



Ricerca di Sistema elettrico

## Valutazione e studio di fattibilità dei sistemi di energy harvesting per l'alimentazione dei sensori acustici

A. Laudani, G. M. Lozito, F. Riganti Fulginei, A. Salvini

## VALUTAZIONE E STUDIO DI FATTIBILITÀ DEI SISTEMI DI ENERGY HARVESTING PER L'ALIMENTAZIONE DEI SENSORI ACUSTICI

A. Laudani, G.M. Lozito, F. Riganti, A. Salvini (Dipartimento di Ingegneria – Università degli Studi Roma Tre)

Dicembre 2018

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2018

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: D.7 Sviluppo di un modello integrato di smart district urbano

Obiettivo: b Sistemi e servizi smart per edifici

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *Valutazione e studio di fattibilità dei sistemi di energy harvesting per l'alimentazione dei sensori acustici* .

Responsabile scientifico ENEA: Francesco Romanello

Responsabile scientifico Università di Roma TRE, Dipartimento di Ingegneria: A. Laudani

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	6
2.1 STUDIO DEI CONSUMI DEL SENSORE ACUSTICO INTELLIGENTE PER SMART HOME.....	6
2.2 SOLUZIONI DI ENERGY HARVESTING.....	8
2.2.1 <i>Celle piezoelettriche</i> .....	8
2.2.2 <i>Celle termoelettriche (effetto Peltier / effetto Seebeck)</i> .....	10
2.2.3 <i>Celle fotovoltaiche</i> .....	11
2.2.4 <i>Sistemi di alimentazione da energy harvesting</i> .....	14
2.2.5 <i>Lo storage nei sistemi di energy harvesting</i> .....	16
3 CONCLUSIONI.....	18
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	19

## Sommario

Nell'ambito dell'attività di ricerca oggetto di questa relazione, il gruppo di lavoro dell'Università di Roma Tre si è occupato della problematica dell'alimentazione autonoma di sensori acustici intelligenti sviluppati in un precedente progetto relativo al PAR 2017. Il punto di partenza è stato proprio il sensore acustico intelligente messo a punto, in quanto le funzionalità in esso implementate, ossia la possibilità di localizzare le sorgenti acustiche presenti nell'ambiente, richiedono la presenza di una scheda di controllo a microcontrollore che alimenti e gestisca almeno una coppia di sensori distribuiti nell'ambiente. Di conseguenza, in una prima fase sono stati considerati gli aspetti relativi ai consumi della scheda di controllo, realizzata tramite una scheda a microcontrollore tipo Arduino Uno. Questa scheda si interfaccia tramite un piccolo sistema di amplificazione a transistor con due sensori acustici realizzati con una capsula microfonica a condensatore. In questa fase la valutazione è avvenuta sia a partire dai dati di targa dei sistemi utilizzati, sia mediante misurazioni in laboratorio durante le condizioni di funzionamento standard. Al fine di ridurre i consumi sono state inoltre esaminate diverse possibili soluzioni, quali l'uso della modalità standby del sistema in assenza di rumore ambientale, la valutazione dei diversi componenti del sistema (compreso l'amplificatore di segnale), tenendo eventualmente in conto anche la sostituzione della scheda a microcontrollore con una soluzione energeticamente più efficiente. Per il risveglio del sistema dallo standby dovuto all'assenza di rumore è stata valutata la possibilità di sfruttare un terzo sensore acustico a capsula microfonica collegato ad un dispositivo a soglia regolabile. Questa scelta, sebbene permetta di ridurre i consumi, aumenta marginalmente il costo del sistema. In una seconda fase dell'attività sono state invece esaminate delle soluzioni di energy harvesting che contribuiscano all'alimentazione del sistema. Si è partiti da un'ampia analisi sui diversi sistemi disponibili e/o utilizzabili (celle fotovoltaiche, piezoelettriche o termiche e loro combinazioni), per poi raffinare le soluzioni che presentano le caratteristiche più interessanti per i nostri scopi, ossia le ridotte dimensioni, la ridotta interazione con l'ambiente esterno ed i costi contenuti. In questo senso le celle fotovoltaiche si sono rivelate le più adatte, in quanto poco invasive, sufficientemente economiche, e richiedenti un numero ridotto di componentistica elettronica aggiuntiva per il loro uso. Inoltre, tramite l'uso di celle a film sottile, ormai diffuse e con costi contenuti, è stato possibile sfruttare al meglio la luce ambientale tipica delle situazioni indoor (lampade a risparmio energetico o a led), che non viene invece assorbita al meglio dalle celle di Silicio mono o policristallino. Si è infine considerata la combinazione di questi sistemi di energy harvesting con piccoli sistemi di accumulo, quali batterie ricaricabili di diversa natura e/o super-condensatori, valutandone sia i costi assoluti, sia quelli relativi al costo sistema sensore acustico intelligente. Purtroppo l'impatto sui costi del sistema di energy harvesting si è dimostrato rilevante, portando nel caso migliore al raddoppio del costo dell'intero sistema, o quanto meno del sistema inteso nella sua versione base, alimentato da batterie standard e quindi senza particolari specifiche tecniche.

## 1 Introduzione

L'integrazione nell'ambiente domestico è un aspetto al giorno d'oggi imprescindibile durante lo sviluppo di un sensore per applicazioni smart home [1]. Nel limite delle specifiche di costo e di tipologia di applicazione, tre caratteristiche sono di fondamentale importanza: miniaturizzazione (per non essere visivamente invasivo e/o sgradevole); comunicazione wireless con il sistema centrale; alimentazione autonoma. Le ultime due esigenze sono legate sia alla facile installazione del sensore sia alla conseguente assenza di sgradevoli cablaggi. Sfortunatamente è difficile soddisfare contemporaneamente queste tre caratteristiche, che vanno spesso in contrasto tra loro. Ad esempio, l'alimentazione autonoma necessita di un gruppo di batterie (ingombro non trascurabile ed energia limitata), mentre le comunicazioni wireless e l'interfacciamento con i sensori veri e propri richiedono spesso una significativa potenza per avvenire a distanze adeguate all'applicazione. Nell'ambito del suddetto contesto, l'attività prevista nel contratto ENEA-UNIROMA3 è la valutazione dell'applicazione di metodologie di energy harvesting ai sensori acustici in sistemi smart home, studiati e sviluppati nell'ambito di un precedente progetto ENEA-UNIROMA3 dal titolo "Integrazione di sensori acustici in sistemi smart home ed implementazione di algoritmi per l'individuazione e la localizzazione di segnali acustici" relativo al PAR 2017 [2].

Durante questa passata attività, questi sensori acustici furono pensati e studiati in un'ottica di realizzazione a basso costo, mantenendo però la possibilità di implementazione di algoritmi innovativi per applicazioni smart home: idealmente possono essere impiegati per la segnalazione di allarmi o comandi, oppure per l'individuazione di rumori o segnali acustici specifici al fine di migliorare la qualità dell'ambiente domestico. Questi sensori acustici e le loro specifiche funzionalità sono stati il punto di partenza della presente attività di ricerca, nel corso della quale sono stati esaminati e valutati sia i consumi del sistema proposto, con particolare riguardo alla loro alimentazione attraverso batterie, sia delle soluzioni di energy harvesting in grado di aumentare la durata delle batterie. Con il termine Energy Harvesting si intende il processo di recupero e conversione di energia disponibile nell'ambiente. Questa energia, che in assenza di harvesting andrebbe naturalmente persa, viene catturata e convertita in energia elettrica disponibile per l'utilizzo diretto. In particolare, l'energia di interesse per l'harvesting deriva da tutte quelle sorgenti energetiche che esistono nell'ambiente senza che sia necessario attivare alcun meccanismo di generazione. Alcuni esempi sono forme di energia alternativa (solare, vento, ecc.), gradienti termici, vibrazioni meccaniche e così via. La possibilità di accoppiare tali sorgenti con i più moderni sistemi di a microcontrollore a bassa potenza permette di realizzare sensori che si autoalimentano (un tipico utilizzo di questa tecnica è usato per alimentare gli identificatori RFID). Nei paragrafi successivi saranno discusse sinteticamente le attività svolte ed i risultati ottenuti per i punti precedentemente elencati.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

