



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

“Caratterizzazione di un sistema di energy harvesting piezoelettrico per dispositivi IoT”

Relatore: Prof. Alessandro Pozzebon

Laureando: Francesco Rigo

ANNO ACCADEMICO 2021 – 2022

Data di laurea 22/07/22

Indice

Introduzione	1
1 Stato dell'arte	2
2 Componenti utilizzate	4
2.1 Sensore piezoelettrico	4
2.2 Accelerometro MEMS	6
2.3 Motore vibrante	8
3 Caratterizzazione del sensore piezoelettrico	10
3.1 Relazione tra tensione e frequenza	10
3.2 Tensione a circuito aperto	11
3.3 Calcolo della resistenza interna	13
3.4 Relazioni tra tensione, corrente e potenza	14
4 Un esempio applicativo	21
4.1 Energia erogata dal sensore	21
4.2 Energia consumata dal sistema	22
Conclusioni	25
A Codice per calcolo frequenza di vibrazione	26
Bibliografia	28
Ringraziamenti	29

Introduzione

Nel mondo moderno, con la continua nascita di nuove tecnologie, sta crescendo anche la necessità di trovare un modo per alimentarle in maniera efficiente ed ecosostenibile. Ultimamente dunque, piuttosto che scegliere di connettere i dispositivi alla rete elettrica, oppure di sfruttare una batteria, si preferisce generare energia raccogliendola dall'ambiente, sfruttando i tanti fenomeni meccanici, chimici e fisici che esso offre.

Sta prendendo piede quindi il cosiddetto "Energy Harvesting" (letteralmente "raccolta di energia"), processo con il quale si cattura ed immagazzina l'energia dell'ambiente, convertendola in energia elettrica direttamente pronta all'uso. Oltre a fonti energetiche già note come il solare, il fotovoltaico e l'eolico, si studia oggi anche la possibilità di racimolare energia dalle vibrazioni involontarie dell'ambiente circostante. Lo si fa tramite tre principali metodi: l'induzione magnetica, l'utilizzo di sensori elettrostatici e quello di sensori piezoelettrici.

Uno dei tanti possibili campi di applicazione è quello dell'alimentazione di un nodo wireless per l'Internet of Things (IoT). Ponendo infatti il nostro energy harvester (EH) in un luogo soggetto a vibrazioni, possiamo ottenere un sistema che, fino a che queste non cessano, si autoalimenta e riesca ad esempio a condividere autonomamente i dati di un sensore ad esso collegato.

Capitolo 1

Stato dell'arte

Al momento sono molti gli studi che si stanno portando avanti per approfondire il tema del vibration energy harvesting. Questo perché le fonti vibranti utili al suo funzionamento si trovano dappertutto. Si pensi agli elettrodomestici che ognuno di noi ha in casa (frigoriferi, lavatrici, lavastoviglie etc.) ma anche a macchinari di aziende ed alle automobili. Oltre a questi un'altra importante frontiera è quella dell'applicazione all'acustica. Si è in grado infatti di ricavare energia elettrica anche dalle onde sonore. È dunque proprio la grande versatilità il vantaggio maggiore di questa tecnologia.

Un interessante campo in cui la si può già vedere applicata è ad esempio quello del monitoraggio di ponti. Sfruttando infatti le vibrazioni prodotte dai veicoli che li percorrono, si è in grado di monitorare lo stato dell'asfalto, come spiegato in [1].

Una nota importante a cui fare attenzione è però la forte dipendenza dei sistemi di harvesting dalla frequenza della vibrazione a cui sono soggetti. A differenza dunque di altre tecniche come il fotovoltaico e l'eolico, un determinato harvester non sarà universalmente valido per ogni fonte vibrante, ma dovrà essere riadattato affinché ottimizzi le sue prestazioni in corrispondenza alla frequenza della vibrazione da sfruttare.

Come citato nell'introduzione, la ricerca sta analizzando tre diversi metodi di vibration energy harvesting: l'EMEH (ElectroMagnetic Energy Harvesting), l'ESEH (ElectroStatic Energy Harvesting) ed il PEH (Piezoelectric Energy Harvesting).

Per quanto riguarda il primo dei tre, l'energia è ricavata sfruttando il principio di induzione magnetica. Come mostrato in figura 1.1, in base al moto relativo tra una bobina ed un magnete, si genera una corrente indotta.

Per il secondo invece si genera una corrente statica sfruttando il moto tra due superfici cariche di un condensatore, come mostrato in figura 1.2.

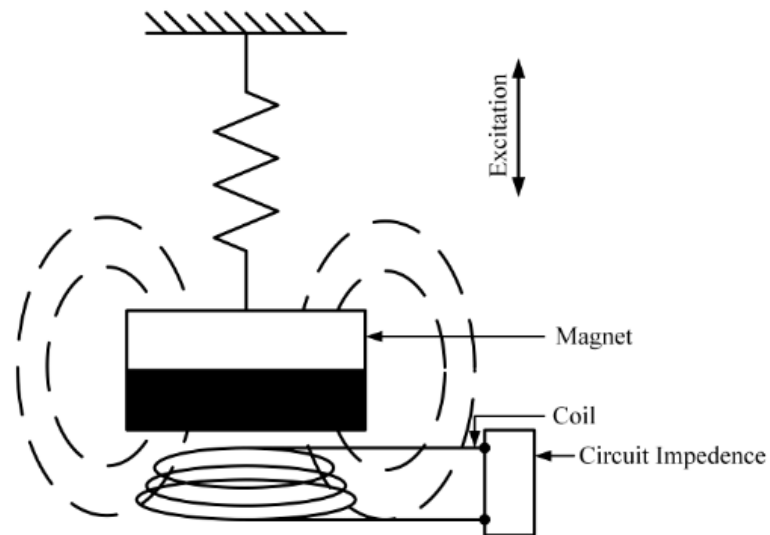


Figura 1.1: *Schema EMEH*

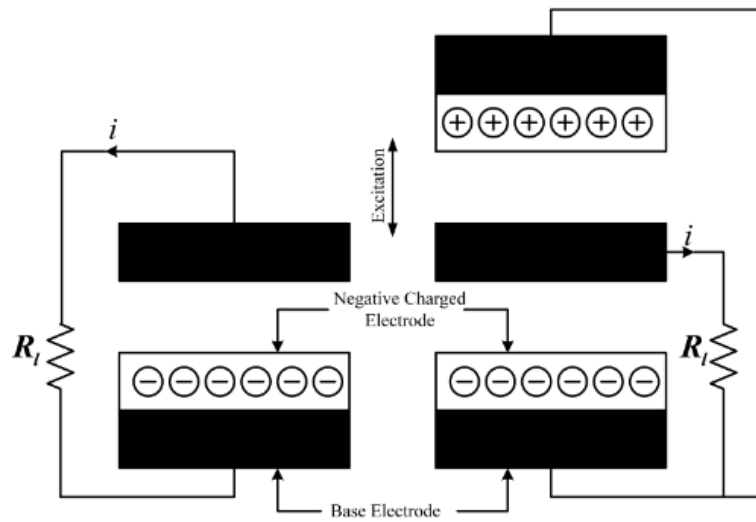


Figura 1.2: *Schema ESEH*

Il terzo ed ultimo metodo citato è quello che viene approfondito in questa tesi e prevede l'utilizzo di sensori piezoelettrici. Sono cristalli in grado di generare energia elettrica quando sottoposti a deformazioni. Le loro caratteristiche vengono spiegate in dettaglio al prossimo capitolo.

Capitolo 2

Componenti utilizzate

2.1 Sensore piezoelettrico

I sensori piezoelettrici sono dispositivi elettronici in grado di sfruttare l'effetto piezoelettrico, fenomeno fisico che può manifestarsi in maniera diretta o inversa. L'effetto piezoelettrico diretto fu scoperto dai fratelli Pierre e Jacques Curie nel 1880, i quali notarono che, se un determinato cristallo di quarzo veniva sottoposto a deformazioni meccaniche, era in grado, a causa della sua struttura chimica interna, di generare una differenza di potenziale. Successivamente venne scoperto anche l'effetto piezoelettrico inverso, il quale, in maniera opposta, causa la presenza di deformazioni meccaniche a partire da una differenza di potenziale. I due effetti sono visibili in figura 2.1.

