



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**



Corso di Laurea in INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

**Energy Harvesting e monitoraggio ambientale:
progetto di un sistema energeticamente
autosufficiente basato su generatori termoelettrici**

Relatore: prof. Alessandro Pozzebon

Laureando: Migliorini Marco

Correlatore: Ing. Stefano Parrino

Anno Accademico 2021-2022

23 Settembre 2022

Abstract

Lo sviluppo pervasivo delle tecnologie della comunicazione e dell'intelligenza artificiale sta facendo emergere la problematica energetica. L'Energy Harvesting, tecnologia che sfrutta fenomeni fisici e chimici per ricavare energia elettrica, sta dunque assumendo un ruolo di primaria importanza in settori tecnologici come l'IoT (Internet of Things) e l'IoE (Internet of Everything) che oggi permettono l'interconnessione di molteplici "oggetti". Tra tutti i possibili dispositivi di Energy Harvesting sono di particolare interesse per questo studio i cosiddetti "generatori termoelettrici" (in inglese thermoelectric generators, o "TEG"), che permettono di ricavare energia partendo da un determinato gradiente di temperatura presente ai loro capi.

In questo lavoro si vogliono impiegare i moduli TEG come strategia di alimentazione primaria per lo sviluppo di un dispositivo pensato per attività di monitoraggio ambientale, con l'obiettivo fondamentale di garantire l'autosufficienza energetica del sistema coniugando i TEG con degli integrati per la gestione efficiente della carica. L'intento finale è di fornire una caratterizzazione completa di quanto ottenuto tenendo presenti i vantaggi che si hanno nell'impiego di moduli TEG, come la possibilità di operare in aree remote garantendo l'autonomia del sistema, oppure di ridurre costi e dimensioni, permettendone quindi l'utilizzo su qualsiasi tipo di superficie conduttrice di calore.

Dediche

Alla mia famiglia e ai miei amici

Marco

Indice

1	Introduzione	5
1.1	Struttura generale del sistema	6
2	Componenti del sistema	7
2.1	Generatore termoelettrico	7
2.2	Ultra Low Voltage Power Manager LTC3108	8
2.3	Batteria Li-Po	10
2.4	Modulo LoRaWAN RFM95	10
2.4.1	LoRa	10
2.4.2	LoRaWAN	11
2.5	Sensore di polveri sottili HPMA115S0	12
2.6	ATTiny84	13
3	Realizzazione del dispositivo e test	14
3.1	Consumi del sistema ed integrazione hardware	14
3.1.1	Consumi del modulo LoRaWAN	14
3.1.2	Consumi del sensore di particolato	15
3.1.3	Consumi del microcontrollore	17
3.1.4	Assemblaggio delle componenti	17
3.2	Test di misura e prime considerazioni	18
3.3	Integrazione con i moduli TEG	20
3.4	test finali	22

Capitolo 1

Introduzione

Alla base di questo lavoro vi è la volontà di sviluppare una concreta applicazione ai numerosi studi che hanno dimostrato come una possibile strategia di alimentazione per nodi sensore sia data dai TEG. Negli ultimi anni lo sviluppo di dispositivi di IoT ed IoE sta infatti crescendo considerevolmente e la necessità di avere sistemi che riducono gli interventi manutentivi risulta cruciale. Si vuole qui proporre la realizzazione di un dispositivo di monitoraggio della qualità dell'aria la cui autonomia energetica viene garantita grazie ai TEG. Il motivo fondamentale che ha mosso la scelta verso questo tipo di dispositivi è dovuto al fatto che i sensori di particolato sono di tipo chimico e quindi molto energivori. Per applicazioni di Energy Harvesting essi costituiscono quindi una scelta critica, per cui l'effettiva realizzazione del nodo servirà a dimostrare che l'utilizzo di TEG come strategia di alimentazione può avere ampio utilizzo in svariati scenari applicativi.

Il suddetto lavoro è stato realizzato partendo dall'implementazione del nodo sensore, che ha permesso di ottenere un sistema che fosse in grado di raccogliere un dato per poi trasmetterlo tramite la tecnologia LoRaWAN (“Long Range Wide Area Network”). Il passo successivo è stato quello di garantire l'autosufficienza energetica del nodo permettendo quindi di ottenere il dispositivo finale. Prima di proporne una caratterizzazione conclusiva vengono inoltre discussi i circuiti per la gestione della carica, sistemi che giocano un ruolo fondamentale in applicazioni di Energy Harvesting.

1.1 Struttura generale del sistema

Per questo progetto si è scelto di utilizzare un sensore di PM_{2,5} e PM₁₀ (La sigla “PM” è l’acronimo di “Particulate Matter”), in grado quindi di rilevare il così detto particolato fine, affidando poi la trasmissione del dato ad un modulo LoRaWAN. L’intero sistema viene poi alimentato da una batteria Li-Po la cui ricarica, che avviene attraverso i TEG, è gestita in modo efficiente grazie ad un BMS (“battery management system”).

In particolare il dispositivo è costituito da:

- un generatore termoelettrico (SP1848 SA);
- un integrato per la gestione efficiente della carica;
- una batteria Li-Po;
- un modulo LoRaWAN;
- un sensore di polveri sottili.

Per poter integrare tutte le componenti è infine necessario l’utilizzo di un microcontrollore ponendo attenzione alla scelta di dispositivi a bassa potenza, dato che per applicazioni di questo tipo il risparmio energetico risulta cruciale.

Capitolo 2

Componenti del sistema

2.1 Generatore termoelettrico

I generatori termoelettrici sono dispositivi che permettono di ottenere energia elettrica partendo da un gradiente di temperatura presente ai loro capi. Come mostrato in figura 2.1 essi sono tipicamente costituiti da molte termocoppie connesse elettricamente in serie e racchiuse tra due strati di materiale isolante (in genere costituito da ceramica) che permette di ridurre al minimo le perdite di calore.

Una termocoppia, come evidenziato in rosso in figura 2.1, è generalmente formata da un semiconduttore di tipo p ed uno di tipo n connessi in serie per mezzo di una sottile lamina metallica. Il principio fisico alla base del loro funzionamento è il così detto “effetto Seebeck”, secondo cui è possibile ottenere una differenza di potenziale partendo da un gradiente di temperatura presente ai capi della termocoppia. Come ampiamente discusso in [1], grazie a tale effetto, la presenza di un gradiente $\Delta T = T_{hot} - T_{cold}$ genera quindi una differenza di potenziale ΔV data da:

$$\Delta V = N \cdot \alpha_{AB} \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

dove N è il numero di termocoppie connesse in serie, mentre α_{AB} è il coefficiente di seebeck dei due materiali A e B che le costituiscono.

