131–1142. DOI: [10.1088/0964-1726/13/5/018](https://doi.org/10.1088/0964-1726/13/5/018). URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/13/5/018> (cit. a p. 44).
- [39] Y. B. Jeon et al. «MEMS power generator with transverse mode thin film PZT». In: *Sensors and Actuators A-physical* 122 (2005), pp. 16–22 (cit. a p. 44).
- [41] Ghislain Despesse et al. «Fabrication and characterization of high damping electrostatic micro devices for vibration energy scavenging». In: *Proc. Design, Test, Integration and Packaging of MEMS and MOEMS* (giu. 2005). ISBN:2-84813-057-1, pp. 386–390. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00748983> (cit. a p. 44).
- [42] *Nanomateriali*. URL: [https://www.minambiente.it/sites/default/files/archivio/allegati/reach/reach\\_bollettino\\_numero3\\_ottobre2017\\_nanomateriali.pdf](https://www.minambiente.it/sites/default/files/archivio/allegati/reach/reach_bollettino_numero3_ottobre2017_nanomateriali.pdf).
- [43] *Spettroscopia Raman*. URL: [https://it.wikipedia.org/wiki/Spettroscopia\\_Raman](https://it.wikipedia.org/wiki/Spettroscopia_Raman).
- [44] *zona di Brillouin*. URL: [https://it.wikipedia.org/wiki/Zona\\_di\\_Brillouin](https://it.wikipedia.org/wiki/Zona_di_Brillouin).
- [45] *Tecatron GF40*. URL: <https://www.ensingerplastics.com/it-it/semilavorati/prodotti-semilavorati/tecatron-gf40-black>.
- [46] *micro-mill Daytron*. URL: [https://www.datron.de/en\\_gb/cnc-milling-tools.html](https://www.datron.de/en_gb/cnc-milling-tools.html).
- [49] Min Chen. «Adaptive Removal and Revival of Underheated Thermoelectric Generation Modules». In: *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 61 (nov. 2014), pp. 6100–6107. DOI: [10.1109/TIE.2014.2304934](https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2304934).