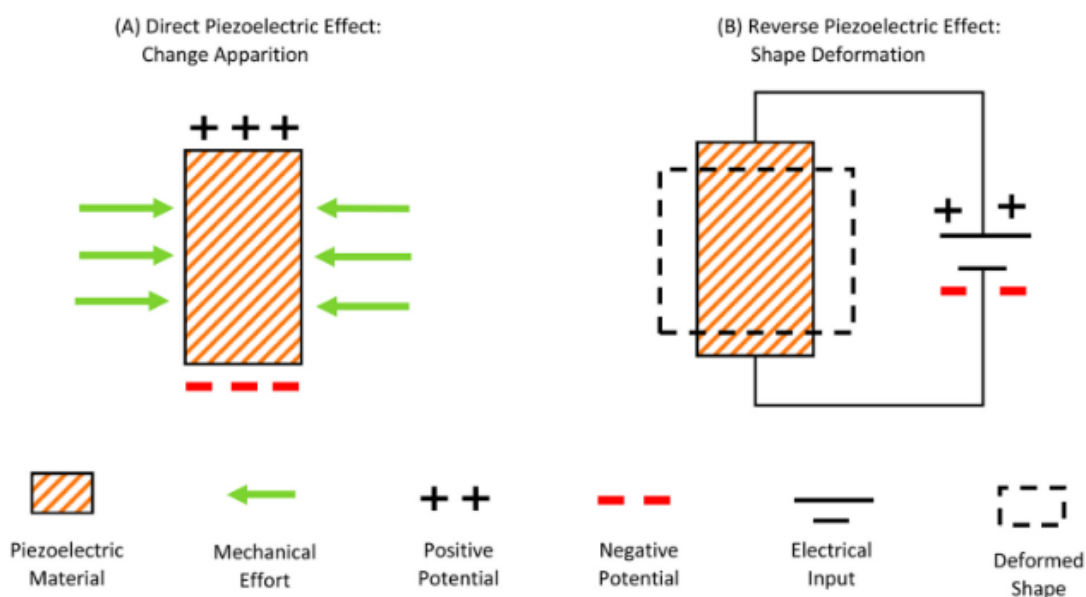


Figura 2.1: Effetto piezoelettrico diretto ed inverso

Le due formule che ne descrivono gli effetti sono le seguenti:

$$D = dT + \epsilon E \text{ per l'effetto piezoelettrico diretto}$$

$$X = sT + dE \text{ per l'effetto piezoelettrico inverso}$$

Dove D è lo spostamento elettrico, d il coefficiente piezoelettrico, T la sollecitazione, ϵ la permittività del materiale, E il campo elettrico, X lo sforzo e s la cedevolezza.

Le applicazioni di questi sensori sono svariate oggi: possiamo vederli usati in comuni accendini, in campo musicale o anche nel settore biomedicale.

In questa tesi si vuole sfruttare l'effetto piezoelettrico diretto per quantificare l'energia ottenibile in presenza di una fonte vibrante che permetta di deformare il sensore utilizzato.

Il sensore utilizzato per le prime misure è quello mostrato in figura 2.2.

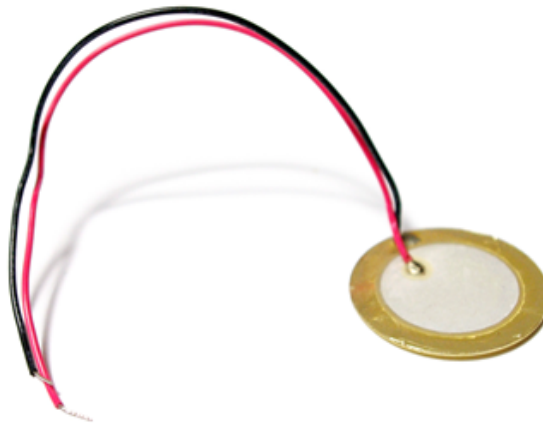


Figura 2.2: *Sensore piezoelettrico utilizzato*

Il sensore è stato montato sulla struttura vibrante in configurazione a trave a sbalzo, come mostrato in figura 2.3. Così facendo possiamo massimizzare la deformazione a cui è sottoposto il sensore piezoelettrico e studiare la dipendenza della tensione di uscita dalla presenza di masse di prova poste al suo estremo.

In figura sono mostrati due diversi tipi di configurazioni:

- in (a) è presentata la modalità monomorfa, nella quale si utilizza un unico sensore piezoelettrico come viene fatto in questa tesi
- in (b) è presentata la modalità bimorfa, nella quale due sensori piezoelettrici vengono uniti e collegati in serie

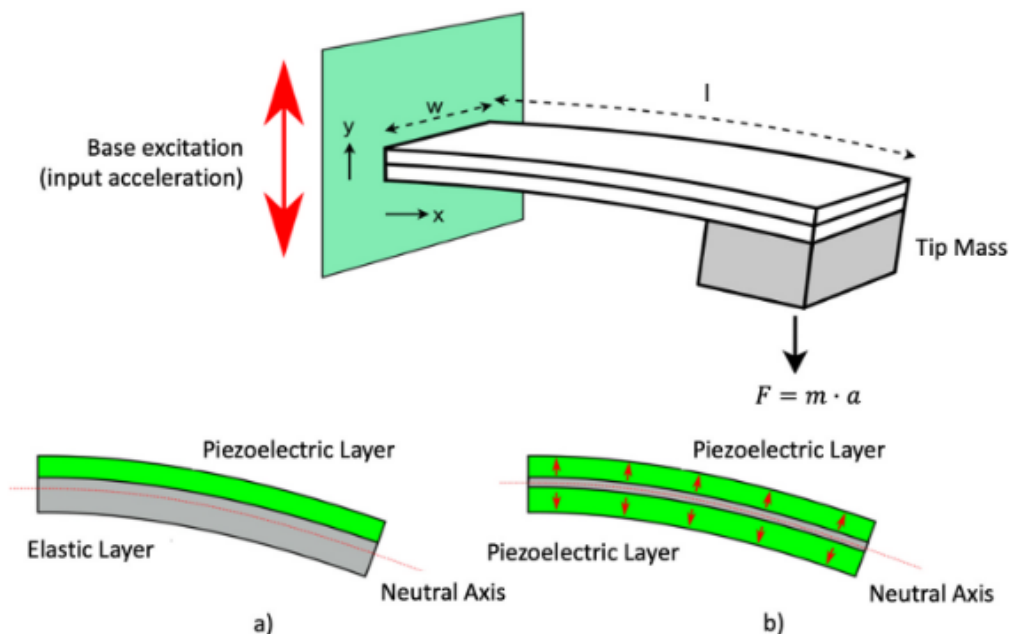


Figura 2.3: *Struttura a trave a sbalzo monomorfa e bimorfa*

2.2 Accelerometro MEMS

Per poter misurare le frequenze a cui il sistema vibra è stato utilizzato l'accelerometro MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) HW-013. Il suo principio di funzionamento è meglio spiegato in figura 2.4.

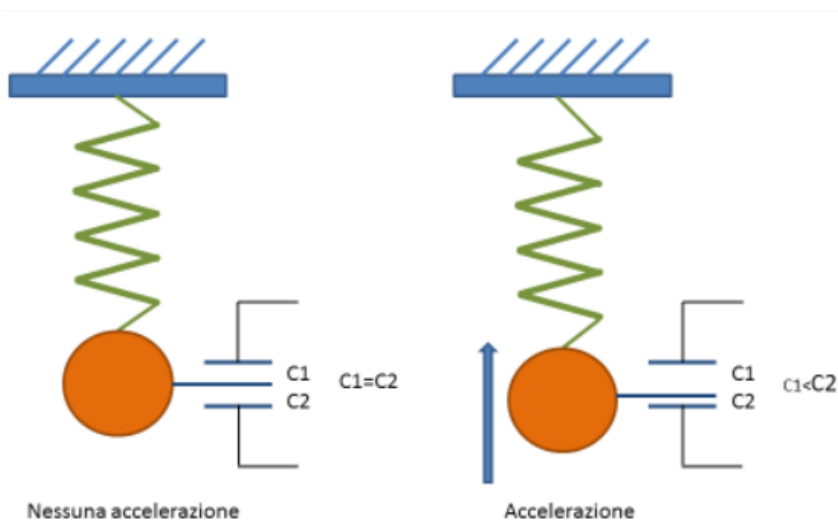


Figura 2.4: *Principio di funzionamento accelerometro MEMS*

È composto al suo interno di una parte mobile e di una parte fissa. Muovendosi la prima all'interno della seconda, variano le capacità mostrate in figura ed indicate con C_1 e C_2 .

Tramite calcoli adeguati l'accelerometro è dunque in grado di darci in uscita il valore di accelerazione a cui è sottoposto lungo tre assi (x, y e z).

Ponendolo su di un sistema vibrante potremo dunque, dalla lettura dei valori di accelerazione, capire quando esso è in fase di salita (poiché l'accelerazione risulterà minore di quella di gravità) e quando in fase di discesa (l'accelerazione risulterà maggiore di quella di gravità).

Per implementare il calcolo della frequenza si è collegato l'accelerometro alla piattaforma hardware Arduino Uno, con il seguente schema elettrico visibile in figura 2.5.