È inoltre importante notare che dato il continuo flusso di calore attraverso la TEG i lati freddo e caldo tendono a raggiungere in fretta l'equilibrio termico, azzerando di conseguenza il gradiente di temperatura presente ai suoi capi. Per ovviare il problema, nel corso dei test effettuati in laboratorio, è stato quindi utilizzato un semplice dissipatore da appoggiare sul lato freddo della TEG.

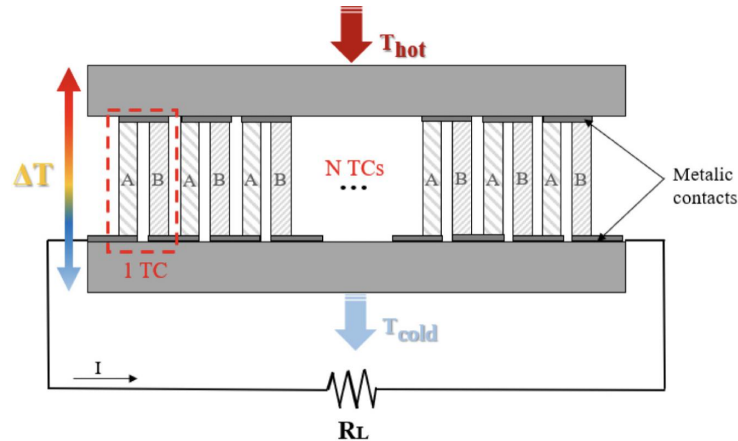


Figura 2.1: Tipica struttura di una TEG. [1]

2.2 Ultra Low Voltage Power Manager LTC3108

L'LTC3108 è un integrato della Linear Technology appositamente sviluppato per applicazioni di Energy Harvesting in cui è richiesta la capacità di gestire bassissime tensioni in input. Esso è in grado di operare con svariate fonti di energia come i TEGs, i pannelli solari e le termopile, permettendo in tutti i casi di ottenere in uscita delle tensioni sufficientemente elevate per alimentare una tipica applicazione IoT.

Come osservabile in Figura 2.2 il chip possiede diversi pin configurabili dall'utente per adattarlo alla specifica applicazione. Troviamo infatti: un input a cui collegare la fonte di alimentazione; un output dedicato al microcontrollore (V_{LDO}) che viene regolato attraverso un "regolatore a bassa caduta di tensione" (dall'inglese "Low-Dropout Regulator" o LDO); un output primario (V_{OUT}) regolabile configurando gli input VS1 e VS2, in genere utilizzato per alimentare sensori a bassa potenza; un output secondario (V_{OUT2}) in grado di fornire correnti nell'ordine delle centinaia di milliampère ed utilizzabile quindi per

alimentare i sensori più energivori; e infine troviamo l'output dedicato alla batteria esterna (V_{STORE}) utilizzata per supportare il sistema in assenza di input.

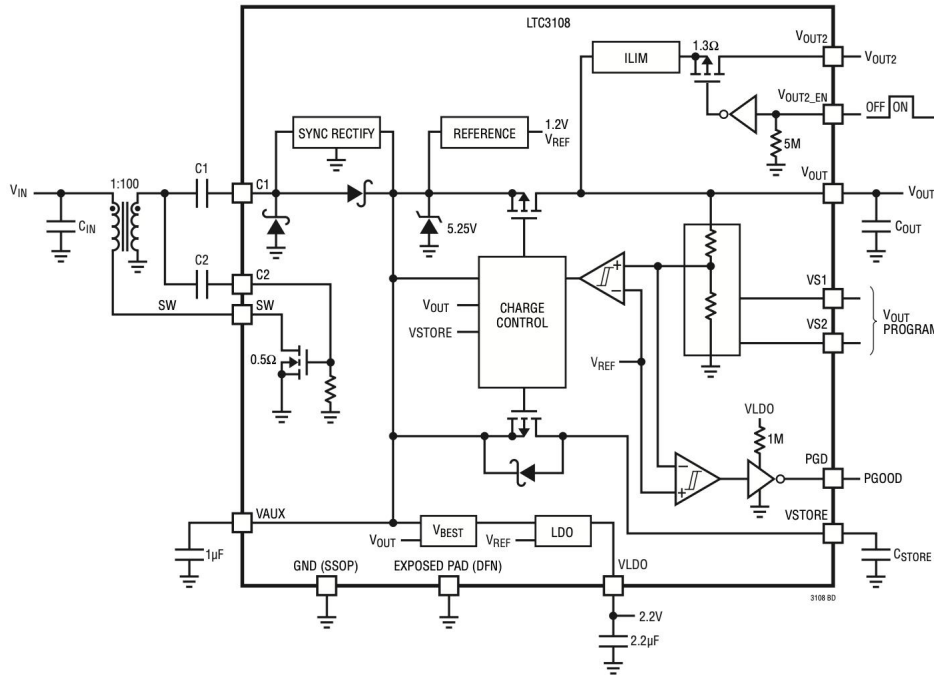


Figura 2.2: Diagramma a blocchi di un LTC3108. [2]

Per alimentare una generica applicazione IoT con circuiti di questo tipo sono necessari alcuni elementi essenziali che permettono di avere un “boost” sulle bassissime tensioni in ingresso. In questo caso specifico, collegati all'ingresso V_{IN} , troviamo i così detti “resonant step-up oscillator” e “charge pump and rectifier”. Il primo, per mezzo del trasformatore, della capacità $C2$ e del mosfet collegato al pin SW, è in grado di alzare la tensione in ingresso portando ai pin di uscita valori regolati fino ai 5 V; il secondo, costituito invece dalla capacità $C1$ e dal raddrizzatore interno (SYNC RECTIFY in Figura 2.2), permette di alzare ulteriormente la tensione oltre a raddrizzare il segnale.