Come già accennato, il punto di partenza dell'attività di ricerca relativa al contratto in oggetto è stato il sensore acustico messo a punto nell'ambito di un'attività precedente. La principale funzionalità del sensore, ossia la possibilità di localizzare le sorgenti acustiche presenti nell'ambiente, richiede sia l'implementazione di algoritmi nella scheda di controllo, sia che questa stessa scheda alimenti e gestisca almeno una coppia di sensori distribuiti nell'ambiente. In particolare, in una prima fase sono stati considerati gli aspetti relativi ai consumi della scheda di controllo, realizzata tramite una scheda a microcontrollore tipo Arduino Uno. Questa scheda gestisce due sensori acustici realizzati con una capsula microfonica a condensatore, dotati ciascuno di un piccolo sistema di amplificazione a transistor. Nella seconda fase, sono stati valutati i sistemi di energy harvesting utilizzabili in ambito home automation (celle piezoelettriche, fotovoltaiche e termiche) nonché i sistemi di alimentazione da utilizzare per sfruttare al meglio tali tecnologie [3-4].

### 2.1 Studio dei consumi del sensore acustico intelligente per smart home.

Il sensore acustico intelligente realizzato, tramite la scheda a microcontrollore Arduino UNO, nel suo complesso può essere schematizzato tramite la figura 2.1.

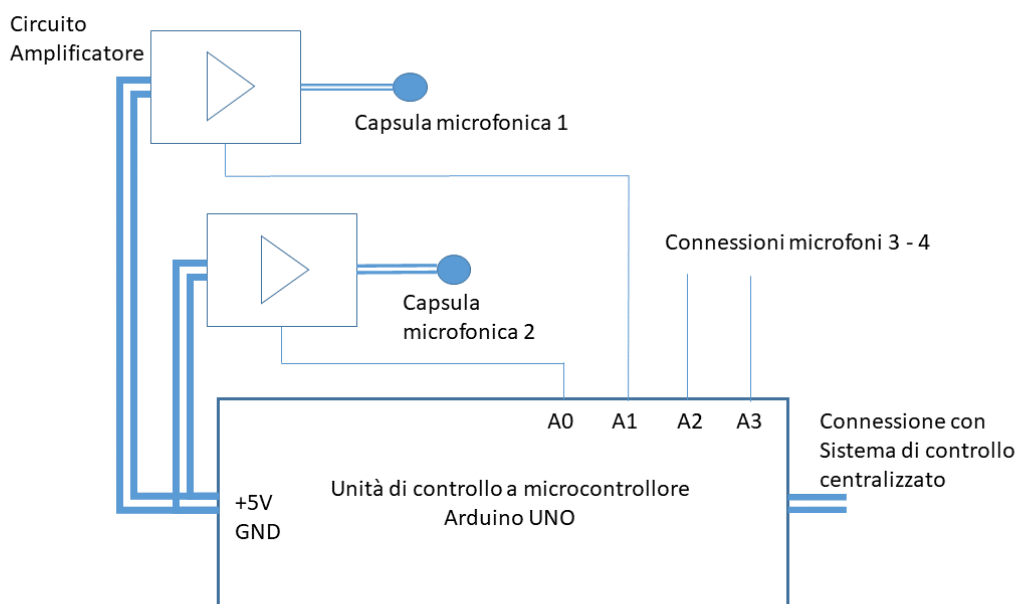


Figura 2.1 – Schematizzazione della scheda che realizza il sensore acustico intelligente

Per la valutazione dei consumi di un tale sistema si deve quindi partire dalla scheda di controllo, senza però trascurare i sensori microfonici con i loro sistemi amplificazione. A tal proposito ricordiamo che il protocollo di acquisizione implementato usa una coppia di capsule microfoniche alla volta, e quindi ci si può limitare a considerare di volta in volta alimentata ciascuna coppia. Questo necessita qualche semplice modifica nella connessione dei componenti, ma permette la riduzione dell'assorbimento complessivo di qualche mA. In ogni

caso la valutazione dei consumi è avvenuta sia a partire dai dati di targa dei sistemi utilizzati, sia mediante misurazioni in laboratorio durante le condizioni di funzionamento standard.

In particolare, si è tenuto in conto delle problematiche relative all'alimentazione della scheda Arduino UNO nell'ambito di un sistema stand-alone. Infatti in queste condizioni la scheda Arduino UNO non riceverà l'alimentazione tramite USB (come nel caso di connessione al computer), ma potrà essere alimentata o tramite una batteria da 9 V o tramite un sistema ad hoc a 5V tramite il connettore USB o bypassando il regolatore di tensione (notiamo che un'alimentazione a 3.3V non è possibile sulla scheda Arduino UNO). Dai dati di targa e dalle nostre esperienze in laboratorio si è ricavato che in normali condizioni di funzionamento, alimentando la scheda Arduino tramite il connettore predisposto ed una batteria da 9 V, l'assorbimento di corrente si attestava intorno ai 50 mA, a cui si andavano ad aggiungere poco meno di 2 mA per ogni amplificatore a BJT adottato per ciascun microfono a capsula collegato. Una situazione simile si verifica nel caso di alimentazione tramite USB. Si noti che quando ci si riferisce alle normali condizioni di funzionamento, indichiamo quelle dell'uso specifico del sensore acustico, in quanto già l'attivazione di una qualsiasi porta di uscita, collegata ad esempio ad un LED per indicare il verificarsi di un evento, farà aumentare l'assorbimento di qualche mA (fino ad una decina a seconda del dimensionamento effettuato). Chiaramente quindi volendo un sistema a consumo basso, è consigliabile evitare qualsiasi ulteriore collegamento. Si noti che il consumo dovuto agli amplificatori a BJT per i microfoni è estremamente ridotto. Nonostante ciò è stato indagato quali vantaggi potesse portare la sostituzione del sistema di amplificazione messo a punto con un circuito di amplificazione standard basato sull'integrato LM386. Purtroppo questa soluzione non riduce l'assorbimento di corrente, in quanto anche in assenza di segnale il circuito integrato LM386 assorbe più di 4 mA, ossia più di quanto assorbano i due sistemi di amplificazione da noi adottati.

Al fine di ridurre i consumi, sono state inoltre esaminate diverse possibili soluzioni tra le quali l'eliminazione di alcune funzionalità della scheda Arduino Uno che non vengono allo stato attuale utilizzate (ad esempio quella della comunicazione via USB, di alcuni LED attivi sulla scheda), e soprattutto l'utilizzo di un'alimentazione diretta regolata a 5 V tramite sistemi dedicati (di seguito discussi), in modo da disabilitare i regolatori presenti sulla scheda, che sono tra gli elementi che maggiormente influenzano l'assorbimento di corrente. Una ulteriore riduzione può essere ottenuta implementando una modalità di stand by. Infatti le schede Arduino prevedono per il microcontrollore una modalità sleep a ridotte funzionalità, nella quale il consumo del microcontrollore scende al valore di qualche mA. Questo permette di ridurre notevolmente l'assorbimento di corrente fino a portarlo a circa 20 mA. Nel nostro caso, il sistema può mettersi in stand by in assenza di rumore ambientale. Per il risveglio del sistema dallo standby in questo caso è stata valutata la possibilità di sfruttare un terzo sensore acustico a capsula microfonica, collegato però ad un dispositivo a soglia regolabile. Questa scelta, sebbene permetta di ridurre i consumi, aumenta marginalmente il costo del sistema (sensori di questo tipo sono disponibili sul mercato al costo di qualche euro). Purtroppo ulteriori riduzioni sono possibili solo cambiando sistema a microcontrollore e/o sviluppando un sistema ad hoc. Tra le possibili scelte di schede alternative, si è valutato il sistema Arduino Pro Mini, che può essere alimentato a 3.3V o a 5V secondo i modelli della scheda. Essendo basato sullo stesso microcontrollore dell'Arduino UNO, l'Atmel ATmega328P, ed avendo gli stessi input/output si può utilizzare senza alcuna difficoltà lo stesso firmware. Le maggiori differenze riguardano le dimensioni (la scheda Pro Mini ha dimensioni ridotte rispetto alla UNO), l'assenza del sistema di connessione tramite USB (per la programmazione richiede un connettore specifico) e l'alimentazione che può avvenire a seconda dei modelli a 3.3 V o a 5 V.