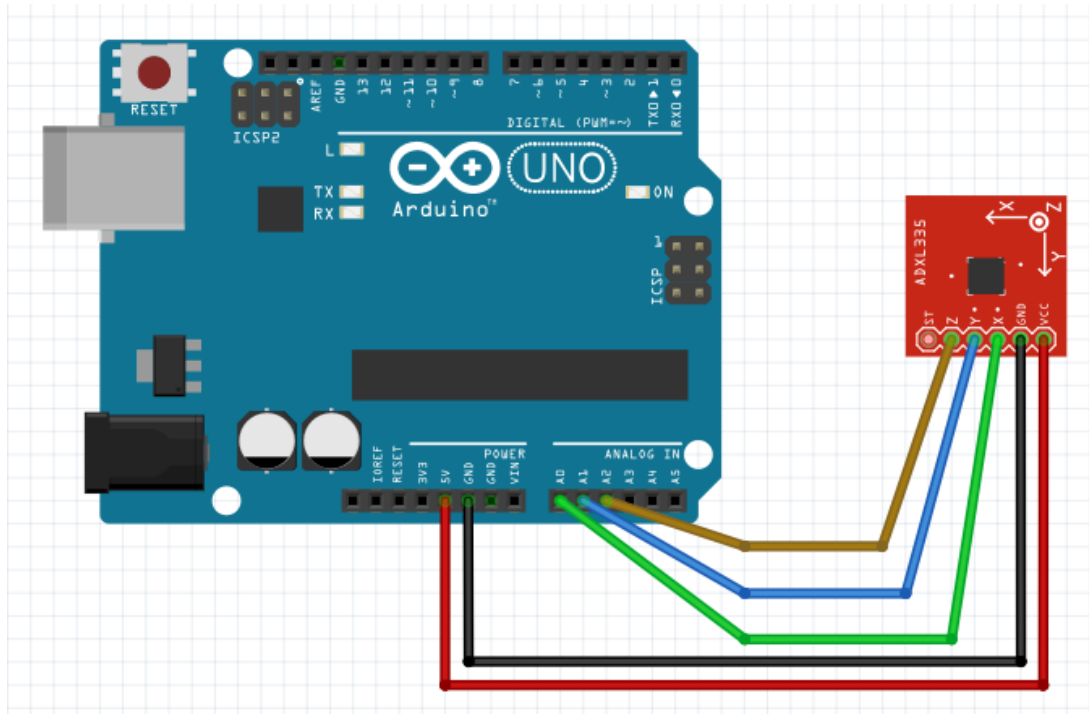


Figura 2.5: Schema elettrico per collegamento accelerometro MEMS

Andando a stampare nel monitor seriale i valori restituiti dall'accelerometro lungo un asse, essi saranno compresi tra 0 e 1023, poiché ognuno dei sei canali ADC di Arduino Uno ha una risoluzione di 10 bit.

Dato che l'accelerometro usato è in grado di leggere accelerazioni nell'intervallo $I = [-3g, 3g]$, ponendolo con l'asse z rivolto verso l'alto, in una situazione di riposo, avremo che:

$$\text{Accelerazione}_z = g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}, \text{Accelerazione}_x = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}, \text{Accelerazione}_y = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

I valori che vedremo invece stampati nel monitor seriale saranno ottenibili mappando l'intervallo I prima citato nell'intervallo $I^* = [0, 1023]$. In I^* l'accelerazione di gravità corrisponderà dunque al valore $digital_{acc} = \frac{4 \cdot 1024}{6} = 682.7$.

Per un'acquisizione rapida dei dati, il codice utilizza gli interrupt e la libreria MsTimer2. Quest'ultima sfrutta gli overflow interni del timer di Arduino come trigger per chiamare una

funzione, in questo caso *getData()*, la quale va a leggere il dato di accelerazione alla porta analogica A2.

La libreria utilizzata permette di impostare il periodo temporale che intercorre tra una chiamata ed un'altra, che al minimo corrisponde ad 1 ms. Questa risoluzione temporale è più che sufficiente per questa tesi, dato che la frequenza da misurare sarà di massimo 130 Hz.

Una volta finita l'acquisizione, il codice calcola la frequenza con la tecnica dello zero crossing. Questa consiste nell'andare a vedere quante volte si attraversa una determinata soglia in un certo intervallo di tempo.

Nel nostro caso, definita come soglia quella di riposo lungo l'asse z, corrispondente al valore prima calcolato $digital_{acc} = 682.7$, e sapendo che tra un'acquisizione e l'altra l'intervallo temporale è di 1 ms, possiamo ricavare la frequenza.

Per farlo, si calcola un indice *i* al quale, nell'array, è associato un valore appena sopra a quello di soglia durante un fronte di salita. Successivamente si conta quanti sono i dati acquisiti prima di tornare sotto alla soglia. Conoscendo il tempo intercorso tra un'acquisizione ed un'altra otteniamo dunque il semiperiodo. Possiamo quindi ricavare il periodo totale e di conseguenza anche la frequenza.

2.3 Motore vibrante

Il sensore piezoelettrico è stato collegato ad un motore vibrante, visibile in figura 2.6.



Figura 2.6: *Motore vibrante*

Come si può notare dall'immagine, le masse presenti ai due estremi dell'asse rotante si trovano ai lati opposti. Ciò fa sì che, alimentando il motore a 12 V, l'asse inizi a ruotare e per l'inerzia delle masse asimmetriche venga generata una vibrazione. La sua frequenza sarà ricavabile a partire dal numero di rotazioni eseguite in un noto intervallo di tempo. Essendo

la velocità massima di rotazione del motore $\omega = 7500$ rpm, possiamo ricavare la frequenza massima semplicemente calcolando quanti giri vengono fatti in un secondo, cioè

$$f_{max} = \frac{\omega}{60} = 125 \text{ Hz.}$$

A monte del motore è stato collegato un regolatore di velocità, con il quale si era in grado di gestire la frequenza di vibrazione e fare misure di tensione in condizioni diverse.

Capitolo 3

Caratterizzazione del sensore piezoelettrico

3.1 Relazione tra tensione e frequenza

Si può notare come, aggiungendo delle masse di prova all'estremo libero del sensore piezoelettrico, la tensione a circuito aperto subisca delle variazioni.

Questo accade perché ogni sensore è caratterizzato da una frequenza di risonanza, che corrisponde alla condizione sotto la quale il sensore è in grado di generare la tensione massima. Aggiungendo delle masse di prova, la loro inerzia va a diminuire la frequenza di risonanza. Il loro scopo è quello dunque di riuscire a spostare il picco di tensione verso frequenze minori, in modo da ottimizzare l'utilizzo del sensore per applicazioni di diverso tipo.

Il grafico in figura 3.1 permette di vedere le misure di tensione a circuito aperto fatte a varie frequenze e per varie masse di prova.

Le masse di prova utilizzate pesavano 2 g.

Come si può notare, essendo la frequenza di risonanza f_r del sensore utilizzato molto elevata poiché equivalente a circa $f_r = 4.6$ kHz, le curve ottenute senza o con poche masse di prova sono quasi piatte, a causa del fatto che corrispondono al primo segmento di una curva che raggiungerà il suo picco molto più avanti nell'asse delle frequenze.

Aggiungendo delle masse, aumenta significativamente anche la tensione misurata, segno del fatto che la frequenza di risonanza del sensore diminuisce.

Con una massa di circa 10 g riusciamo a notare il picco di tensione a circa 90 Hz, indice del fatto che la frequenza di risonanza è calata fino a circa quel valore.

Nonostante questo ottimo risultato, il sensore piezoelettrico usato è andato incontro a rotture

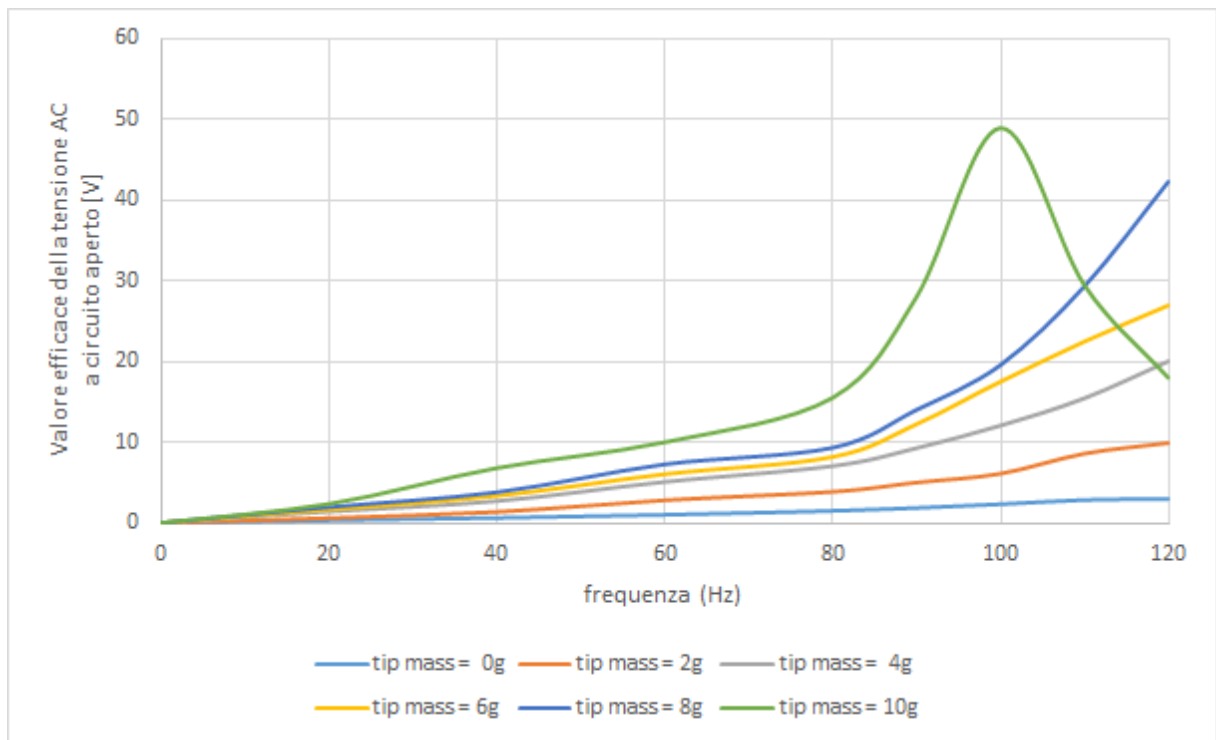


Figura 3.1: *Relazione tra tensione a circuito aperto e frequenza*

ogni volta che si provava a farlo funzionare a 90 Hz con una massa di 10 g, dunque per fare le misure successive si è scelto di farlo operare a circa 60 Hz.