Un'importante peculiarità del circuito è la presenza dell'uscita PGOOD, che assume solamente valori logici alti o bassi a seconda che l'output V_{OUT} si trovi o meno in uno stato di regolazione. La presenza di tale pin permette di interrogare il circuito con il microcontrollore così da gestire in modo più efficiente le fasi di sleep, riducendo di conseguenza

i consumi dell'intera applicazione.

È inoltre doveroso notare che nella fase di progettazione non è stato direttamente utilizzato l'LTC3108 ma la demo board DC2042A della Linear Technology [3]. Essa mette a disposizione quattro diversi integrati, tra cui è presente l'LTC3108, limitando però gli output alla sola uscita V_{OUT} che di default viene fissata a 3.3 V.

2.3 Batteria Li-Po

A supporto del circuito è stata utilizzata una batteria ai polimeri di litio con una tensione nominale pari a 2.6 V. Essa permette di alimentare il circuito qualora la tensione fornita in ingresso dalla TEG non fosse sufficiente a sostenere l'applicazione. Nel momento in cui quest'ultima entra in una fase di risparmio energetico si avrà invece la possibilità di sfruttare la TEG per ricaricare la batteria, garantendo quindi una maggiore autonomia al sistema.

2.4 Modulo LoRaWAN RFM95

La trasmissione dei dati viene affidata al modulo LoRaWAN RFM95 [4], in grado di supportare la modulazione LoRa (acronimo di "Long Range").

2.4.1 LoRa

LoRa è una tecnica di modulazione della Semtech che, come suggerito dal nome stesso, permette di effettuare trasmissioni a lungo raggio garantendo comunque bassi consumi di potenza, caratteristica che la rende particolarmente adatta per applicazioni IoT a ridotto consumo energetico. La possibilità di trasmettere a lunga distanza è dovuta alla modulazione in frequenza CSS ("Chirp Spread Spectrum") su cui si basa LoRa. Essa permette di rappresentare i simboli trasmessi grazie a dei segnali detti "chirp" in cui la frequenza cresce linearmente nel tempo. Utilizzando questa particolare tecnica ogni simbolo è dunque trasmesso su un'ampia banda di frequenze, consentendo di aumentare la capacità al ricevitore. Grazie a questo è quindi possibile vedere correttamente anche i

segnali con un SNR (“Signal to Noise Ratio”) negativo, permettendo così di trasmettere con potenze minori.

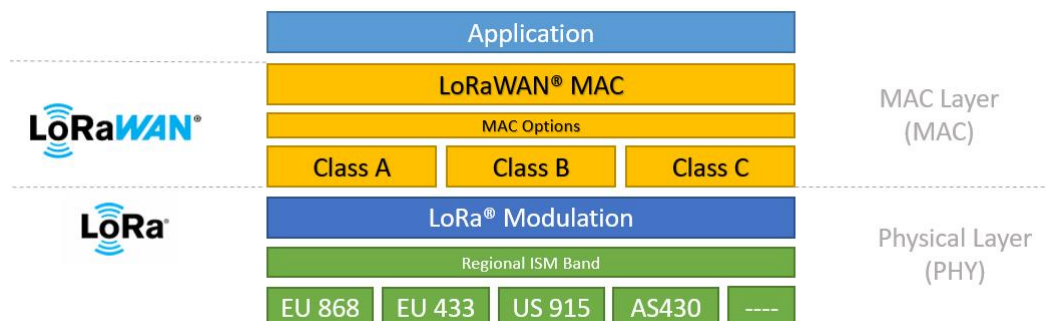


Figura 2.3: LoRa e LoRaWAN nel modello ISO/OSI. [5]

2.4.2 LoRaWAN

Mentre LoRa è il layer fisico del modello ISO/OSI, LoRaWAN definisce invece il livello MAC (acronimo di “Media Access Control”). Essa funge principalmente da protocollo di livello di rete, gestendo le comunicazioni tra gateway ed end-node, ma controlla anche le frequenze e velocità di trasmissione oltre che l’alimentazione dei nodi. Le modalità di trasmissione dei dispositivi interni alla rete seguono un protocollo ALOHA, per cui quando una postazione ha dati da trasmettere, li trasmette.

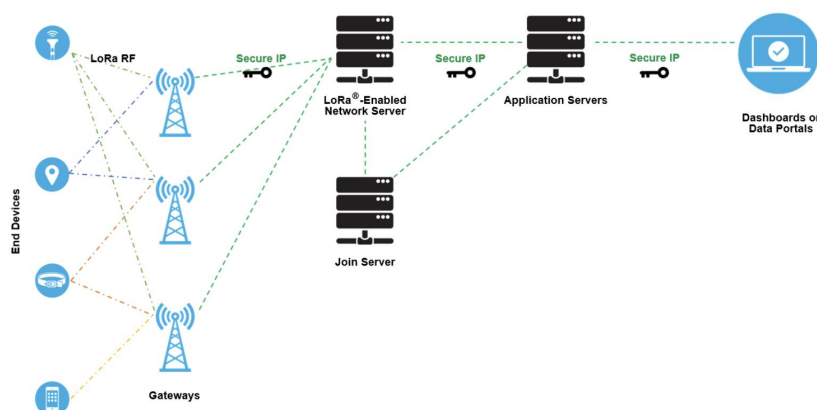


Figura 2.4: Tipica implementazione di una rete LoRaWAN. [5]

Come riportato in Figura 2.4 una tipica rete LoRaWAN prevede un dispositivo (“End device”, solitamente un sensore) che tramite modulazione LoRa trasmette dati ai gateways; questi ultimi, dopo aver verificato l’integrità del pacchetto, lo inviano al LoRaWAN Enabled Network Server (LNS) che di fatto gestisce l’intera rete; troviamo infine un’Application Server e un “Join Server” che si occupano rispettivamente di gestire ed interpretare in modo sicuro i dati provenienti dai sensori e identificare l’end device che si connette alla rete.

2.5 Sensore di polveri sottili HPMA115S0

Come già osservato in precedenza, per dimostrare la possibilità di utilizzare le TEG come strategia di alimentazione per applicazioni di IoT, la scelta è ricaduta sul sensore HPMA115S0 della Honeywell, destinato alla rilevazione del particolato fine. Esso è un sensore di tipo ottico che, come riportato dalla documentazione in [6], è in grado di misurare le concentrazioni di PM2.5 e PM10 fino a $1000\mu g/m^3$.