È bene sottolineare che l'alimentazione è un aspetto fondamentale inerentemente ai consumi. Esistono schede Arduino pro mini alimentabili a 3.3V con un clock a 8 MHz e schede alimentabili a 5 V con un clock a 16 MHz. Poiché il nostro sistema implementa un'acquisizione tramite microfoni con un campionamento a 4 kHz, l'uso del sistema alimentato a 3.3 V non è direttamente possibile se non previa modifiche nell'algoritmo di calcolo dei tempi e taratura dei ritardi, che può essere fatta solo attraverso una serie di prove sperimentali. Da punto di vista pratico dei consumi, comunque, il passaggio dalla scheda Arduino UNO alla Arduino Pro Mini, riduce i consumi in maniera drastica, basti pensare che dai dati disponibili sul data sheet si può stimare un consumo riducibile fino a meno di 13 mA in condizioni normali che diventano meno di 0.01mA in condizioni di sleep per la versione a 5 V. I consumi sono riportati nella tabella 2.1 di seguito proposta.

**Tabella 2.1 – Consumi della scheda Arduino Pro Mini in diverse configurazioni**

Configurazione	Stato	Consumo in mA 5.0 V @ 16 MHz	Consumo in mA 3.3 V @ 8 MHz
Standard	Attivo/Sleep	19.9/3.14	4.74/0.90
Senza LED di stato	Attivo/Sleep	16.9/<0.1	3.9/<0.1
Senza LED di stato e bypassando il regolatore	Attivo/Sleep	12.7/<0.01	3.58/<0.01

## 2.2 Soluzioni di energy harvesting

La seconda fase dell'attività ha riguardato la valutazione vera e propria di soluzioni di energy harvesting in ambiente domotico, che possano contribuire all'alimentazione del sistema. Il punto di partenza è stato dato dall'esperienza del gruppo nel settore dell'energy harvesting, ma si è portata avanti un'ampia analisi sui diversi sistemi disponibili e/o utilizzabili in ambienti indoor. La specifica "indoor" ha direzionato l'analisi sui sistemi basati su celle fotovoltaiche, piezoelettriche o termoelettriche. Ne è stata parzialmente considerata anche la loro combinazione. Di seguito vengono riportate le considerazioni effettuate anche tramite delle prove in laboratorio, nonché l'analisi sui sistemi hardware disponibili per queste tipologie di applicazioni.

### 2.2.1 Celle piezoelettriche

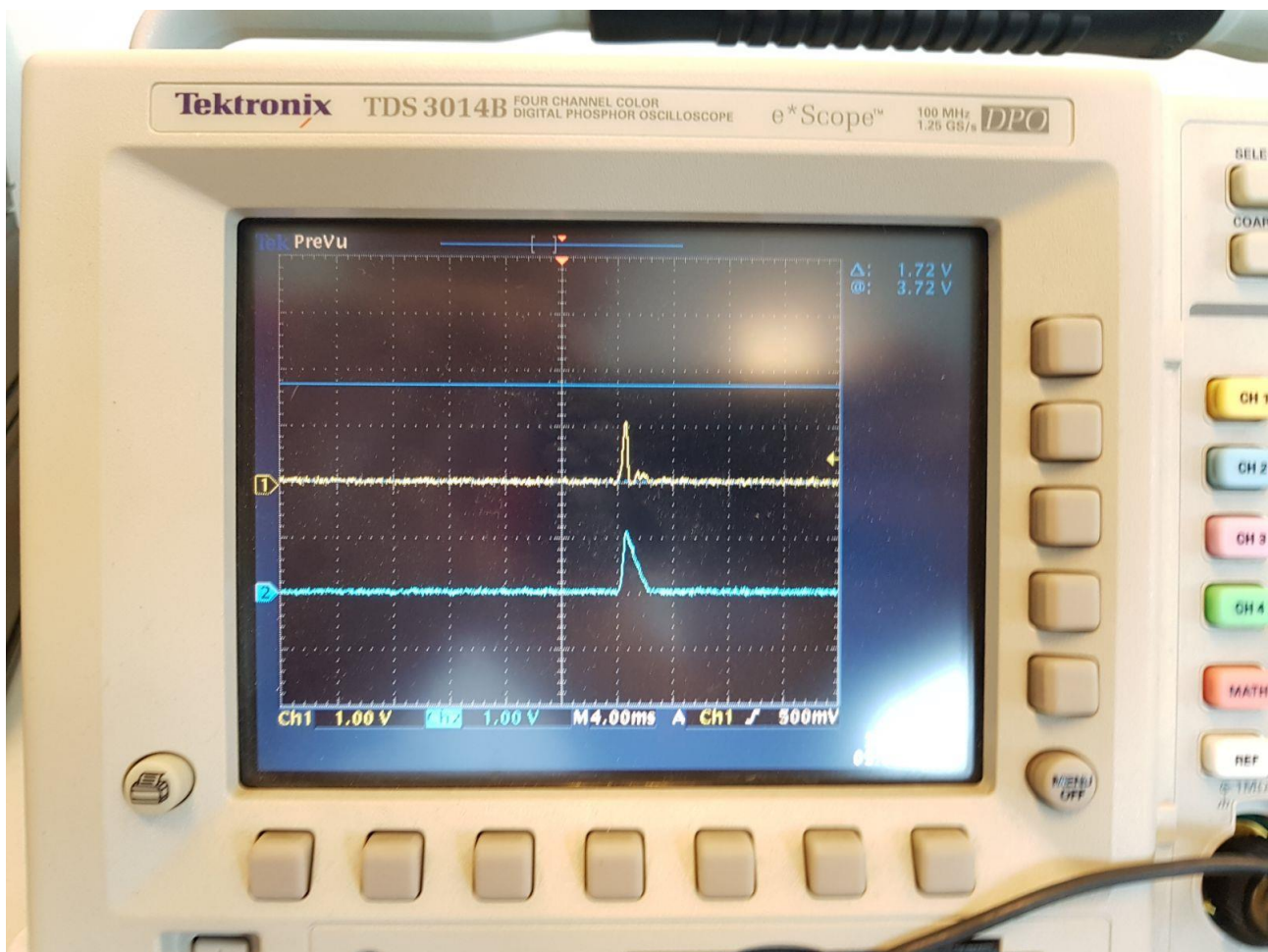
L'energy harvesting da sollecitazioni meccaniche può essere fatto mediante celle piezoelettriche [3-6]. L'uso di materiali piezoelettrici è abbastanza comune, basti pensare agli accendini ed alla scintilla che accende la fiamma prodotta da uno stress meccanico su un materiale ceramico. Nelle applicazioni di energy harvesting sorgono due fondamentali problemi con sorgenti piezoelettriche. Il primo è elettrico, ed è legato alla natura impulsiva dell'energia generata. Il secondo è di tipo meccanico, ed è legato alla necessità di generare una eccitazione controllata sul sistema piezoelettrico. Gli eventi che possono generare eccitazione possono essere di pressione variabile (ad esempio quella che può avvenire su un foglio piezoelettrico posto sopra una superficie calpestabile) o di tipo vibrazionale, dovuti a fenomeni di oscillazione in qualche modo innescata (ad esempio immaginiamo l'oggetto collegato alla ruota di una bicicletta e messo in vibrazione tramite i raggi della stessa). In ambiente indoor purtroppo è difficile immaginare sistemi che possano produrre vibrazioni, se non collegando il piezoelettrico a qualche apparecchiatura elettrodomestica particolare, e quindi nel seguito del testo ci riferiremo solo all'applicazione tramite piezoelettrici attivati tramite pressione. Questa tipologia di celle si presentano come fogli sottili (da qualche micron a qualche decimo di millimetro) in grado di generare una corrente elettrica in seguito ad una pressione o vibrazione. Possono essere vendute con o senza involucro e trovano la loro maggiore applicazione nell'ambito della sensoristica. Al di fuori di questo ambito, essendo questi dispositivi dei piccoli generatori a tutti gli effetti, possono essere sfruttati come elementi per l'energy harvesting. Sono stati quindi oggetto di analisi come possibili elementi da utilizzare per il supporto all'alimentazione del sensore acustico. In particolare sono state prese in considerazione e testate due diverse tipologie di celle: una in PVDF (PoliVinilDenFluoruro) in film sottile con dimensioni 5 cm x 5 cm con spessore micrometrico e contatti metallici su entrambe le facce; una composta da un polimero ceramico, denominata DuraAct™ Piezoelectric Patch Transducer (876.A12), dello spessore di qualche decimo di millimetro e di dimensioni circa 3 cm x 5 cm (vedi figura 2.2).