3.2 Tensione a circuito aperto

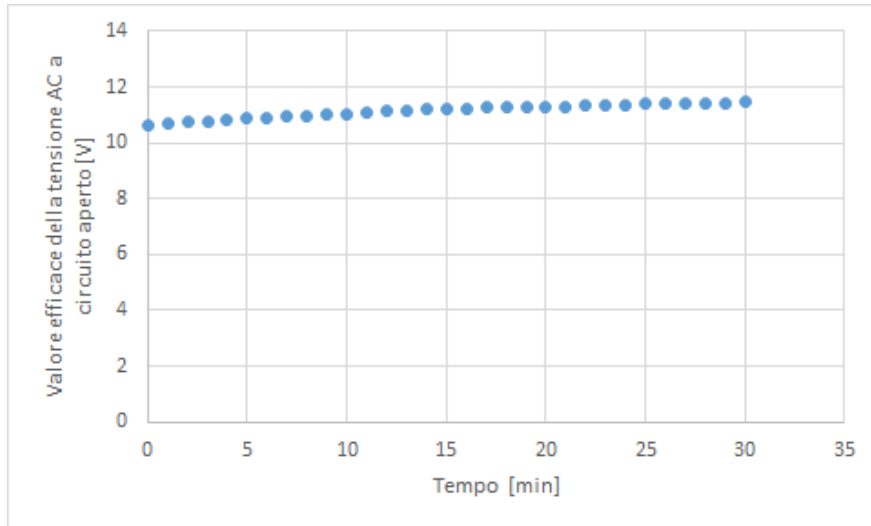
La frequenza di vibrazione che si è deciso di utilizzare per le misurazioni è circa 60 Hz perché si è osservato che, partendo da frequenze maggiori, la tensione a circuito aperto si manteneva inizialmente costante, ma andava poi ad esplodere tanto prima quanto più alta era la frequenza di partenza. Ciò faceva andare il sensore incontro a rotture.

Il grafico riportato in figura 3.2 (a) mostra il valore efficace della tensione in AC a circuito aperto al variare del tempo, mantenendo il sensore collegato ad un motore che genera una vibrazione di circa 60 Hz.

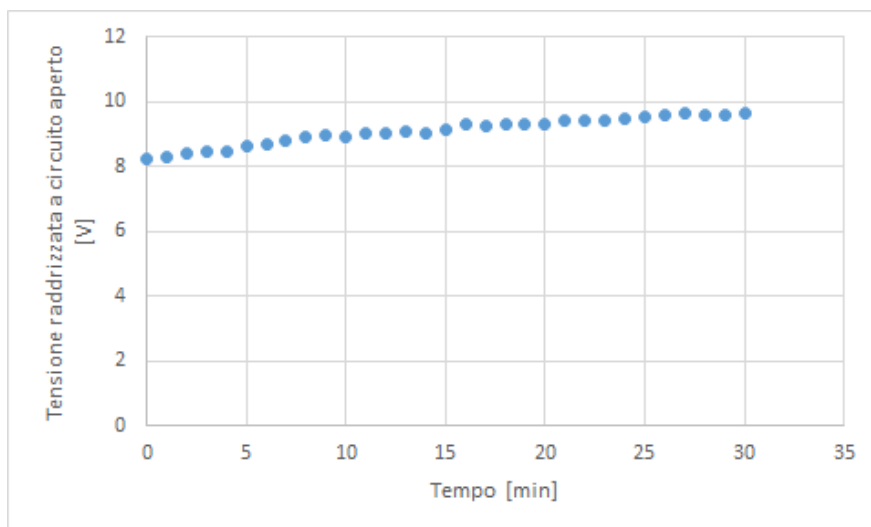
Dall'immagine possiamo notare come la tensione resti circa costante nel tempo. Subisce infatti solo un piccolo aumento di circa $\Delta V_{OC} = 0.03 \frac{V}{\text{min}}$.

Nel grafico in figura 3.3 è invece riportata la tensione a circuito aperto in funzione del tempo in uscita ad un raddrizzatore.

Si nota la caduta di potenziale ai capi del raddrizzatore, che vale circa 2 V. La tendenza invece è circa come quella vista nella misura in AC.



(a) Valore efficace della tensione non raddrizzata a circuito aperto al variare del tempo



(b) Valore efficace della tensione raddrizzata a circuito aperto al variare del tempo

Figura 3.2: Valori efficaci delle tensioni a circuito aperto al variare del tempo con una vibrazione di 60 Hz

3.3 Calcolo della resistenza interna

Per il calcolo della resistenza interna è stato usato il circuito riportato in figura 3.3.

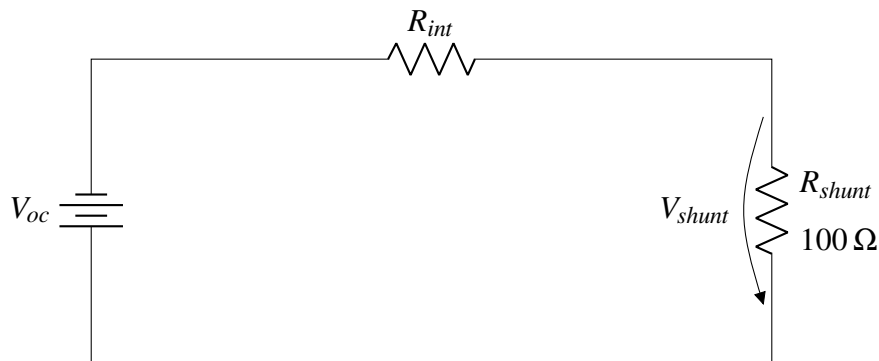


Figura 3.3: *Circuito per calcolo resistenza interna*

Questo circuito permette di calcolare la resistenza interna poiché, conoscendo a priori il valore di resistenza di R_{shunt} , per il partitore di tensione potremo dire che:

$$V_{shunt} = V_{OC} \cdot \frac{R_{shunt}}{R_{shunt} + R_{int}} \Rightarrow R_{int} = R_{shunt} \cdot \left(\frac{V_{OC}}{V_{shunt}} - 1 \right) \quad (3.1)$$

Seguendo dunque l'equazione 3.1 possiamo misurare la resistenza interna sapendo solo la tensione a circuito aperto, che abbiamo ricavato precedentemente, e la tensione misurata su R_{shunt} , dato che quest'ultima ha un valore di resistenza noto a priori ed in questo caso di 100Ω .

Per le misure fatte si è scelta come frequenza di vibrazione sempre $f = 60 \text{ Hz}$.

Tramite l'equazione 3.1 si ottiene, facendo la misura senza raddrizzatore, che $R_{int} = 42.07 \text{ k}\Omega$ (poiché le misure riportano $V_{OC} = 11 \text{ V}$ e $V_{shunt} = 26.15 \text{ mV}$).

Facendo lo stesso calcolo invece con la tensione a circuito aperto raddrizzata, si ottiene il valore $R_{int}^* = 56.57 \text{ k}\Omega$, simbolo del fatto che anche il raddrizzatore contribuisce con la sua resistenza.

3.4 Relazioni tra tensione, corrente e potenza

Per misurare le relazioni che intercorrono tra potenza erogata, tensione e corrente, è stato usato inizialmente il circuito in figura 3.4, dove V_{oc} rappresenta la tensione a circuito aperto raddrizzata del sensore piezoelettrico collegato ad una fonte vibrante con frequenza $f = 60$ Hz.

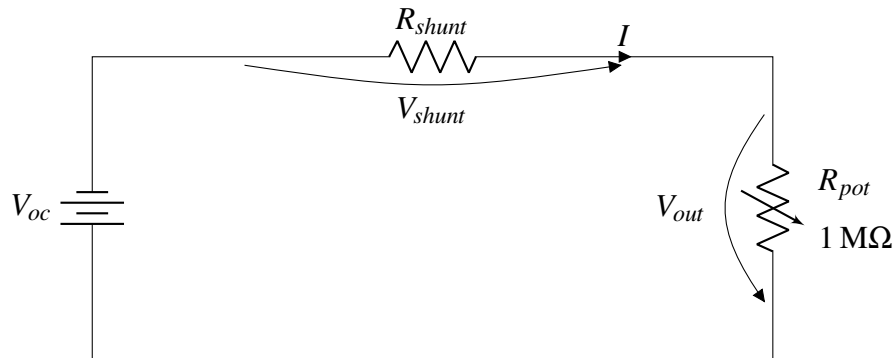


Figura 3.4: Circuito per ricavare le relazioni tra tensione, corrente e potenza

La tensione è stata misurata ai capi del potenziometro, mentre la corrente è stata calcolata a partire dalla misura di tensione fatta ai capi della resistenza di shunt.