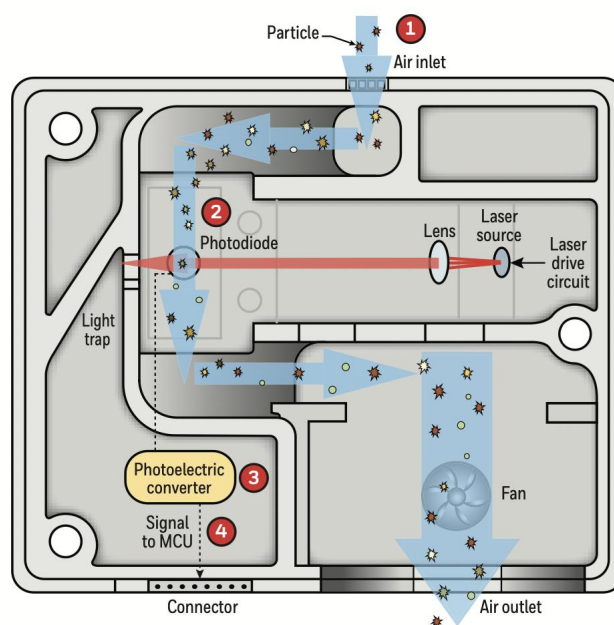


Figura 2.5: Principio di funzionamento del sensore. [6]

In Figura 2.5 è possibile osservare che, grazie ad una ventola interna, l'aria viene fatta fluire da un estremo all'altro del sensore. Passando quindi attraverso una camera di rilevamento, le particelle sospese nell'aria vengono illuminate da una sorgente laser dando luogo a fenomeni di diffrazione che vengono poi rilevati grazie ad un fotodiode. Analizzando dunque il modo in cui vengono deviati i raggi è possibile determinare la dimensione e concentrazione di particolato fine nell'aria. Basandosi infatti sulla teoria di Fraunhofer le polveri di dimensioni maggiori, quindi non confrontabili con la lunghezza d'onda del laser, daranno luogo a fenomeni di riflessione o rifrazione che saranno in genere caratterizzati da angoli maggiori rispetto a quelli osservati nel caso in cui il raggio incida su polveri più fini.

2.6 ATTiny84

Per permettere una corretta integrazione di tutte le componenti è infine necessario impiegare un microcontrollore. Data la richiesta dell'intera applicazione di riuscire a gestire bassi consumi di potenza, la scelta è ricaduta sul microcontrollore ATtiny84 della famiglia ATtiny. Esso è infatti dotato di un numero sufficiente di pin per gestire tutti gli input ed output del sistema e allo stesso tempo, oltre a garantire bassi consumi energetici, possiede sufficienti risorse per permettere una corretta gestione dell'intera applicazione.

Capitolo 3

Realizzazione del dispositivo e test

La prima parte del lavoro è stata dedicata all'implementazione di un sistema che fosse in grado di leggere i dati dal sensore per poi trasmetterli tramite tecnologia LoRaWAN, integrando poi in un secondo momento la gestione della carica tramite TEG.

3.1 Consumi del sistema ed integrazione hardware

Prima di procedere con l'effettiva realizzazione del dispositivo è risultato fondamentale svolgere una serie di test preliminari che permettessero di valutare i consumi delle singole componenti, così da adattare l'hardware alle richieste del sistema. Utilizzando quindi un semplice multimetro da banco è stato possibile evidenziare i valori riportati nelle prossime sezioni, permettendo poi di inserire alcune componenti hardware aggiuntive volte a ridurre i consumi del dispositivo finale.

3.1.1 Consumi del modulo LoRaWAN

Il modulo LoRaWAN se tenuto in una fase di sleep assorbe correnti nell'ordine dei microampere, quindi in genere trascurabili. Nelle fasi di trasmissione richiede invece 110 mA per un tempo totale di attivazione che dipende da spreading factor (abbrev. SF) e larghezza di banda (abbrev. BW, acronimo di "Band Width") impiegati. Nei test svolti in laboratorio si è assunto uno SF pari a 7 ed una BW di 125 kHz, che consentivano

di completare la trasmissione dei quattro byte contenenti i valori di PM2.5 e PM10 in 51.5 ms. Si può quindi stimare che, per ogni trasmissione eseguita, il modulo LoRaWAN richieda:

$$(110 \cdot 10^{-3} \text{ A}) \cdot (51.1 \cdot 10^{-3} \text{ s}) / (3600 \text{ secondi in un'ora}) = 1.56 \mu\text{Ah} \quad (3.1)$$

3.1.2 Consumi del sensore di particolato

Il sensore di polveri sottili assorbe costantemente 64 mA dall'alimentazione. Non ammettendo un pin di enable che consenta di attivarlo o disattivarlo tramite il microcontrollore è dunque necessario l'impiego di un transistor che permetta di controllarlo tramite un pin dell'ATtiny. Usando quindi la configurazione 1 in Figura 3.1 si riducono a termini trascurabili i consumi legati alle fasi di sleep del sensore. Questo risulta fondamentale dal momento che, per poter restituire letture valide, il dispositivo necessita di tempi di attivazione prolungati, in genere critici per applicazioni a bassa potenza. Si è infatti stimato che per avere valori ragionevoli esso debba essere lasciato in funzione per almeno 20 s, per cui abbattere i costi legati alle fasi di sleep permette di avere un momento di ricarica della batteria esterna.

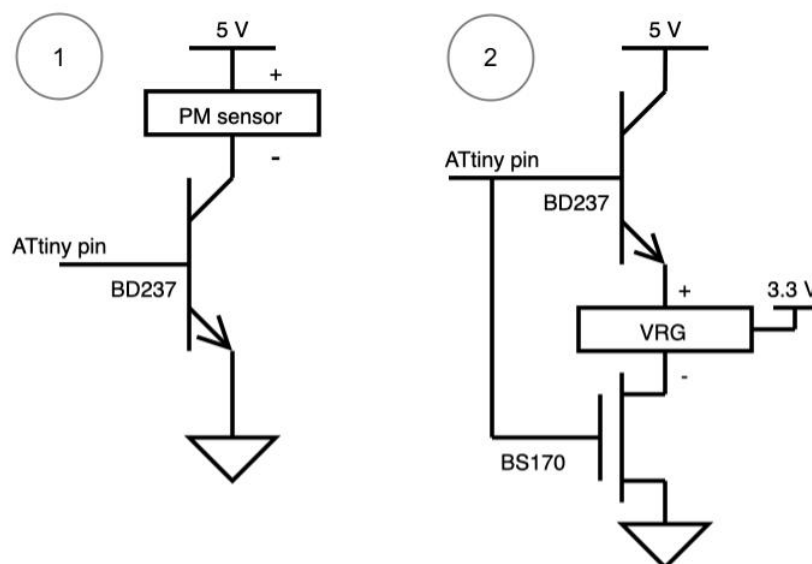


Figura 3.1: Configurazioni utilizzate per i due transistor.