**Figura 2.2 – Da sinistra a destra: cella in PVDF, cella DuraAct e sistema basato sul LTC3588 per l’energy harvesting**

La differenza principale tra le due tipologie di celle riguarda il materiale piezoelettrico utilizzato, ma si notano pure caratteristiche diverse in termini di tipologia di connessioni ed utilizzo. La cella in PVDF si presenta estremamente flessibile (può essere arrotolata senza alcun problema), ma molto delicata dal punto di vista della contattatura. Infatti non è possibile saldare i contatti ad alte temperature e quindi bisogna affidarsi ad un contatto a pressione. La cella della DuraAct si presenta invece inserita in un involucro plastico abbastanza rigido (se piegata oltre un certo angolo si spezza), ma è fornita di pad elettrici per la realizzazione dei contatti. Purtroppo i test effettuati in laboratorio (tramite l’uso di una scheda basata sull’integrato LTC3588 e che sarà discussa in seguito) su entrambe le tipologie di celle hanno mostrato un comportamento elettrico praticamente analogo, caratterizzato da un basso trasferimento energetico. In figura 2.3 è presentato il tipico *spike* di tensione (in giallo) dovuto ad una sollecitazione della cella registrato tramite l’oscilloscopio sul piedino di ingresso dell’integrato LTC3588 e la tensione trasferita su un piccolo capacitore (in azzurro), con la sua conseguente scarica. Attraverso ripetute valutazioni si è ricavato che l’energia trasferita durante una singola sollecitazione è dell’ordine dei pJ, ossia praticamente trascurabili.



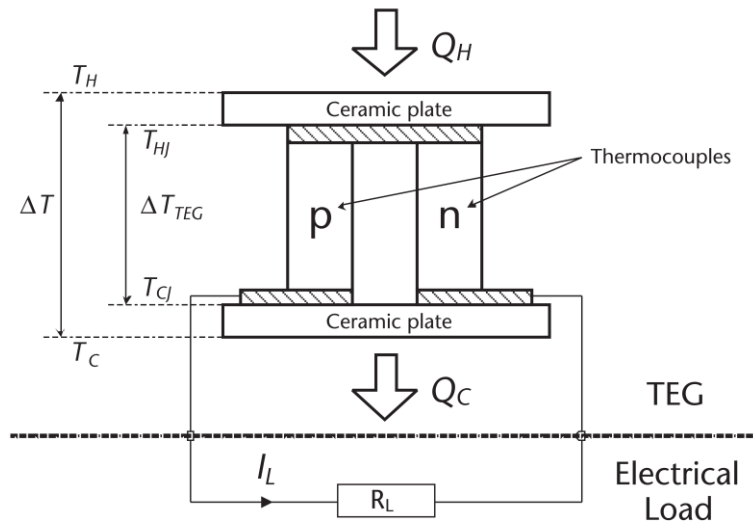
**Figura 2.3 Spike di tensione (in giallo) dovuto ad una sollecitazione della cella e la tensione trasferita su un piccolo capacitore (in azzurro)**

Inoltre, sono state riscontrate notevoli problematiche di interfacciamento elettrico, dovuto ai livelli di tensione in output (sotto un volt) e alla necessità dell'uso di raddrizzatori, in quanto la tensione in uscita si presenta come un serie di impulsi sia positivi che negativi. Se si considera il costo proibitivo di queste celle (ciascuna sui 100 euro), risulta chiaro che tali sistemi mal si prestano all'utilizzo come energy harvester nel nostro caso.

### 2.2.2 Celle termoelettriche (effetto Peltier / effetto Seebeck)

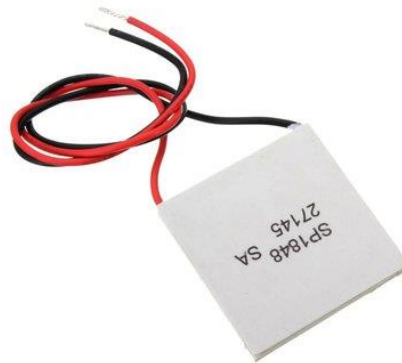
Gradienti di temperatura e flussi di calore sono presenti comunemente nell'ambiente che ci circonda. Ad esempio il calore disperso dai motori degli autoveicoli, il calore geotermico nel sottosuolo, il calore nelle acque di raffreddamento degli impianti industriali. In ambito domestico, è presente calore in corrispondenza di caloriferi, di alcuni elettrodomestici quali forni, fornelli o pompe per le acque. Inoltre, anche il corpo umano può essere una sorgente di calore. Tutte queste fonti di calore possono essere usate per l'harvesting energetico tramite l'uso di celle termoelettriche. I generatori termoelettrici, come ad esempio quello da noi considerato ossia l'SP1848-27145, non sono altro che strutture multi-layer che sfruttano gli effetti Peltier o Seebeck per funzionare come una sorta di pompa di calore e/o di generatore elettrico. L'effetto Seebeck può essere descritto semplicemente: se una parte di un conduttore elettrico lineare è riscaldata in modo che una differenza di temperatura si manifesti lungo la sua lunghezza, tale differenza di temperatura determinerà una differenza nei livelli energetici di Fermi tra la parte calda e quella fredda ed in conseguenza un differenza di potenziale. Dal punto di vista pratico per poter sfruttare questo principio si deve costruire una struttura un po' più complessa: la cella termoelettrica è formata da due semiconduttori di tipo diverso (p e n), connessi

elettricamente in serie, ma termicamente in parallelo come in figura 2.4. Due placche ceramiche (isolanti elettricamente, ma conduttive termicamente) formano le connessioni tra la sorgente di calore e la parte fredda. L'energia prodotta è direttamente proporzionale alla differenza di temperatura tra le due facce [3,4, 7,8].



**Figura 2.4 – Schematizzazione della cella termoelettrica (da [4], pag 198)**

Nel caso specifico della cella SP1848-27145, mostrata in figura 2.5 e da noi usata nei test, troviamo in uscita una tensione in continua fino a 4.8 V, con una corrente massima erogabile di 669mA. Le dimensioni del dispositivo sono 40 x 40 x 4mm.