Infatti, per calcolare la potenza erogata al carico, che in questo caso è dato dal trimmer, si usa la relazione:

$$P_{out} = V_{out} \cdot I \quad (3.2)$$

In figura 3.4 vale che $V_{out} = V_{pot}$ e che $I = \frac{V_{shunt}}{R_{shunt}}$.

Misurando dunque, al variare del valore di resistenza del potenziometro, la tensione e la corrente, possiamo ricavare le tre relazioni IV (corrente - tensione), PV (potenza - tensione) e PI (potenza - corrente).

Per le misure, considerato il fatto che la resistenza interna, in uscita al raddrizzatore, aveva un valore $R_{int}^* = 56.57$ k Ω , è stato utilizzato un potenziometro con valore di fondo scala elevato in modo tale da riuscire a vedere l'intera escursione della tensione in uscita da

$$V_{pot} = 0 \text{ V fino a } V_{pot} = V_{oc}.$$

Se avessimo utilizzato un potenziometro con valore di fondo scala minore o uguale al valore di resistenza interna, essendo questo circuito un partitore di tensione, la variabilità della tensione misurata in uscita sarebbe risultata ridotta.

Allo stesso modo, anche la corrente calcolata con l'equazione 3.3 avrebbe risentito di un valore di fondo scala troppo piccolo, poichè, data la non trascurabilità della resistenza interna, non avrebbe avuto un'escursione quasi completa.

$$I = \frac{V_{oc}}{R_{pot} + R_{int} + R_{shunt}} \quad (3.3)$$

Sono riportati in figura 3.5 i grafici con le varie dipendenze tra tensione, corrente e potenza. La potenza massima erogata corrisponde al picco delle due parabole raffigurate. Ciò vuol dire che l'MPP (Maximum Power Point) corrisponde, stando a queste prime misure, a circa il 70%.

Sono state poi misurate le stesse relazioni utilizzando un sensore piezoelettrico senza masse di prova. I grafici risultanti sono quelli mostrati in figura 3.6 in arancione.

Guardando i grafici ricavati dal sensore senza masse, vediamo che il picco di potenza è tralato verso sinistra e che naturalmente anche le tensioni e le correnti misurate sono decisamente inferiori. Questa condizione operativa è dunque indubbiamente svantaggiosa.

Le stesse relazioni sono poi state ricavate anche con l'unità di alimentazione e misura (SMU, Source Measurement Unit) Keithley 2461. Questo è uno strumento che combina una funzione di generazione del segnale e una di misura sullo stesso pin o connettore. Nel nostro caso, l'SMU andava a vedere con che corrente il sensore piezoelettrico rispondeva ad una tensione in ingresso da lui fornita. Tramite il software LabView erano stati impostati parametri come gli intervalli di tensione entro cui operare e la frequenza di acquisizione, al fine di ottenere le migliori misure. Successivamente, poiché il salvataggio dei dati misurati è avvenuto sottoforma di file di testo, questi sono stati elaborati con Microsoft Excel, con cui si sono ottenuti i grafici visibili alle figure 3.7 e 3.8.

Entrambi i metodi utilizzati per ricavare le tre relazioni hanno però dei limiti. Il primo perché, avendo misurato le correnti e le tensioni con un multimetro palmare, aveva dei limiti di accuratezza. Il secondo perché lo strumento utilizzato generalmente serve a caratterizzare fonti che generino una corrente continua, come ad esempio le celle solari.

Nonostante ciò, confrontando le figure 3.7 e 3.8, notiamo che, all'aumentare della frequenza di vibrazione, aumentano la tensione, la corrente e la potenza, dato che stiamo sempre sotto alla frequenza di risonanza.

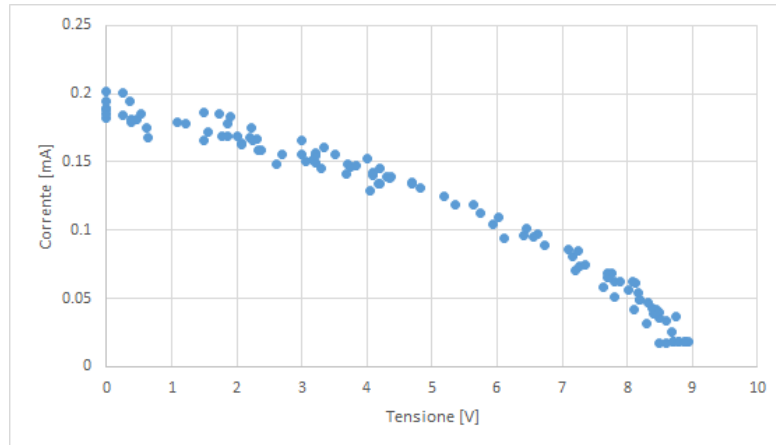
Confrontando inoltre le relazioni ottenute dal SourceMeter alla frequenza di 60 Hz con quelle misurate sperimentalmente con il circuito in figura 3.4, possiamo dire che c'è una certa discordanza nelle relazioni PV e PI nei due casi. Nonostante infatti il picco di potenza erogata valga comunque circa 0.65 mW ad una tensione di circa 6.5 V, guardando i risultati ottenuti dal

SourceMeter vediamo come l'MPP tenda molto di più ad essere vicino al 50% piuttosto che al 70%. Per capire fino in fondo le motivazioni di queste differenze sarebbe stato necessario modellare elettricamente il sensore piezoelettrico usato, in modo tale da capire più nel dettaglio il suo comportamento anche alle correnti più piccole. Nel fare ciò sarebbe anche stato necessario tenere conto del raddrizzatore a ponte e dei comportamenti non lineari dei diodi da cui è composto.

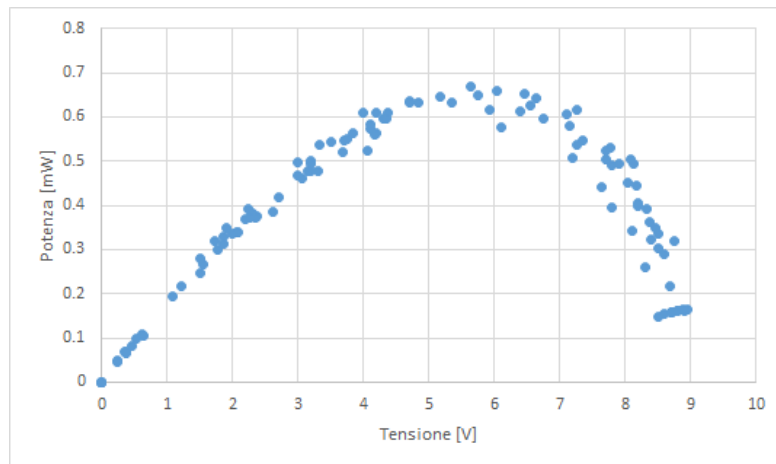
Questo sarebbe servito anche a spiegare le imprecisioni delle misure fatte con l'SMU visibili in figura 3.7.

Per quanto riguarda invece il confronto tra le misure fatte senza masse di prova, possiamo dire che l'andamento ottenuto con entrambi i metodi è circa uguale. Il picco è infatti molto spostato verso sinistra e le condizioni operative sono decisamente svantaggiose. Come precedentemente detto, avere un modello elettrico del sensore piezoelettrico potrebbe spiegare meglio anche in questo caso le imprecisioni delle misure, dato che senza masse le correnti e le tensioni in gioco sono decisamente più piccole.

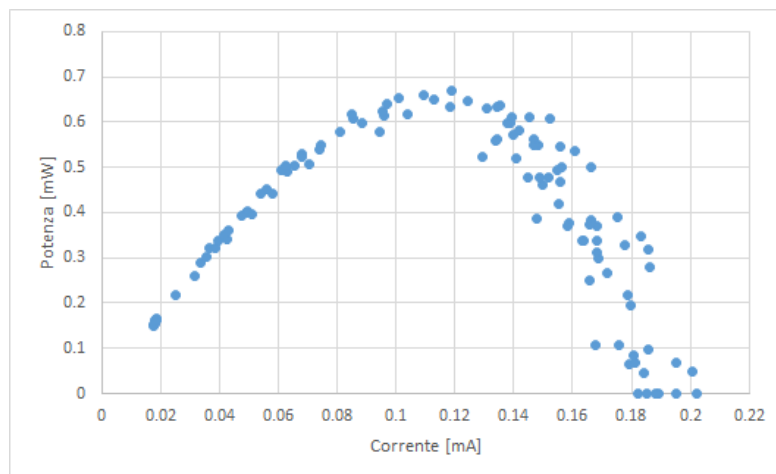
Nonostante ciò, l'obiettivo di questa tesi era vedere cosa si riuscisse ad alimentare con il sensore scelto. Per questo è stato importante ricavare le relazioni appena descritte tra tensione, corrente e potenza ed evidenziare il picco che, alla frequenza di 60 Hz, entrambi i metodi di misura hanno mostrato corrisponde alla potenza di circa $P = 0.65$ mW.