Ai precedenti consumi vanno poi aggiunti quelli legati all'impiego di un regolatore di tensione a 3.3 V. Infatti, dal momento che la seriale del sensore di particolato utilizza un protocollo UART (acronimo di "Universal Asynchronous Receiver-Transmitter") con livelli logici a 3.3 V, per poterlo interfacciare correttamente con il microcontrollore è necessario l'impiego di un Logic Level Converter (dall'inglese "convertitore di livelli logici" o LLC) da 3.3 V a 5 V. Come osservabile in Figura 3.2 la struttura dell'LLC è tale da garantire consumi trascurabili dato che si avrà un effettivo assorbimento di corrente da parte delle resistenze solo nel momento in cui il microcontrollore è acceso e scrive logici bassi. Al contrario, il regolatore di tensione quando attivo assorbe costantemente 4 mA rendendo quindi necessario l'impiego di un secondo transistor per poterlo attivare o disattivare direttamente dal microcontrollore. In questo caso la configurazione utilizzata è quella riportata al punto 2 di Figura 3.1 (anche detta "ad inseguitore di emettitore"), dove oltre ad un BJT ("Bipolar Junction Transistor") impiegato per comandare il regolatore di tensione, troviamo anche un MOSFET che "nasconde" la massa alle correnti di ritorno che durante le fasi di sleep, passando per l'uscita a 3.3 V del regolatore, vengono scaricate a terra. Si osservi inoltre che, dal momento che un BJT è controllato in corrente, per limitarne i consumi è stata aggiunta una resistenza da 5 k Ω tra il pin dell'ATtiny e il terminale di base del transistor.

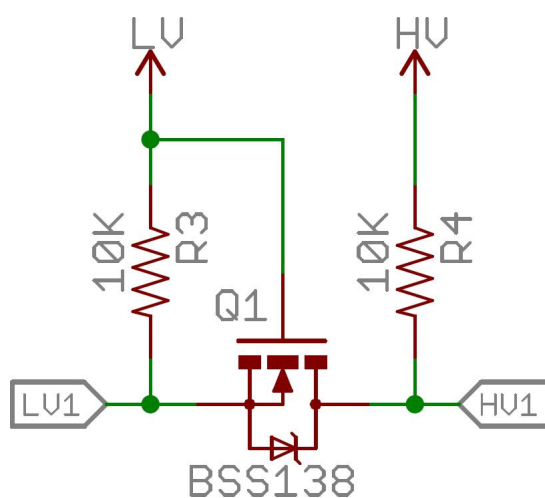


Figura 3.2: Tipica struttura di un LLC.

Con la configurazione descritta è quindi possibile controllare l'accensione e lo spegni-

mento di tutte le componenti, garantendo dunque consumi trascurabili nei cicli di sleep. Per le fasi di attivazione si avrà invece un consumo totale pari a:

$$((64 + 4) \cdot 10^{-3} \text{ A}) \cdot (20 \text{ s}) / (3600 \text{ secondi in un'ora}) = 377.78 \mu\text{Ah} \quad (3.2)$$

Si nota immediatamente che l'accensione del sensore ha costi elevati per cui, per garantire una buona autonomia del sistema, risulta fondamentale l'impiego di un duty cycle limitato.

3.1.3 Consumi del microcontrollore

L'ATtiny84 è in genere caratterizzato da bassi consumi, tipicamente dell'ordine di qualche milliampere, che con un'analisi più attenta si possono però ridurre ulteriormente. Infatti, grazie all'implementazione software di alcune librerie appositamente create per "addormentare" il microcontrollore, è stato possibile ridurre i consumi nelle fasi di sleep ad appena qualche microampere. Per quanto riguarda le fasi attive del microcontrollore, cercando di ridurre al minimo indispensabile le librerie utilizzate per parlare con il sensore e con il modulo LoRaWAN, si è riusciti a garantire un corretto funzionamento anche abbassando la frequenza di clock ad 1 MHz, il che consente di ridurre i consumi delle fasi attive a circa $600 - 700 \mu\text{A}$.

Considerando che l'ATtiny deve rimanere acceso per tutta la durata delle letture, esso avrà un consumo totale pari a:

$$(700 \cdot 10^{-6} \text{ A}) \cdot (20 \text{ s}) / (3600 \text{ secondi in un'ora}) = 3.89 \mu\text{Ah} \quad (3.3)$$

3.1.4 Assemblaggio delle componenti

Mettendo quindi assieme le tre componenti principali del sistema con l'hardware necessario a garantire una corretta comunicazione e il risparmio energetico si ottiene il dispositivo mostrato in Figura 3.4. Per una maggiore chiarezza si riporta inoltre in Figura 3.3 il circuito finale su breadboard.

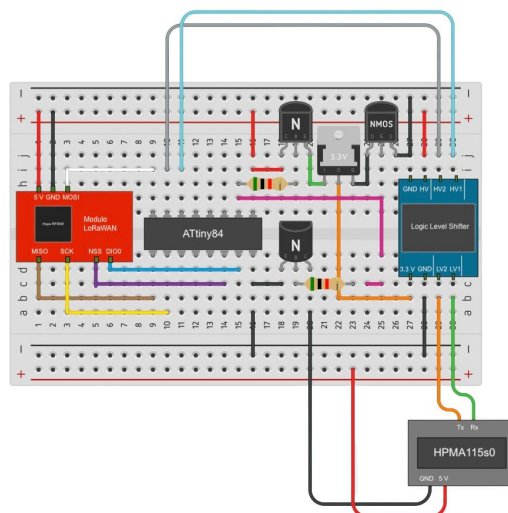


Figura 3.3: Circuito finale per la lettura e trasmissione del dato.