**Figura 2.5 – Generatore termoelettrico SP 1848-27145**

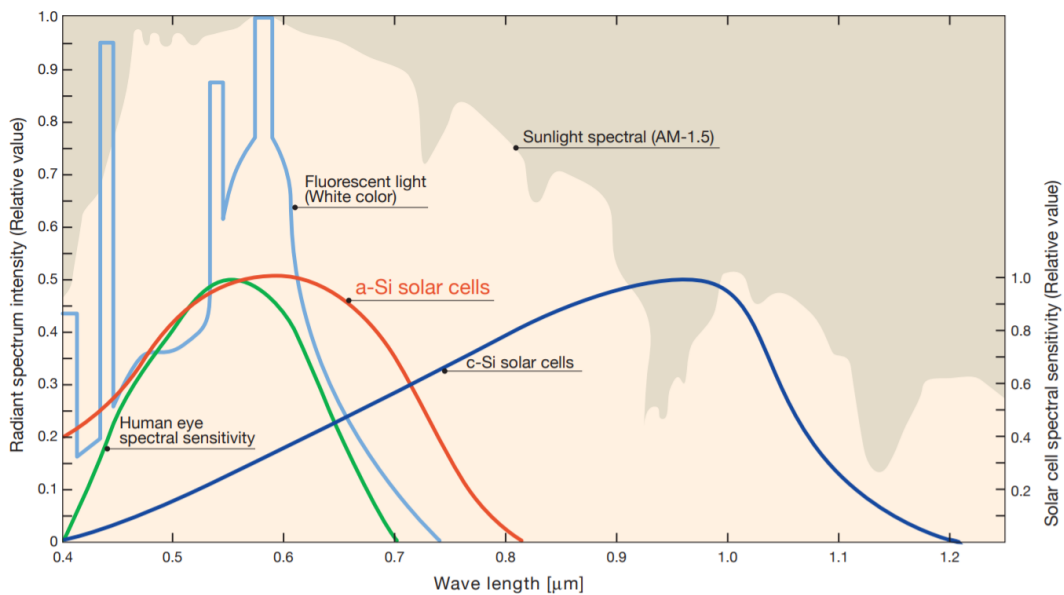
Dal punto di vista modellistico, questa cella ha una caratteristica che dipende notevolmente dalla differenza di temperatura, e richiede un gradiente termico di oltre 20 gradi per ottenere in uscita una tensione superiore ad 1 Volt. Sebbene i costi siano contenuti, tra 3 e 4 euro, la necessità di disporre di una superficie calda per il suo funzionamento ne limita l'applicazione al caso in esame, come è stato verificato durante i test effettuati. Ciò non toglie che tale tipologia di soluzione si possa rilevare utile in particolari condizioni, ossia quando disponiamo nell'ambiente considerato di una sorgente di calore importante e disponibile per diverse ore al giorno (ad esempio in un locale tecnico)

### 2.2.3 Celle fotovoltaiche

L'harvesting da sorgenti luminose consiste nello sfruttare la conversione fotovoltaica per trasformare in energia elettrica la luminosità funzionale che hanno gli ambienti indoor [3, 4]. In ambiente domestico l'illuminamento è generalmente compreso tra 100-200 Lux, per raggiungere 500 Lux in ambienti lavorativi.

In termini di irradianza, anche su un banco di lavoro ben illuminato, si raggiungono difficilmente più di 50W/m<sup>2</sup>. Queste quantità sono estremamente più basse di quelle relative all'illuminazione naturale da sorgente solare (~10<sup>3</sup> Lux e 1000W/m<sup>2</sup> di irradianza), e per questo motivo, la conversione fotovoltaica deve essere effettuata con dispositivi specificamente pensati per questo genere di applicazioni.

In particolare, la tecnologia del silicio amorfo (a-Si), usata per la realizzazione di celle fotovoltaiche a film sottile, è di particolare interesse. Le caratteristiche elettriche della conversione fotovoltaica del a-Si sono in generale inferiori rispetto a quelle ottenute con dispositivi basati sul silicio cristallino. Tuttavia i processi tecnologici usati per la creazione di dispositivi in a-Si permettono di realizzarli con spessori estremamente sottili. Sovrapponendo più strati sottili è possibile creare delle celle fotovoltaiche in cui ogni strato è dedicato allo specifico assorbimento di una lunghezza d'onda, migliorando quindi l'efficienza spettrale del dispositivo. Questa caratteristica è estremamente importante per applicazioni indoor, dove la radiazione luminosa ha uno spettro concentrato in righe molto strette (dovuto a lampade a led e a fluorescenza), come mostrato in figura 2.6.



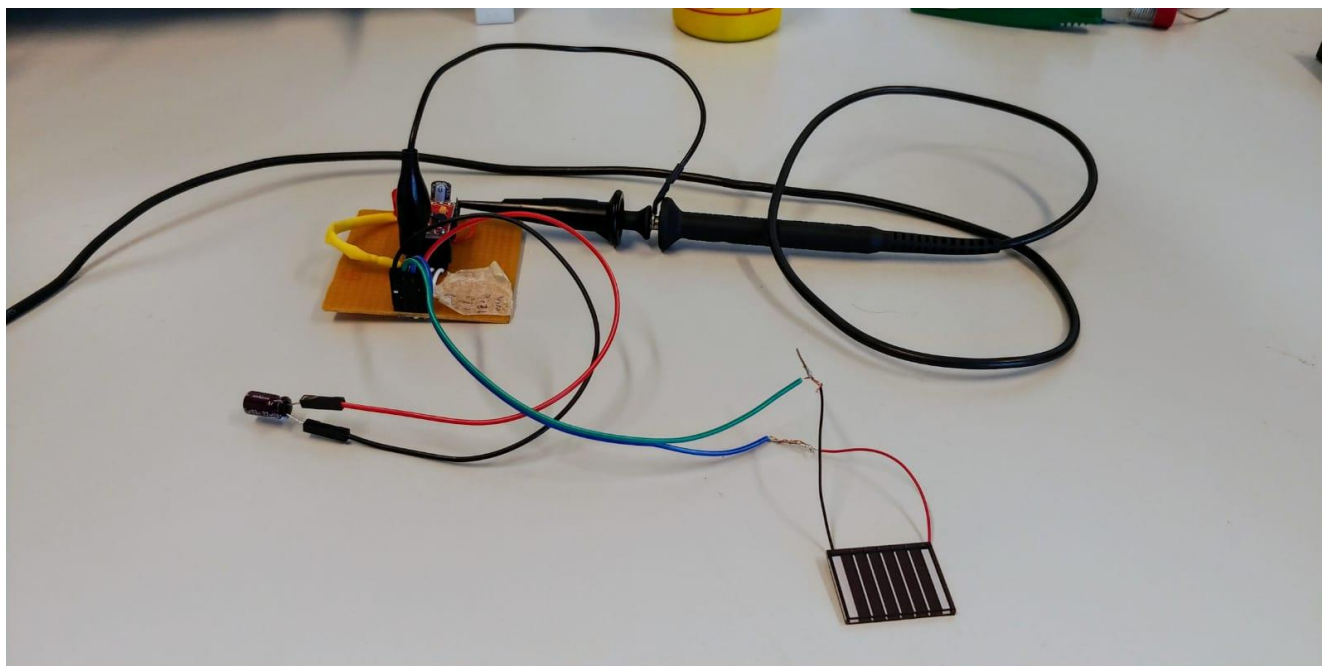
**Figura 2.6 - Risposta spettrale dei dispositivi amorfi (a-Si), cristallini (c-Si) rispetto alla luce naturale e alla illuminazione artificiale [10]**

I produttori di dispositivi fotovoltaici forniscono degli specifici prodotti per applicazioni indoor. In particolare, la *Sanyo Semiconductors* ha una linea di dispositivi a-Si di piccole dimensioni (serie Amorton) che sono stati ingegnerizzati per dare la miglior risposta spettrale in condizioni di illuminazione artificiale. A seconda delle necessità in termini di tensione e corrente, e dello spazio a disposizione, sono disponibili una ampia gamma di scelte. In figura 2.7 è possibile vedere i due estremi, dalla più piccola cella della gamma (AM-1356CA) alla più grande (AM-1816CA). Il prezzo è inferiore a 2€ per la prima, e inferiore a 10€ per la seconda.