(a) *Relazione tra tensione e corrente con masse di prova*

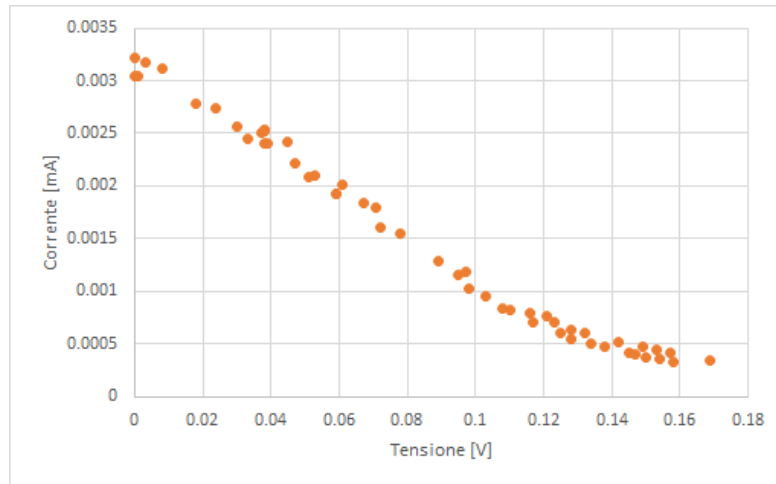


(b) *Relazione tra potenza e tensione con masse di prova*

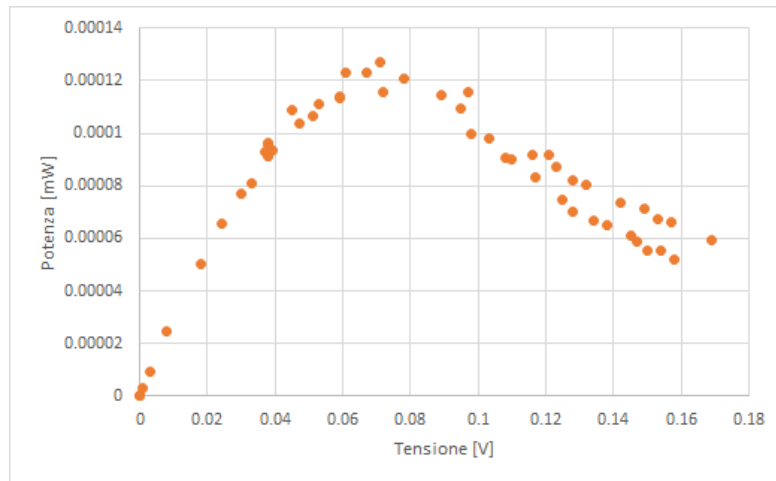


(c) *Relazione tra potenza e corrente con masse di prova*

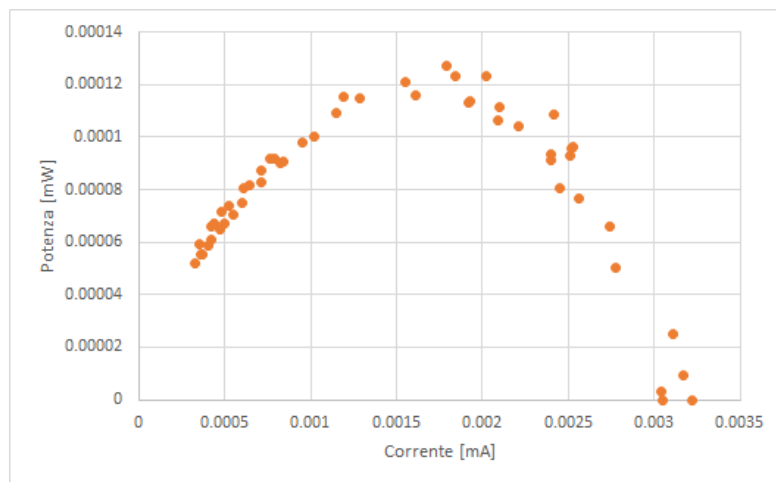
Figura 3.5: Relazioni IV, PV e PI a 60 Hz con masse di prova di 10 grammi



(a) Relazione tra tensione e corrente in assenza di masse di prova

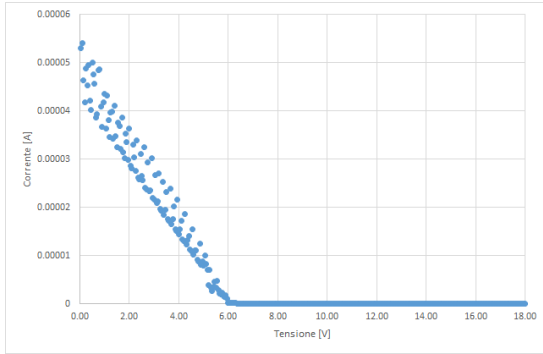


(b) Relazione tra potenza e tensione in assenza di masse di prova

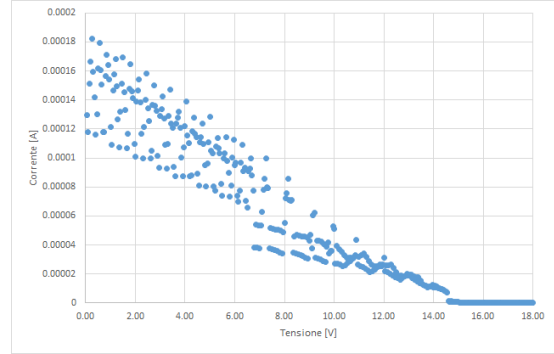


(c) Relazione tra potenza e corrente in assenza di masse di prova

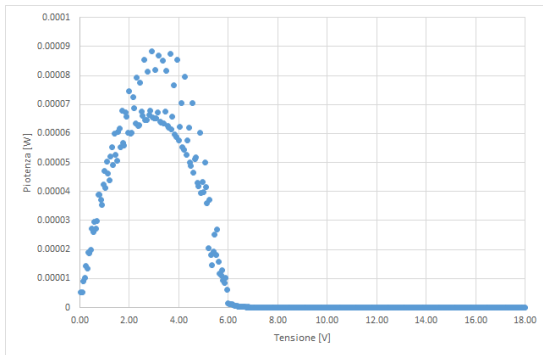
Figura 3.6: Relazioni IV, PV e PI a 60 Hz senza masse di prova