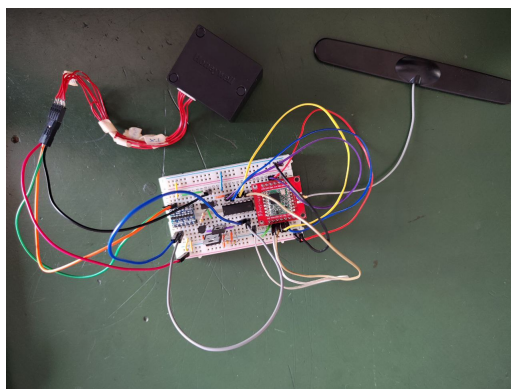


Figura 3.4: Setup finale per la lettura e trasmissione del dato.

3.2 Test di misura e prime considerazioni

Una prima serie di test è stata svolta per mostrare il corretto funzionamento dell'applicazione. Nei grafici mostrati nelle Figure 3.5 e 3.6 vengono riportate le acquisizioni effettuate nel corso di due differenti giornate, ottenute mediando le letture restituite dal sensore che veniva interrogato ogni due minuti. Il confronto viene effettuato con una stazione ARPAV situata ad alcuni chilometri di distanza dal luogo in cui è stato svolto il test. In generale si osserva che i valori rilevati tendono a differire al più di un paio di unità. In parte tale discrepanza può essere giustificata dalla distanza dei due dispositivi,

anche se il recente studio ARPAV al [7] mostra che in un ampio raggio attorno alla zona di misura le concentrazioni di PM10 e PM2.5 hanno il medesimo andamento, pur differendo di poche unità. Possiamo quindi concludere che in buona approssimazione il setup realizzato restituisce letture consistenti.

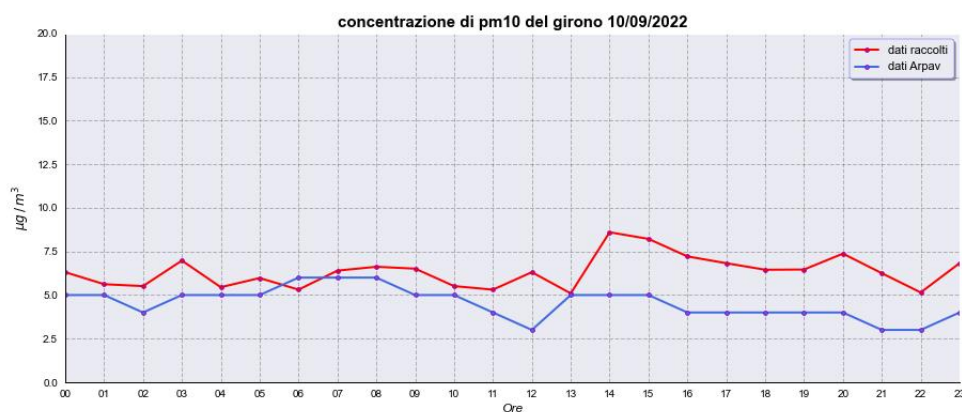


Figura 3.5: PM2.5 e PM10 nella prima giornata di misurazioni.

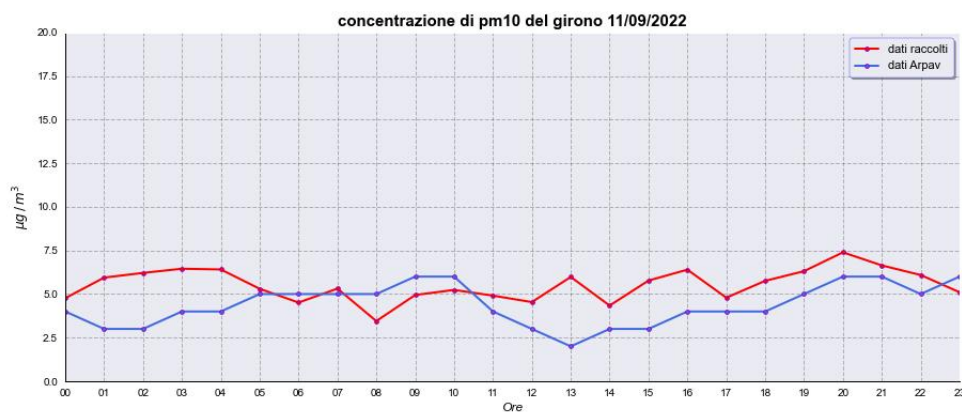


Figura 3.6: PM2.5 e PM10 nella seconda giornata di misurazioni.

Conoscendo inoltre i consumi delle singole componenti è possibile ottenere approssimativamente il costo legato alle fasi di sleep e a quelle di active del sistema finale. Dai risultati riportati ai punti 3.1, 3.2 e 3.3 si ottiene infatti che:

- nelle fasi di attivazione il consumo totale è pari a $383.23 \mu\text{Ah}$;

- nelle fasi di sleep invece è di $9 \mu\text{Ah}$;

Assumendo quindi per esempio di voler effettuare una trasmissione ogni ora, il consumo quotidiano del dispositivo sarebbe di:

$$(383.23 \cdot 10^{-6} \text{ Ah} \cdot 24 \text{ trasmissioni al giorno}) + \\ + (9 \cdot 10^{-6} \text{ Ah} \cdot 24 \text{ ore di attivazione}) = 9.41 \text{ mAh ogni giorno}$$

Per cui usando una normale batteria da 3.6 V con una capacità nominale di 2600 mAh (per esempio una LS14500) e tenendo presente che per alimentare il circuito a 5 V è necessario uno “Step-Up voltage regulator” che, assumendo abbia un’efficienza dell’80%, riduce la capacità della batteria a 2080 mAh, allora il dispositivo avrebbe un’autonomia di circa 221 giorni. Tale previsione è ottimistica, dal momento che in corrispondenza alla scarica della batteria l’efficienza dello step-up converter diminuisce.

È quindi immediato notare che senza una strategia di alimentazione alternativa che permetta di avere delle fasi di ricarica della batteria, l’autonomia del sistema è in genere fortemente limitata.