**Figura 2.7 - Due celle della serie Amotron. A sinistra, la AM-1456CA, il dispositivo più piccolo della serie Amorton. Fornisce 5.3uA a 1.5V in un ambiente illuminato a 200 Lux, dimensioni 25x10mm. A destra, la AM-1816CA, uno dei dispositivi più grandi, fornisce 21uA a 2.6V in un ambiente illuminato a 200 Lux, dimensioni 96x56mm.**

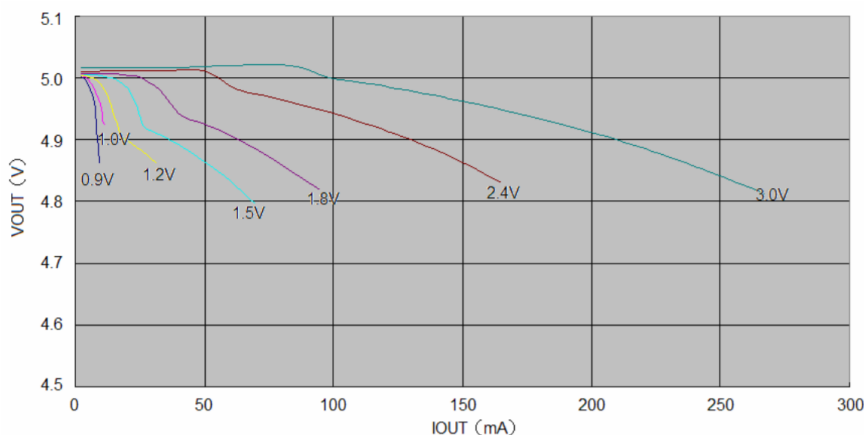
Nei test in laboratorio, si è scelto di adottare una soluzione intermedia rispetto alle due precedentemente indicate, che garantisca prestazioni buone sia con illuminazione artificiale che con illuminazione naturale, ossia la cella Amorton AM 5610. Le prove sperimentali effettuate hanno dimostrato che una singola cella può fornire più di 1 mA se illuminata da luce naturale, e circa 50uA in condizioni di luce artificiale (figura 2.8). I test hanno inoltre mostrato un netto divario tra l'efficienza ottenibile tramite questo tipo di celle e quella che ci può essere data invece da celle equivalenti in termini di caratteristiche in silicio cristallino, il che è stato confermato anche dalla modellistica [10]. Questi sistemi sono sicuramente idonei per l'applicazione per i sensori acustici e quindi sono stati considerati nell'ambito del dispositivo complessivo di alimentazione in termini di sorgente fondamentale di energia. Chiaramente questi valori sono estremamente bassi per le nostre esigenze e quindi si deve considerare un tale sistema come ausilio all'alimentazione, senza poter eliminare la necessità di una batteria. Di seguito analizzeremo il sistema di alimentazione studiato nel complesso, mentre ulteriori dettagli sulla cella fotovoltaica sono riportati nella relazione completa.



**Figura 2.8 – Cella Fotovoltaica AM 5610, collegata al sistema di energy harvesting basato su LTC 3588, discusso nel paragrafo 2.2.4**

### 2.2.4 Sistemi di alimentazione da energy harvesting

I circuiti di gestione della potenza nell'ambito dell'energy harvesting assumono un ruolo fondamentale. Infatti questi circuiti devono garantire la possibilità di assorbire la maggior energia possibile ed il loro funzionamento deve variare in ragione della tipologia di sorgente considerata, ossia che la si possa modellare come una sorgente in corrente (come nel caso fotovoltaico) o in tensione (come nel caso piezoelettrico e termico) [4]. In generale, per ottenere l'innalzamento di tensione da valori tipici di sorgenti energy-harvest (1-2V) ai 5V stabilizzati necessari per l'alimentazione dei dispositivi a microcontrollore è necessario l'utilizzo di un convertitore step-up. Questi convertitori sono implementati in schede integrate fornite di un sistema di switching (spesso di tipo monolitico, implementato in un integrato dedicato), la circuiteria discreta necessaria per il suo funzionamento (tipicamente induttori e condensatori) e due porte di accesso, una a bassa tensione (di ingresso), una USB a 5V (di uscita). In particolare, una scheda usata in laboratorio è basata sul sistema di switching per step-up CE8301. Questo dispositivo è un integrato a quattro terminali che implementa al suo interno sia lo switch (a MOSFET) sia un sistema di pilotaggio basato su controller PFM (Pulse Frequency Modulation). Il sistema di pilotaggio dello switch, tramite un sistema di retroazione, garantisce una uscita stabile e costante a 5V nei limiti delle specifiche di funzionamento. In particolare, la conversione può iniziare da 0.9V di ingresso, con i quali si ottiene una uscita a 5V a circa 10mA (dalla documentazione fornita dal produttore, viene garantito 1mA minimo). Aumentando la tensione di ingresso, aumenta la massima corrente disponibile in uscita, fino ad un massimo di 5V/100mA per una tensione di ingresso di 2.4V. L'andamento può essere osservato in Figura 2.9 (dx).

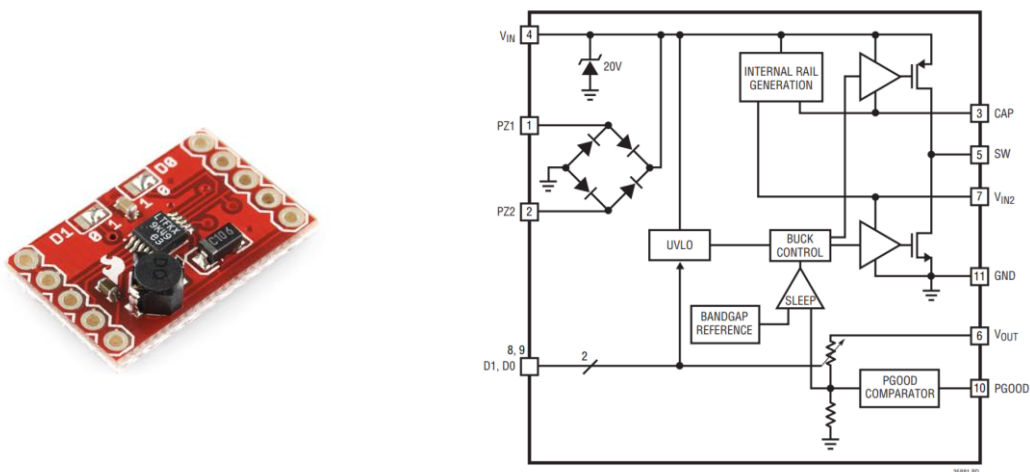


**Figura 2.9 Una tipica scheda con uscita USB che realizza il convertitore e la caratteristica d'uscita tensione [11].**

In figura 2.9 (sx) è possibile vedere una delle numerose schede da integrazione disponibili sul mercato. Queste schede presentano una soluzione completa per la conversione, implementando su di esse il circuito completo per il corretto funzionamento del CE8301. In particolare, la scheda in figura 2.9 è fornita di una piccola capacità di stabilizzazione, un led di funzionamento, e un diodo Schottky a bassa caduta di tensione come misura di sicurezza in serie alla porta USB.

