

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
CAMPUS DI CESENA
DIPARTIMENTO DI
INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA E
DELL'INFORMAZIONE "*GUGLIELMO MARCONI*"

Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica per l'Energia e
l'Informazione

PROGETTO DI UN MODULO DI ALIMENTAZIONE BASATO SU ENERGY HARVESTING PER UN NODO SENSORE LORAWAN

Elaborato in
Elettronica dei Sistemi Digitali

Relatore:
Prof. ALDO ROMANI

Presentato da:
ANDREA TIBERI

ANNO ACCADEMICO 2020/21

INDICE

INTRODUZIONE	1
1 Energy Harvesting.....	3
1.1 Power the IoT.....	4
1.2 LoRaWAN.....	6
2 Descrizione dei componenti e schema elettrico	8
2.1 AEM10941	8
2.1.1 Convertitore DC-DC ad alta efficienza	9
2.1.2 Fasi di funzionamento del sistema	10
2.2 Cella fotovoltaica	13
2.3 SCHEDA DISCOVERY B-L072Z-LRWAN1	15
2.4 Funzionamento e configurazione del sistema.....	17
3. Dimensionamento e configurazione del modulo di alimentazione	20
3.1 Dimensionamento del sistema di accumulo.....	20
3.2 Configurazione Cold Start.....	23
3.3 Alimentazione con LDO ad alta tensione	24
3.3.1 Custom mode	25
3.4 Alimentazione controllata da voltage monitor e switch .	27
3.5 Configurazione MPPT.....	29
3.6 Configurazione batteria esterna.....	30
3.7 Abilitazione del regolatore LDO ad alta tensione	32
3.8 Gestione dei segnali STATUS [1] e STATUS [2]	33
3.9 Tabella componenti.....	34
4. Collaudo	36

4.1	Caricamento del dispositivo di accumulo	37
4.2	Alimentazione del nodo sensore con LDO.....	39
	Conclusione.....	43
	Indice delle figure	44
	Indice delle tabelle.....	46
	Bibliografia.....	47

INTRODUZIONE

Il mondo del XXI secolo deve affrontare diverse sfide e una di queste è garantire cibo e salute ad una popolazione in costante crescita, mettendo in evidenza la necessità di creare un ambiente povero di inquinamento e il ripristino la biodiversità, ridotte notevolmente a causa dell'emergenza climatica. [1]

Affrontando le diverse problematiche ambientali, ci si sta accorgendo come l'*internet of Things (IoT)* sia un importante mezzo di supporto, che sta assumendo un ruolo sempre più determinante nella vita di tutti i giorni; infatti è già stato riconosciuto come una potente forza abilitante per affrontare gli obiettivi di sviluppo sostenibile delle Nazioni Unite. L'UE, inoltre, per puntare a diventare il primo continente privo di emissioni entro il 2050, prevede un "*green deal europeo*" in cui uno dei fattori chiave per raggiungere questo obiettivo sarà l'utilizzo di dispositivi innovativi, tra cui IoT. [2]

Questo tipo di tecnologia ha subito numerosi cambiamenti negli anni, in particolare dal punto di vista dell'efficienza energetica, che le ha permesso di avere una forte ascesa sui mercati e nelle nostre vite.

In questo elaborato, infatti, si cerca attraverso l'energy harvesting, di rendere indipendente la vita di un nodo sensore LoRaWAN da generatori d'alimentazione esterni. In particolare, il progetto consiste nel costruire un sistema che attraverso una cella fotovoltaica e un dispositivo di controllo riesca ad immagazzinare energia solare in un supercapacitore ed infine fornirla alla scheda esterna, in modo tale da avere sufficiente energia per trasferire i dati attraverso il protocollo LoRa.

Nel primo capitolo verrà introdotto il concetto di energy harvesting (facendo riferimento al range di potenze in cui lavora) e verrà evidenziato come questo possa essere una soluzione al problema che caratterizza l'alimentazione dei dispositivi IoT. Inoltre, verrà presentato il protocollo LoRa e le principali differenze che vi sono con il protocollo LoRaWAN.

Il secondo capitolo permette di comprendere il funzionamento del modulo di alimentazione. Inoltre, vengono presentati gli elementi principali, tra cui il microcontrollore che gestisce il flusso di energia nel sistema di accumulo, la cella fotovoltaica che permette la conversione della luce in energia elettrica e la discovery board su cui è presente il nodo sensore a cui si è fatto riferimento per la progettazione della scheda d'alimentazione.