3.3 Integrazione con i moduli TEG

Noti i consumi e i tempi di attivazione dell’intera applicazione, basandosi su quanto riportato nella datasheet dell’integrato LTC3108 in [2], è possibile avere un’indicazione teorica sul funzionamento del setup completo. In Figura 3.8 si riporta un’ipotetica integrazione del sistema di misura con i TEG. Da questa possiamo osservare che all’output principale VOUT, internamente limitato a pochi milliampere, viene collegato solamente il microcontrollore. Le restanti componenti sono invece gestite tramite l’uscita VOUT2, in grado di supportare carichi fino ai 300 mA. Notiamo inoltre che, come già osservato in precedenza, l’LTC3108 possiede un segnale di regolazione PGOOD che permette di controllare l’attivazione del microcontrollore direttamente dalla board, garantendo quindi l’accensione del sistema solo nel momento in cui si ha sufficiente energia per la lettura e trasmissione del dato.

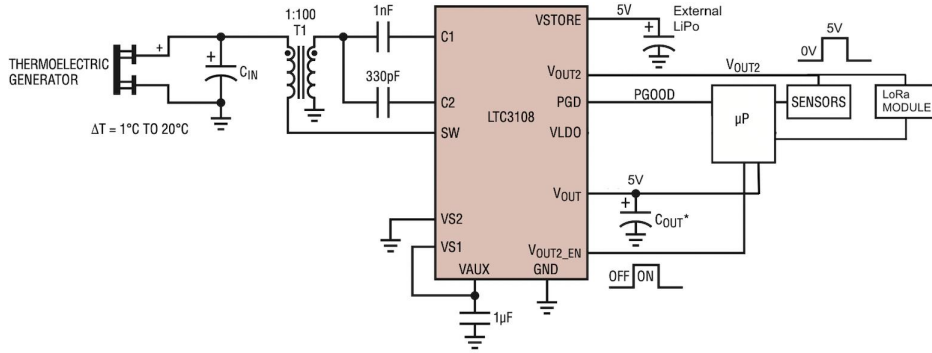


Figura 3.7: Integrazione del dispositivo con i moduli TEG.

Seguendo quindi le relazioni riportate al capitolo “Design Example 1” in [2] e noti i consumi del sistema si ottiene che per sostenere l’intera applicazione è necessario l’impiego di un condensatore collegato all’uscita V_{OUT} pari a:

$$C_{OUT} = \frac{67 \text{ mA} \cdot 20 \text{ s}}{0.4 \text{ V}} + \frac{110 \text{ mA} \cdot 51 \text{ ms}}{0.4 \text{ V}} = 3.35 \text{ F} + 14 \text{ mF} \approx 3.36 \text{ F} \quad (3.4)$$

dove il primo termine tiene in considerazione i costi legati all’attivazione del sensore di particolato, mentre il secondo racchiude il contributo dovuto all’accensione del modulo LoRaWAN. Il denominatore 0.4 V, rappresenta invece la massima caduta di tensione ammessa ai capi di C_{OUT} rispetto i 5 V prefissati.

L’impiego di un supercapacitore risulta quindi indispensabile dal momento che l’applicazione ha dei tempi di attivazione molto prolungati. Chiaramente l’utilizzo di tali capacità in applicazioni a bassa potenza richiede intervalli di ricarica notevolmente estesi. Tramite relazione 3.5 è possibile fornirne una stima, considerando come output la capacità C_{OUT} precedentemente valutata:

$$t_{V_{OUT}} = \frac{3.36 \text{ F} \cdot 5 \text{ V}}{I_{CH} (\text{mA}) - 9 \mu\text{A}} = \frac{3.36 \text{ F} \cdot 5 \text{ V}}{3.5 \text{ mA} - 9 \mu\text{A}} \approx 4800 \text{ s} \quad (3.5)$$

dove i termini al numeratore sono rispettivamente la capacità C_{OUT} valutata al punto 3.4 e la tensione a cui viene regolato l’output, mentre al denominatore troviamo $9 \mu\text{A}$ pari al consumo totale in fase di sleep e I_{CH} che rappresenta la corrente di ricarica fornita in uscita dalla board durante i transitori in cui il carico è in modalità low-power. In questo caso I_{CH} viene stimata essere 3 mA, infatti alcuni studi come quello riportato in

[8] mostrano che utilizzando gradienti sufficientemente alti (in genere tra $\Delta T = 35^\circ \text{C}$ e $\Delta T = 40^\circ \text{C}$) l'integrato LTC3108 può far fluire nel condensatore C_{OUT} valori superiori ai 3 mA con picchi di 4-5 mA. Considerando l'alta richiesta energetica del sistema possiamo dunque ragionevolmente assumerne un impiego in scenari dove risulta semplice ottenere gradienti di temperatura sufficientemente elevati, grazie ai quali, come riportato al punto 3.5 l'uscita viene completamente regolata in circa 90 minuti.

Assumendo che i moduli TEG siano sottoposti ad un gradiente considerevole, con tale setup si può quindi garantire un'autonomia completa del sistema escludendo anche l'utilizzo di una batteria. Una fonte di alimentazione esterna è comunque utile in tutti quei casi in cui i TEG smettono di funzionare o non sono in grado di supportare completamente il carico. In queste circostanze la presenza di una batteria garantirebbe ugualmente il funzionamento del sistema e se usata congiuntamente ai TEG permetterebbe di ottenere un'estensione della durata di vita potenzialmente illimitata. Considerando infatti che solo alla prima attivazione la capacità C_{OUT} è completamente scarica, esistono sicuramente dei transistori in cui l'output sarà in regolazione mentre il dispositivo è ancora in una fase di sleep, permettendo quindi di reindirizzare parte della carica proveniente dalle TEG alla batteria. A tal proposito può essere di particolare aiuto l'utilizzo del pin PGOOD, che permetterebbe di interrompere i cicli di sleep del microcontrollore attivandolo nel momento in cui è possibile garantire un'energia sufficiente al corretto funzionamento dell'intero setup.

3.4 test finali

Un'ultima serie di test è stata svolta con l'aiuto di un secondo integrato per la gestione della carica proveniente dalle TEG. L'utilizzo dell'LTC3108 richiede infatti valutazioni più approfondite che per mancanza di tempo ed alcuni malfunzionamenti della board non è stato possibile eseguire. Per poter ugualmente dimostrare la fattibilità dello studio si è quindi utilizzato l'integrato BQ25570 della Texas Instruments [9], il cui funzionamento si basa sempre su un convertitore step-up necessario ad alzare le bassissime tensioni provenienti dalle TEG. A differenza dell'LTC3108, il BQ25570 non si basa però sulla cari-

ca/scarica di nodi capacitivi ma alimenta l'uscita prelevando direttamente dalla batteria esterna, garantendo poi un'ipotetica fase di ricarica nel momento in cui il sistema è in una fase di sleep.