Per l'applicazione specifica di nostro interesse il sistema di alimentazione da energy harvesting pensato è costituito da una o più piccole celle fotovoltaiche, connesse in serie e/o parallelo tra loro e quindi la tensione disponibile da parte dell'energy harvester potrebbe non essere necessariamente piccola. In questo caso, dal punto di vista circuitale, un'alternativa al circuito precedente può essere data da un sistema basato sull'integrato LTC3588 della Linear Technologies. In particolare per i test di laboratorio è stata usata la scheda di sviluppo SparkFun Energy Harvest (vedi figura 2.10 sx) basata su questo circuito integrato. L'LTC3588 implementa al suo interno diversi sotto-sistemi al fine di offrire una soluzione completa ed integrata per

energy harvesting a partire da sorgenti ad alta impedenza di uscita, quali sistemi piezoelettrici, magnetici o fotovoltaici. I sotto-sistemi principali integrati nel dispositivo (Fig. 2.10 dx) sono un rettificatore a doppia semionda con basse perdite di tensione, un regolatore DC-DC Buck ad alta efficienza e un sistema di interruzione del funzionamento a soglia di tensione (Undervoltage Lockout, UVLO) con basse correnti di quiescenza (circa 450nA). Il rettificatore è accessibile dai due pin PZ1 e PZ2 e presenta una caduta di tensione di circa 400mV con correnti dell'ordine dei 10uA. La massima corrente trasportabile dal rettificatore è di 50mA. La tensione rettificata viene usata per caricare una capacità collegata al pin  $V_{IN}$ , la cui tensione è monitorata dal sistema UVLO per l'attivazione e la disattivazione del DC-DC. Questo sistema di controllo permette un corretto funzionamento anche in caso di caricamento discontinuo ed irregolare delle capacità di ingresso, tipico dell'energy-harvesting. Una volta raggiunta la tensione minima di conversione (2.7V) il DC-DC esce dalla modalità Lockout e procede alla conversione. L'ingresso è protetto contro sovra-tensioni da un diodo zener che permette di abbattere tensioni superiori a 20V (il massimo della tensione operativa del dispositivo) con un pull-down da 25mA. La tensione di uscita dell'intero sistema è regolabile tramite pin tra 1.8V, 2.5V, 3.3V e 3.6V, con correnti fino a 100mA. La tensione di 3.3V è di particolare interesse per l'applicazione, essendo utile per l'alimentazione diretta di gran parte dei dispositivi a microcontrollore, come ad esempio l'Arduino Pro Mini. Anche la tensione in uscita è monitorata da sistema a comparatore, e quando raggiunge il valore desiderato solleva il pin PGOOD. L'integrato LTC3588 è di tipo SMD (Surface Mount Device), ed è quindi di difficile integrazione all'interno di prototipi da laboratorio. Il vantaggio principale introdotto dalla scheda di sviluppo Spark-Fun è un pin-out standard accessibile tipo Dual-in-line. Inoltre, sono presenti i componenti di induttanza e capacità necessari per il funzionamento del convertitore Buck, permettendo la diretta integrazione di questa scheda di sviluppo in un sistema richiedente una alimentazione da energy-harvest. In considerazione della applicazione finale, anche le ridotte dimensioni complessive (~2x1cm) sono particolarmente desiderabili.



**Figura 2.10 Scheda di sviluppo SparkFun Energy Harvest (sinistra) e schema a blocchi funzionale del dispositivo LTC3588 montato su di essa (destra) [12]**

Chiaramente il sistema deve immaginarsi alimentato da una batteria. È quindi conveniente, a partire dai sistemi descritti, prevedere lo sviluppo di un circuito ad hoc, basato sui dispositivi citati che gestisca la carica della batteria. Inoltre va anche considerata la possibilità di utilizzare un super-condensatore in congiunzione alla batteria, per permettere una migliore gestione del sistema stesso e soprattutto garantire una maggiore durata della batteria. La valutazione dell'aggiunta del super-condensatore è ovviamente da considerare in

relazione ad un ulteriore aumento del costo della scheda. Alcune considerazioni su questo tema vengono presentate nel paragrafo successivo.

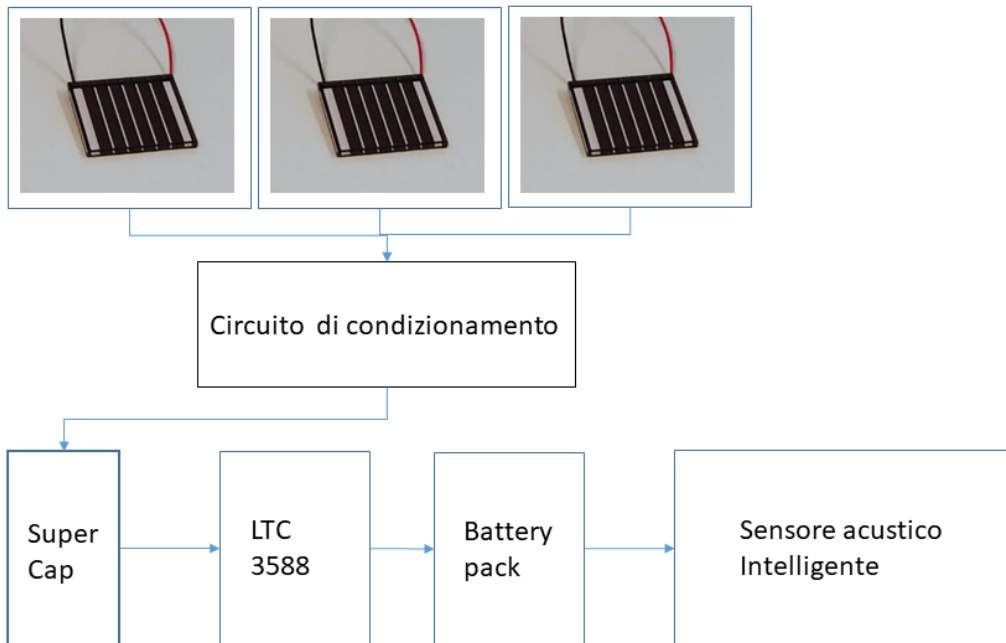
### 2.2.5 Lo storage nei sistemi di energy harvesting.

Un problema sostanziale dei sistemi di energy harvesting è la loro incapacità di fornire energia in maniera costante per periodi continuativi di tempo [3,4]. Per esempio, una cella solare può produrre energia esclusivamente quando viene illuminata, e un sistema piezoelettrico produce energia esclusivamente quando è soggetto ad una eccitazione meccanica. Tuttavia, molte applicazioni di energy-harvesting richiedono un flusso continuo di energia verso un utilizzatore. È necessario considerare l'assorbimento medio di potenza da parte del carico. Se la potenza media assorbita dal carico è maggiore della potenza media generata dall'harvester, sicuramente non è possibile alimentare il carico. Se però la potenza media è maggiore di quella assorbita, è possibile alimentare il carico avendo cura di ridistribuire temporalmente l'energia. Quando la potenza istantanea generata dall'harvester è maggiore dell'assorbimento istantaneo del carico, l'energia in eccesso viene immagazzinata in un sistema di accumulo. Quando invece la potenza istantanea generata dall'harvester è minore dell'assorbimento istantaneo del carico, la quota parte di energia necessaria per il corretto funzionamento del carico viene assorbita dal sistema di accumulo. In particolare, il sistema di accumulo è di fondamentale importanza per gestire transitori ad alto assorbimento di potenza, come quelli di avvio dei sistemi elettronici.