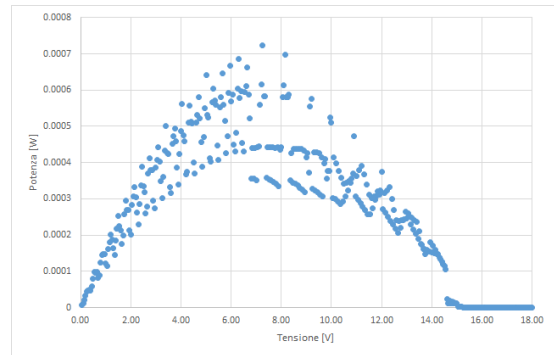
(a) *Relazione IV a 40 Hz*



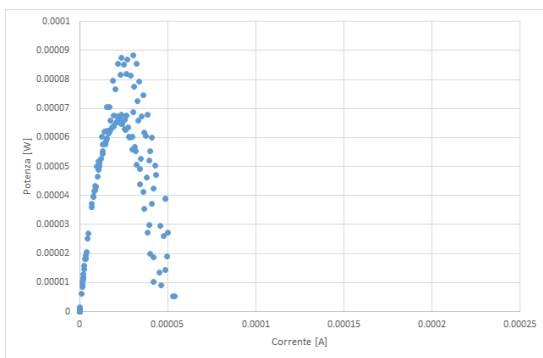
(b) *Relazione IV a 60 Hz*



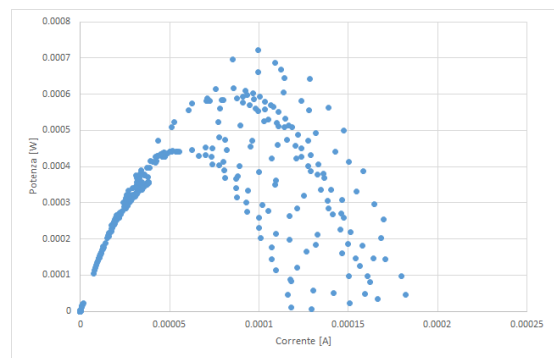
(c) *Relazione PV a 40 Hz*



(d) *Relazione PV a 60 Hz*

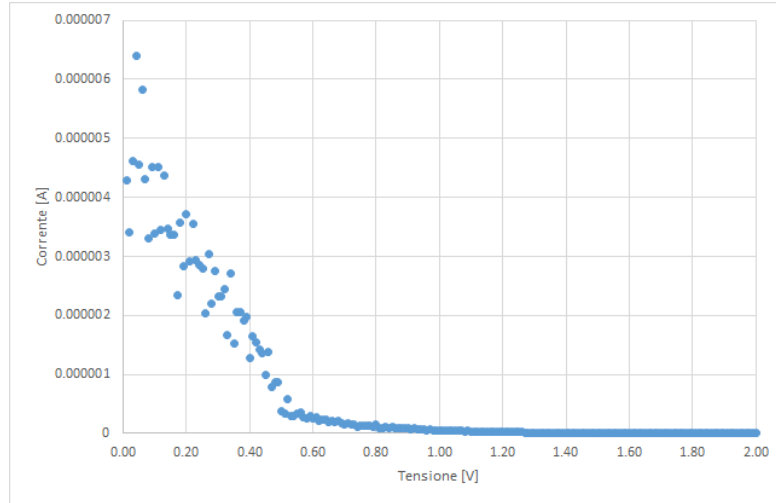


(e) *Relazione PI a 40 Hz*

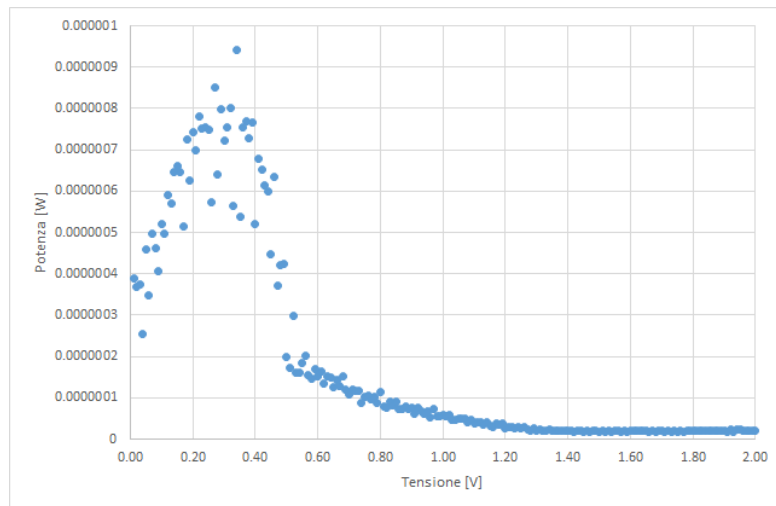


(f) *Relazione PI a 60 Hz*

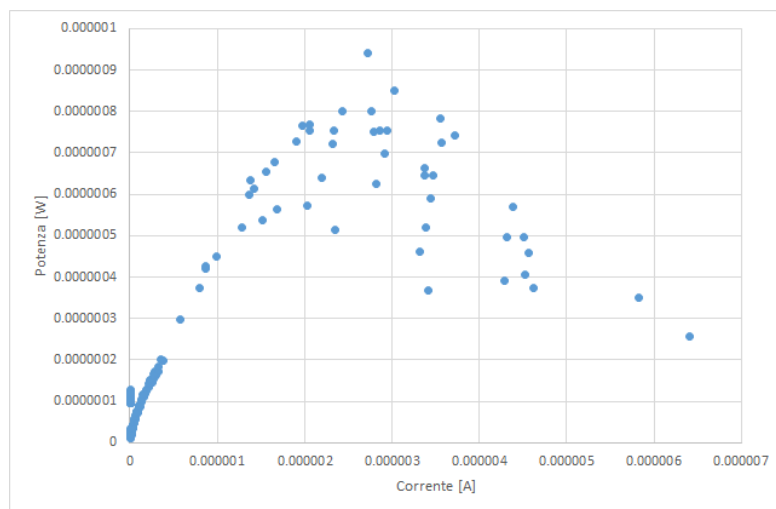
Figura 3.7: Relazioni IV, PV e PI a 40 Hz e 60 Hz con masse di prova di 10 grammi ricavate dal SourceMeter



(a) Relazione IV a 60 Hz senza masse



(b) Relazione PV a 60 Hz senza masse



(c) Relazione PI a 60 Hz senza masse

Figura 3.8: Relazioni IV, PV, PI senza masse di prova a 60 Hz

Capitolo 4

Un esempio applicativo

4.1 Energia erogata dal sensore

Per calcolare quanta energia il nostro sensore è in grado di erogare, consideriamo i valori di potenza, tensione e corrente corrispondenti ai picchi visualizzati precedentemente.

Per determinare l'energia erogata dal sistema utilizzeremo come unità di misura il Wh (*Wattora*). Non rientra nel Sistema Internazionale di Misura, poiché generalmente l'energia è espressa in *Joule*. Un *Wattora* corrisponde all'energia elettrica complessiva fornita da un sistema che per un'ora eroghi una potenza istantanea di un Watt.

Considerato che il nostro sistema è in grado di fornire, con una vibrazione di circa $f = 60$ Hz, una potenza di picco di circa $P_{picco} = 0.65$ mW, possiamo calcolare che l'energia da esso fornita in un'ora vale $E = P_{picco} \cdot 1 \text{ h} = 0.65$ mWh.

Per convertire in *Joule* questa energia bisogna moltiplicare per un fattore 3600, ottenendo dunque $E = 2.34$ J. Il nostro sensore riuscirà dunque a fornire circa 2.34 J in un'ora.

Per calcolare cosa il nostro sistema è in grado di alimentare, possiamo anche fare i calcoli in Ah (Ampere-ora). Un Ah corrisponde alla quantità di carica elettrica necessaria ad erogare una corrente di un Ampere per un'ora.

Per calcolare questa quantità divido l'energia in Wh precedentemente calcolata per la tensione corrispondente al picco di potenza, la quale vale circa 6 V. Ottengo dunque

$$Q = \frac{0.65}{6} \text{ mAh} = 0.108 \text{ mAh.}$$

4.2 Energia consumata dal sistema

Il sistema che si vorrebbe alimentare principalmente si compone di tre elementi:

- sensore che rilevi un parametro ambientale
- modulo radio per trasmissione dei dati ricavati dal sensore
- microcontrollore per la gestione del modulo radio e dei cicli di trasmissione

Come microcontrollore si può utilizzare l'ATtiny84, mentre come modulo radio l'RFM95. Quest'ultimo è un modulo LoRa che, con il protocollo Long Range Wide Area Network (LoRaWAN), permette di trasmettere dati a distanze di qualche chilometro in zone urbane e decine di chilometri di aree rurali mantenendo comunque un bassa richiesta di energia.

Nell'analisi dei consumi, ipotizziamo di voler alimentare un sistema che trasmetta un dato ogni ora. Durante la fase di trasmissione saranno attivi sia il microcontrollore che il modulo radio, negli altri momenti invece il microcontrollore sarà in modalità di sleep e il modulo radio sarà spento. Il sensore invece continuerà a rilevare sempre, dunque sarà sempre attivo. Le misure riportate in [7], dove si vuole monitorare la concentrazione di monossido di carbonio nell'aria, mostrano come l'assorbimento del microcontrollore sia decisamente inferiore a quello del modulo radio. La corrente assorbita dal modulo radio nel momento in cui si trasmette un dato equivale infatti a $I_{RADIO} = 112.36$ mA, mentre il datasheet del microcontrollore ATtiny84 riporta che, in attività, esso assorbe $I_{CONTR1} = 0.33$ mA, mentre in sleep assorbe $I_{CONTR2} = 4.5$ μ A.

Per la parte di sensing, prendendo sempre come esempio lo stesso studio, si può approssimare la corrente massima assorbita a circa $I_S = 100$ μ A.

Dunque, mentre non si trasmette la corrente assorbita vale:

$$I_1 = I_{CONTR2} + I_S = 104.5 \mu\text{A}.$$

Durante la trasmissione vale invece:

$$I_2 = I_{CONTR1} + I_{RADIO} + I_S = 112.69 \text{ mA}.$$

Supponendo che la trasmissione duri un tempo $t = 5$ s e che venga fatta alla fine dell'ora, possiamo osservare graficamente l'assorbimento di corrente durante un ciclo di un'ora in figura 4.1. L'immagine raffigurata non è volutamente in scala per permettere una comprensione più chiara.

Integrando nell'intervallo di tempo la corrente assorbita, otteniamo la carica necessaria a mantenere il sistema alimentato per un'ora.