Il terzo capitolo presenta le possibili configurazioni in cui la scheda può lavorare attraverso l'impostazione dei vari jumper presenti su di essa e le scelte prese per il corretto dimensionamento del modulo, in particolare del sistema di accumulo. Infine, nell'ultimo capitolo viene descritta la validazione sperimentale della scheda di alimentazione e le relative considerazioni.

1 Energy Harvesting

Nell'ambiente vengono disperse tantissime forme di energia, provenienti da fonti di natura fisica diverse, che solitamente viene sprecata poiché non immagazzinata.

L'energy harvesting, infatti, è un processo di raccolta dell'energia che si attiene a prelevarla direttamente dall'ambiente di fondo, attraverso trasduttori di piccole dimensioni che permettono di raccogliere potenze elettriche dell'ordine dei μW .

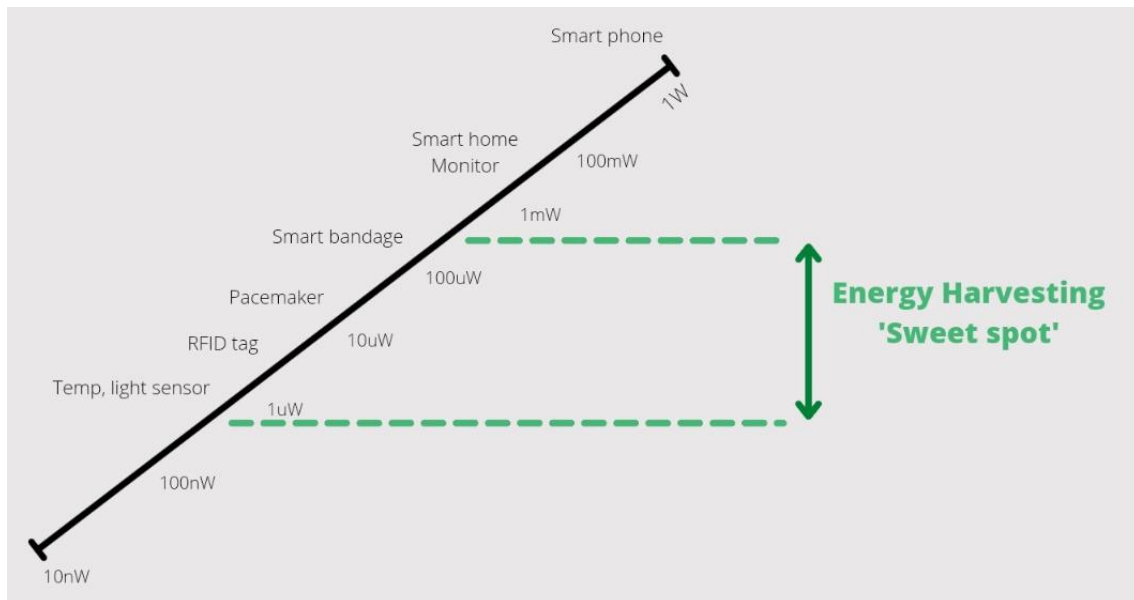


Figura 1: Range di potenze tipiche in applicazioni di energy harvesting[1]

Dato che le energie recuperabili attraverso la modalità harvesting sono molto basse e discontinue, appartenenti a un range tipicamente compreso tra i $100 \mu\text{W}$ e $0.1 \mu\text{W}$, è necessario un sistema di raccolta e gestione dell'energia, ad esempio basato su supercapacitori e architetture low-power [1].

L'obiettivo di produrre sistemi completamente privi di batteria è raggiungibile attraverso l'energy harvesting, in particolare, attraverso lo sfruttamento di tutte le

risorse che fornisce l'ambiente, tra cui: vibrazioni meccaniche, pressione, radiofrequenze, campi magnetici, movimento, luce.

Tra le tecniche di harvesting più note, vi è sicuramente quello fotovoltaico. Con l'affinarsi delle tecniche costruttive è stato possibile diminuire, sempre di più, le dimensioni delle celle, ottenendo comunque un'efficienza di conversione del 10%. Solitamente questa tecnologia è nota per impianti di grandi dimensioni per elevate potenze. Allo stesso tempo, grazie alla sua caratteristica di essere facilmente utilizzabile, l'energy harvesting fotovoltaico è di grande interesse anche per la microelettronica, in particolare, per la realizzazione di sistemi *zeropower*. [3]

1.1 Power the IoT

Un problema che caratterizza i dispositivi IoT è che le batterie comuni non sono in grado di poterli alimentare per tutta la loro vita, a causa delle loro continue richieste di energia che impiegano per svolgere il lavoro che gli è stato assegnato. Se la maggior parte dei dispositivi ha una vita operativa di circa dieci anni, ciò comporterà frequenti sostituzioni della batteria.