I dispositivi usati per accumulare l'energia sono basati su batterie e super-condensatori. L'uso di un super-condensatore come sistema di accumulo ha come vantaggio la semplicità di trasferimento di energia dall'harvester al sistema di accumulo. Il super-condensatore infatti è a tutti gli effetti un condensatore con valore di capacità estremamente elevato. Il trasferimento di energia verso di esso è quindi riconducibile alla carica di un condensatore in un circuito RC (dove la resistenza è rappresentativa dei componenti parassiti) per il quale è sufficiente che l'harvester generi, in uscita, una tensione controllata. A differenza delle batterie, per le quali l'aspetto temporale della carica (i.e. la corrente di carica) è critico, un super-condensatore è molto flessibile e si adatta bene al regime discontinuo di carica dei sistemi di energy harvesting. È necessario tuttavia tenere in considerazione che, come qualsiasi condensatore, anche il super-condensatore ha un limite superiore in tensione oltre il quale avviene la rottura del dielettrico. Il sistema di harvesting deve quindi monitorare costantemente la tensione nel super-condensatore ed arrestare il trasferimento di energia prima del punto di rottura. Un ulteriore svantaggio dei super-condensatori è indubbiamente la curva di scarica esponenziale. A differenza di una batteria, per la quale la tensione si mantiene pressoché costante durante gran parte del processo di scarica, un super-condensatore esibisce una diminuzione esponenziale della tensione ai suoi capi durante la scarica. Questo si traduce nella necessità di implementare un sistema di conversione DC-DC in grado di gestire un ampio range di tensioni di ingresso.

I sistemi a batteria hanno problemi complementari rispetto ai sistemi a super-condensatori. L'aspetto più critico è la temporizzazione della carica (i.e. la regolazione della corrente di carica), sia per motivi di sicurezza (in particolare per accumulatori al litio), sia per evitare la riduzione dei cicli di carica-scarica del dispositivo. Un ulteriore aspetto da considerare è l'assenza di flessibilità per quanto riguarda il valore di tensione delle batterie. Il valore di tensione delle celle, infatti, dipende dalla tecnologia con la quale sono state realizzate (e.g. 3.78V per le celle agli ioni di litio) ed è quindi necessario considerare un sistema di adattamento di tensione nel caso sia necessario alimentare dispositivi con tensioni differenti. Per sopperire alle mancanze delle due tecnologie, sono spesso utilizzati sistemi ibridi basati su super-condensatori in parallelo a batterie. Questo è il caso specifico del nostro sistema, per il quale è sicuramente necessario immaginare l'uso di una batteria ricaricabile, ma allo stesso tempo porre nella catena un super-condensatore in modo da sfruttare i benefici di entrambi i sistemi. Lo schema complessivo potrebbe essere schematizzato come in figura 2.11, dove è mostrato l'energy harvester, che in questo caso è dato dalle celle fotovoltaiche, il super-condensatore direttamente collegato ad esso tramite un circuito di condizionamento, un sistema di gestione dell'energy harvester basato su un LTC3588, un gruppo di batterie ricaricabili per una tensione di 3.3V e/o eventualmente di seguito il sistema basato sullo step-up CE8301, se serve una tensione di 5 V.





**Figura 2.11 – Schematizzazione del sistema di alimentazione per il sensore acustico intelligente**

### 3 Conclusioni

Il punto di partenza di questa attività è stato il sensore acustico intelligente sviluppato in una precedente fase del progetto PAR 2017. L'analisi dei consumi di questo dispositivo ha mostrato un elevato assorbimento di corrente, soprattutto nelle configurazioni standard. Sono state di conseguenza proposte delle soluzioni alternative hardware, che permettessero di sfruttare gli stessi algoritmi implementati in precedenza, ma che allo stesso tempo garantissero un minore assorbimento. Si è visto che questo è possibile sostituendo Arduino Uno con Arduino Pro Mini ed utilizzando una tensione di alimentazione di 3.3V ed una frequenza di clock di 8MHz. Si è poi passati ad analizzare lo sviluppo di un sistema di energy harvesting in grado di alimentare, con l'uso di un sistema di accumulo a batteria, tale sensore. Sono stati in seguito valutati i sistemi di energy harvesting applicabili al nostro contesto, ed in particolare, sono state valutate le prestazioni di celle piezoelettriche, celle termoelettriche e celle fotovoltaiche. Le prime si sono dimostrate poco efficienti, ma soprattutto estremamente care; le celle termoelettriche hanno mostrato economicità, ma, per essere applicate al sensore studiato, necessitano di un gradiente termico superiore ai 20 gradi e quindi è possibile il loro utilizzo solo in locali tecnici o dove sono disponibili fonti di calore; le celle fotovoltaiche, soprattutto quelle in silicio amorfo si sono rivelate essere economiche ed allo stesso tempo utilizzabili in ambiente indoor in quanto in grado di assorbire la luce ambientale in maniera efficiente. Sono stati infine valutati anche i circuiti di condizionamento e lo storage. L'analisi congiunta di tutti questi elementi ha permesso di valutare uno schema di principio ed il costo di tale sistema. Purtroppo l'impatto sui costi del sistema di energy harvesting non è trascurabile, portando nel caso migliore al raddoppio del costo dell'intero sistema, o quanto meno del sistema inteso nella sua versione base, alimentato da batterie standard e quindi senza particolari specifiche tecniche. Inoltre, l'adozione del sistema di energy harvesting prevede l'adozione di batterie ricaricabili, e quindi l'aggiunta di elementi che ne complicano la progettazione. Tuttavia, questo garantisce una durata maggiore dell'alimentazione e una minore manutenzione del sistema. L'unica alternativa possibile ed economica, ossia la rinuncia all'alimentazione autonoma, prevede cablaggi ed alimentazione esterna con ulteriori vincoli nell'uso.

I possibili futuri sviluppi prevedono l'ingegnerizzazione dell'idea proposta, la verifica sul campo dell'intero sistema e l'integrazione del sensore nell'ambito di una sensoristica domotica completa, con la possibilità di integrare le informazioni di più sensori tramite algoritmi di data mining ed intelligenza artificiale.

## 4 Riferimenti bibliografici

1. P. Clerici Maestosi, L. Luccarini, S. Pizzuti, F. Romanello, S. Romano, A. Zanela, "Gestione energetica Smart Home e assisted living: sviluppo di sistemi e soluzioni integrate", Ricerca di Sistema Elettrico 2017
2. Antonino Laudani, Gabriele Maria Lozito, Francesco Riganti Fulginei, Alessandro Salvini, "Integrazione di sensori acustici in sistemi smart home ed implementazione di algoritmi per l'individuazione e la localizzazione di segnali acustici", Report RdS/ PAR2017/044, Settembre 2018.
3. Briand, D., Yeatman, E., & Roundy, S. (2015). Micro energy harvesting (Advanced micro & nanosystems).
4. Beeby, White, Kane, Beeby, Stephen, White, Neil, & Kane, Vicki. "Energy harvesting for autonomous systems", Artech House series smart materials, structures, and system, 2010.
5. A. Romani, R.P. Paganelli, E. Sangiorgi and M. Tartagni, "Joint Modeling of Piezoelectric Transducers and Power Conversion Circuits for Energy Harvesting Applications", IEEE Sensors Journal, vol. 13, no. 3, March 2013.
6. Piezo Systems Inc., Introduction to piezoelectricity. Online available <http://www.piezo.com>
7. Francis J. DiSalvo, "Thermoelectric Cooling and Power Generation", Science, 30 Jul 1999 : 703-706
8. Fahrner, Wolfgang R., and Stefan Schwertheim. "Semiconductor Thermoelectric Generators", Trans Tech Publications, Limited, 2009
9. Sanyo Amorton Datasheets: <https://www.mouser.com/ds/2/315/EP120B-775610.pdf>
10. Antonino Laudani, Francesco Riganti Fulginei, Alessandro Salvini, "Identification of the one-diode model for photovoltaic modules from datasheet values", Solar Energy, Volume 108, 2014, Pages 432-446, ISSN 0038-092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.07.024>.
11. CE8301 Datasheet: <https://www.mpja.com/download/ce830.pdf>
12. LTC3588 Datasheet: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/35881fc.pdf>