Sfortunatamente l'unica uscita presente è di default fissata a 2.5 V, che sono insufficienti per alimentare l'architettura progettata per funzionare a 5 V. Il test si è quindi svolto impiegando un semplice carico resistivo che assorbe un amperaggio simile a quello del dispositivo ideato. Assumendo ancora una volta di operare in condizioni tali da garantire gradienti sufficientemente elevati, si è osservato che con una differenza di temperatura ai capi delle TEG pari a 30° C si riescono a sostenere correnti di 90-100 mA per più di 40 s prima che l'output non sia più in regolazione. Lasciando un intervallo di ricarica della batteria sufficientemente lungo e applicando un gradiente costante ai capi delle TEG, si può quindi pensare di garantire una completa autonomia del nodo. Si è infatti osservato che scollegando il carico dal sistema per qualche minuto, si ha una fase di ricarica della batteria sufficiente a sostenere un nuovo ciclo di attivazione. Lasciando quindi il carico scollegato per 10-15 minuti si può facilmente ottenere un trend di ricarica della batteria.

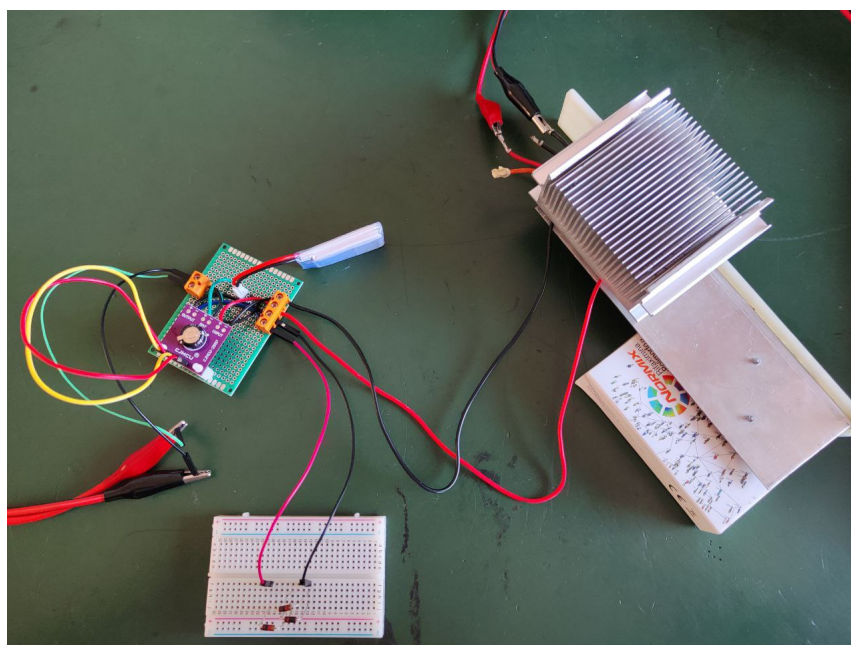


Figura 3.8: Setup utilizzato per i test finali.

Capitolo 4

Conclusioni

Lo scopo del progetto era la ricerca di una possibile applicazione a tutti quegli studi che hanno dimostrato come l'utilizzo di generatori termoelettrici possa risultare efficace in ambito IoT. Il fatto di aver scelto un'applicazione di monitoraggio delle polveri sottili particolarmente energivora, ha fatto sì che fosse necessaria un'attenta progettazione per poter ottenere un'architettura low power. I test e le considerazioni finali dimostrano inoltre che il dispositivo sviluppato può essere completamente autosufficiente dal punto di vista energetico se utilizzato in ambienti che permettono di estrarre gradienti di temperatura sostenuti. Si pensi ad un possibile impiego in ambiente industriale in cui risulta relativamente semplice disporre di elevate temperature ponendo per esempio le TEG su condotte o ciminiere. È inoltre doveroso osservare che, qualora non si riuscisse a garantire un gradiente di temperatura sufficiente, è sempre possibile incrementare l'efficienza del sistema collegando più generatori termoelettrici in serie, garantendone quindi il corretto funzionamento anche in ambienti comuni.

Bibliografia

- [1] Nesrine Jaziri; Ayda Boughamoura; Jens Müller; Brahim Mezghani; Fares Tounsi; Mohammed Ismail. “A comprehensive review of Thermoelectric Generators”. In: *ScienceDirect* (2020). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484719306997>.
- [2] Linear Technology. *Ultra Low Power Step-Up Converter and Power Manager*. URL: <https://www.analog.com/en/products/ltc3108.html#product-overview>.
- [3] Linear Technology. *Energy Harvesting Multisource Demo Board*. URL: <https://www.analog.com/en/design-center/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/dc2042a.html>.
- [4] Hope RF. *Low Power Long Range Transceiver Module RFM95W*. URL: <https://www.hoperf.com/modules/lora/RFM95.html>.
- [5] Semtech documentaion. *What are LoRa and LoRaWAN*. URL: <https://loradevelopers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/>.
- [6] Honeywell. *Honeywell Laser Particle Sensor Module HPM-Series, datasheet*. URL: <https://datasheet.octopart.com/HPMA115S0-XXX-Honeywell-datasheet-83173724.pdf>.
- [7] Arpav. *Monitoraggio della qualità dell'aria - Asolo, 2022*. 2022. URL: https://www.arpa.veneto.it/arpav/chi-e-arpav/file-e-allegati/dap-treviso/aria/dap-treviso-campagne-di-monitoraggio-qualita/comune-di-asolo/07_2022%20Relazione%20Asolo_2022.pdf.

-
- [8] Department of Computer Science University of Vaasa. “A practical approach to powering wireless sensor nodes by harvesting energy from heat flow in room temperature”. In: *IEEE* (2020). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5676640>.
- [9] Texas Instruments. *BQ25570EVM-206 Ultra Low Power Management IC, Boost Charger Nanopowered Buck Converter Evaluation Module*. 2021. URL: <https://www.ti.com/tool/BQ25570EVM-206>.

Ringraziamenti

Voglio infine riservare queste poche righe per ringraziare personalmente il mio relatore Pozzebon Alessandro la cui disponibilità non è mai mancata.

Grazie.