Tutto questo presenta problemi economici ed ambientali, legati alla produzione e allo smaltimento quotidiano di centinaia di milioni di batterie.

Ciascun sensore dovrebbe, perciò, essere in grado di poter raccogliere e immagazzinare energia da persone, cose e ambiente, in modo tale da poter elaborare e trasmettere dati rilevanti.

Di conseguenza l'adozione diffusa di soluzioni IoT senza batteria dipende dal superamento del problema "Power the IoT", come viene citato nell'articolo "Research Infrastructure Position Paper" del progetto europeo H2020 ENABLE, il quale richiede l'utilizzo di dispositivi e tecniche costruttive che riescano a creare dei sistemi in grado di essere alimentati mediante energy harvesting, riducendo il divario tra l'energia richiesta e l'energia disponibile.[1]

Attraverso l'integrazione di più tecnologie e considerando, non solo dove l'energia viene immagazzinata, ma anche l'ambiente da cui viene estratta, è possibile ridurre fortemente questo divario.

L'alimentazione autonoma è possibile per molti dispositivi al di sotto dei 100 μW e la possibilità di utilizzare più fonti di energia aumenta al diminuire della potenza richiesta. [1]

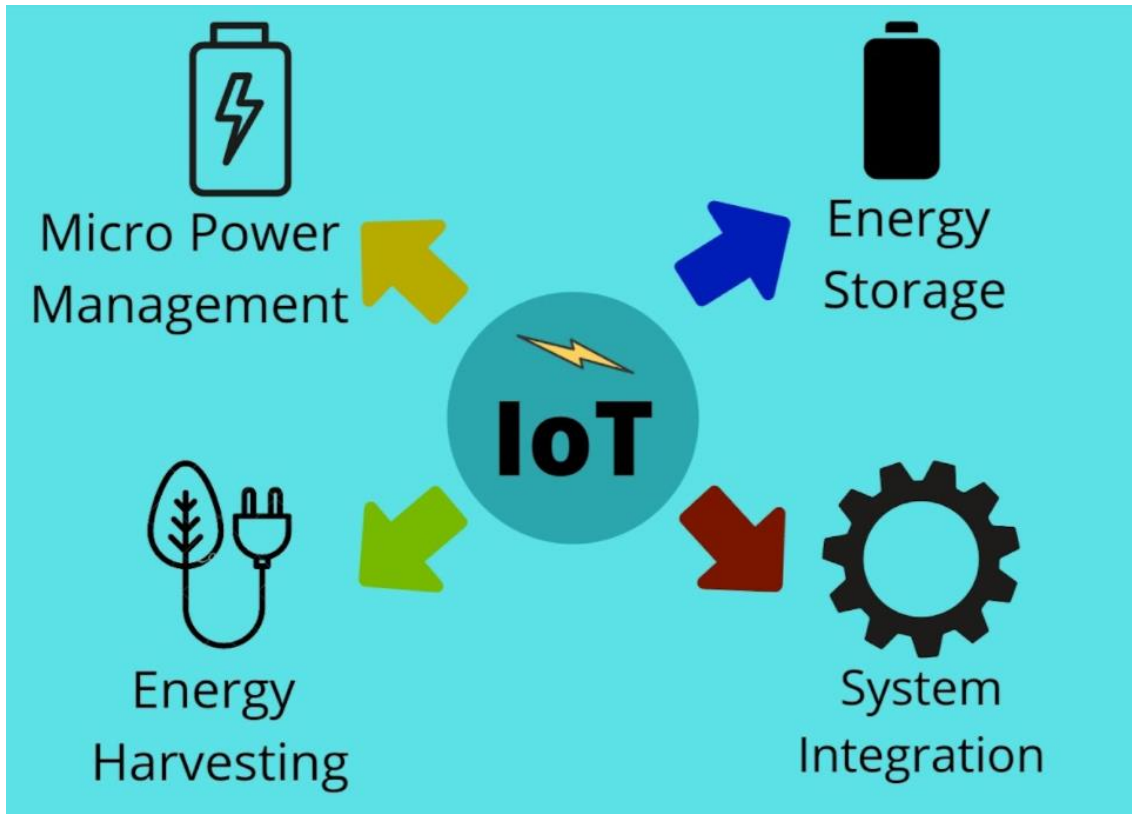


Figura 2: Gli ambiti applicativi del progetto H2020 ENABLES [1]

Tuttavia, se il consumo di energia fosse ulteriormente ridotto, la possibilità di utilizzare piccoli dispositivi di immagazzinamento dell'energia, come supercapacitori, porterebbe ad un aumento notevole della durata della batteria. Creando, dunque, sistemi che siano in grado integrare l'energy harvesting, energy storage, power management e la loro integrazione nel sistema IoT in maniera efficiente, sarà possibile rendere completamente autonoma la vita di questi nodi sensoriali.