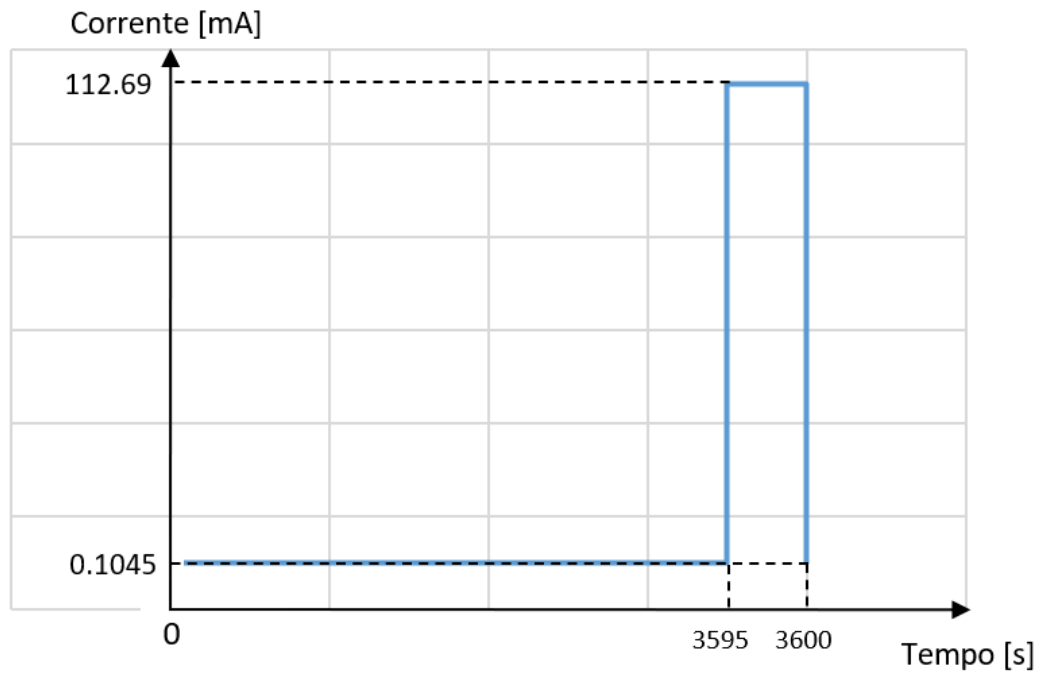


Figura 4.1: Corrente assorbita al variare del tempo

In questo caso l'integrale è la somma dell'area dei due rettangoli, che vale:

$$Q = \left(I_1 \cdot \frac{3595}{3600} + I_2 \cdot \frac{5}{3600} \right) \cdot 1 \text{ h} = 0.26 \text{ mAh} \quad (4.1)$$

Il valore trovato corrisponde, sapendo sempre che la tensione operativa è costante a 6 V, ad un'energia $E = 0.26 \text{ mAh} \cdot 6 \text{ V} = 1.56 \text{ mWh} = 5,62 \text{ J}$.

Sapendo però che l'energia erogata era inferiore, ciò significa che non riusciamo ad alimentare un sistema come quello sopra descritto.

Per trovare il numero di ore che devono trascorrere tra una trasmissione ed un'altra per avere l'autosufficienza del sistema, possiamo impostare un'equazione come la seguente:

$$Q = \left(I_1 \cdot \frac{3600 \cdot x - 5}{3600 \cdot x} + I_2 \cdot \frac{5}{3600 \cdot x} \right) \cdot 1 \text{ h} < 0.108 \text{ mAh}. \quad (4.2)$$

Da questa equazione otterremmo però il valore $x = 44.7 \text{ h}$. Naturalmente un sistema così potrebbe avere pochi utilizzi, dato che le trasmissioni verrebbero fatte troppo di rado.

Considerato tuttavia che i sensori piezoelettrici caratterizzati in questa tesi sono facilmente reperibili, di piccole dimensioni ed a basso costo, si potrebbe implementare un sistema che ne veda combinati di più in parallelo, in modo che le loro correnti si sommino e, di conseguenza, anche la potenza erogata veda un aumento.

Se ne usassimo ad esempio due, la potenza totale fornita sarebbe infatti il doppio, quindi $P = 1.3 \text{ mW}$. L'energia risulterebbe di conseguenza essere $E = 1.3 \text{ mWh} = 4.68 \text{ J}$. La carica invece $Q = 0.217 \text{ mAh}$.

Provando ad impostare l'equazione precedente, se trasmettessimo una volta ogni ora e mezza (facendo dunque 16 trasmissioni al giorno), otterremmo che la carica richiesta dal sistema sarebbe:

$$Q = \left(I_1 \cdot \frac{3600 \cdot 1.5 - 5}{3600 \cdot 1.5} + I_2 \cdot \frac{5}{3600 \cdot 1.5} \right) \cdot 1 \text{ h} = 0.208 \text{ mAh.} \quad (4.3)$$

L'energia consumata varrebbe quindi $E = 0.208 \text{ mAh} \cdot 6 \text{ V} = 1.25 \text{ mWh} = 4.5 \text{ J}$.

Avremmo dunque in questo modo l'autosufficienza.

Se volessimo monitorare più di frequente un determinato parametro potremmo però ad esempio anche trasmettere più di rado e continuare ad immagazzinare i dati rilevati dal sensore in una struttura dati che venga gestita dal microcontrollore.

Se infatti trasmettessimo tre volte al giorno, ma ogni ora memorizzassimo i dati nel microcontrollore, l'energia consumata sarebbe decisamente inferiore e noi riusciremmo ad alimentare senza problemi il sistema.

Conclusioni

Come dimostrato nel capitolo precedente, la tecnologia piezoelettrica per il vibration energy harvesting è decisamente molto promettente, sia per il basso costo, sia per la grande versatilità.

Molto importante nello studio fatto è stata la caratterizzazione iniziale della tensione in funzione della frequenza. Infatti, determinare le migliori condizioni operative per una determinata fonte di energia è fondamentale affinché si riesca a sfruttare al meglio ciò che essa può offrire. A questo scopo molto importante è stato anche dunque rilevare le relazioni tra tensione, corrente e potenza.

L'esempio applicativo ha infine dimostrato come un sistema piezoelettrico di energy harvesting possa essere utilizzato per alimentare un dispositivo che invii i dati di un sensore autonomamente, senza bisogno di essere alimentato da fonti esterne.

L'importanza dell'aver sistemi così cresce a braccetto con lo sviluppo delle WSN (Wireless Sensor Network). Più nodi IoT connessi tra loro e alimentati da sistemi come quello studiato in questa tesi possono infatti andare a creare una rete intelligente, autonoma e autosufficiente di condivisione dei dati.

Naturalmente questo non è l'unico modo di ricavare energia da ciò che ci sta intorno, ma è una delle tante validissime opportunità da tenere in conto nel mondo moderno.

Appendice A

Codice per calcolo frequenza di vibrazione

```
#include <MsTimer2.h>
const int buffer = 512; // Buffer size
int analogDataArray[buffer];
int count = 0;
int analogPin = A2;
int period = 1;
int oldZ;
bool state = false;
int timeBegin, timer;
int j=0;

void getDati() {
    if(j=1) timer = millis()-timeBegin;
    analogDataArray[count] = analogRead(analogPin);
    count++;
    if (count >= buffer){
        MsTimer2::stop();
        count = 0;
        for (int i = 0; i < 500; i++){
            Serial.println(analogDataArray[i]);
        }
        state = true;
    }
}
```

```

    j++;
    timeBegin=millis ();
}

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    analogReference(EXTERNAL);
    MsTimer2::set(period , getDati);
    MsTimer2::start ();
}

void loop() {
    if(state){
        int i = 100;
        if (analogDataArray[i]<600){
            while (analogDataArray[i]<600) i++;
            i-=1;
        }
        if (analogDataArray[i]>=600){
            while (analogDataArray[i]>=600) i--;
        }

        int k = i+1;
        while (analogDataArray[k]>analogDataArray[i]){
            count++;
            k++;
        }
        float frequency = 1000/(2*count*timer);
        Serial.print("Frequenza: ");
        Serial.println(frequency);
        state = false;
    }
}

```

Bibliografia

- [1] Orfei, F., Mezzetti, C. B., & Cottone, F. (2016, October). Vibrations powered LoRa sensor: An electromechanical energy harvester working on a real bridge. In *2016 IEEE SENSORS* (pp. 1-3). IEEE.
- [2] Sezer, N., & Koç, M. (2021). A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting. *Nano Energy*, *80*, 105567.
- [3] Han, Y., Feng, Y., Yu, Z., Lou, W., & Liu, H. (2017). A study on piezoelectric energy-harvesting wireless sensor networks deployed in a weak vibration environment. *IEEE Sensors Journal*, *17*(20), 6770-6777.
- [4] Peruzzi, G., & Pozzebon, A. (2020). A review of energy harvesting techniques for Low Power Wide Area Networks (LPWANs). *Energies*, *13*(13), 3433.
- [5] Jain, A., KJ, P., Sharma, A. K., Jain, A., & PN, R. (2015). Dielectric and piezoelectric properties of PVDF/PZT composites: A review. *Polymer Engineering & Science*, *55*(7), 1589-1616.
- [6] Hjort, A., & Holmberg, M. (2015). Measuring Mechanical Vibrations using Arduino as a slave I/O to an EPICS Control System.
- [7] Fort, A., Landi, E., Mugnaini, M., Parri, L., Pozzebon, A., & Vignoli, V. (2020). A Lo-RaWAN carbon monoxide measurement system with low-power sensor triggering for the monitoring of domestic and industrial boilers. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, *70*, 1-9.
- [8] Cappelli, I., Fort, A., Pozzebon, A., Tani, M., Trivellin, N., Vignoli, V., & Bruzzi, M. (2022). Autonomous IoT Monitoring Matching Spectral Artificial Light Manipulation for Horticulture. *Sensors*, *22*(11), 4046.

Ringraziamenti

Ringrazio il mio relatore, Prof. Alessandro Pozzebon, per avermi affiancato con passione in questi mesi.

Ringrazio la mia famiglia ed i miei nonni per avermi ispirato ed invogliato da sempre a studiare.

Ringrazio Sofia per essermi stata vicino ogni giorno in questi anni.

Ringrazio i miei amici, da Villa e dell'università, perchè la loro compagnia è stata un'importante fonte di svago.