1.2 LoRaWAN

LoRa è un protocollo di comunicazione che contribuisce allo sviluppo delle LPWAN (Low Power Wide Area Network), cioè reti wireless che presentano basso consumo di energia e in grado di effettuare trasmissioni a lungo raggio, mediante l'utilizzo di un basso bit rate, al di sotto dei 27 Kb/s.[4]

Il protocollo prevede una modulazione di frequenza spread-spectrum, derivato dalla tecnologia CSS (Chirp Spread Spectrum) nella quale il segnale decresce e cresce in maniera lineare nelle frequenze, inizialmente impiegato in applicazioni militari. [5]

Una caratteristica principale di questo tipo di modulazione è che permette ai segnali di impiegare lunghe tratte con ottima resistenza agli ostacoli e al rumore, garantendo robustezza nella trasmissione dell'informazione.

Il protocollo LoRa definisce lo strato inferiore della rete, mentre LoRaWAN è uno dei numerosi protocolli usati per definire lo strato fisico superiore. Il LoRaWAN, in particolare, è un protocollo di livello MAC (Media Access Control) che ha la funzione di gestire le comunicazioni tra altri nodi sensore e server LPWAN, i quali impongono diverse caratteristiche tra cui: basso consumo energetico, sicurezza, qualità e ampio raggio della comunicazione.[6]

Mediante LoRa, che permette comunicazioni a lungo raggio e LoRaWAN che definisce il protocollo di comunicazione e l'architettura del sistema di rete, è possibile implementare numerose applicazioni IoT, in cui i dispositivi sono impegnati in comunicazioni a bassissima energia e ampia distanza tra di essi.

Il protocollo utilizza frequenze di lavoro tra 863 e 870 MHz, ma può funzionare a 433 MHz, cioè all'interno della banda ISM (Industrial, Scientific, Medical). Questo range di frequenze, definite anche Sub GigaHertz, permette al di impiegare distanze maggiori rispetto a frequenze dell'ordine di qualche GHz, ma con una notevole diminuzione dell'ampiezza di banda e quindi della velocità di trasmissione. Questa soluzione, infatti, è adatta per applicazioni industriali e scientifiche, nelle quali può essere richiesto l'acquisizione di dati raccolti da sensori.

La potenza di trasmissione tipicamente utilizzata durante la comunicazione è 25 mW, circa 14 dB, ovvero uno dei valori più utilizzati nelle comunicazioni che riguardano apparati LPWAN. [7]

2 Descrizione dei componenti e schema elettrico

In questo capitolo vengono esposti i principali componenti utilizzati per la realizzazione del progetto, tra cui il microcontrollore AEM10941 [8], la cella fotovoltaica AM-1454 [9] e la scheda discovery board B-L072Z-LRWAN1[10]. Inoltre, viene presentato lo schema elettrico del modulo d'alimentazione disegnato con il programma 'Kicad'[11] e il relativo funzionamento.

2.1 AEM10941

Un Ambient Energy Manager, noto come AEM prodotto dell'azienda E-peas, appartiene alla categoria di '*Power Management Integrated Circuit*' (PMIC) e può essere considerato come il cuore del sistema d'alimentazione; infatti come detto già in precedenza si occupa della gestione, dell'immagazzinamento e distribuzione dell'energia, mediante l'utilizzo della sua logica interna.

Il circuito integrato è stato costruito in modo tale che sia in grado di raccogliere energia tramite energy harvesting principalmente da pannelli solari (fino a un massimo di sette celle), per poi immagazzinarla nel dispositivo di accumulo, gestendo la potenza con bassissime perdite.

Questa energia verrà poi utilizzata per alimentare, attraverso LDO (Low-Dropout regulator), due tensioni regolate e indipendenti.

Lo scopo del AEM10941 è quello di eliminare il classico elemento di accumulo usa e getta (batteria) nelle applicazioni dell'*Internet of Things*, come i nodi sensore per il monitoraggio dell'ambiente.

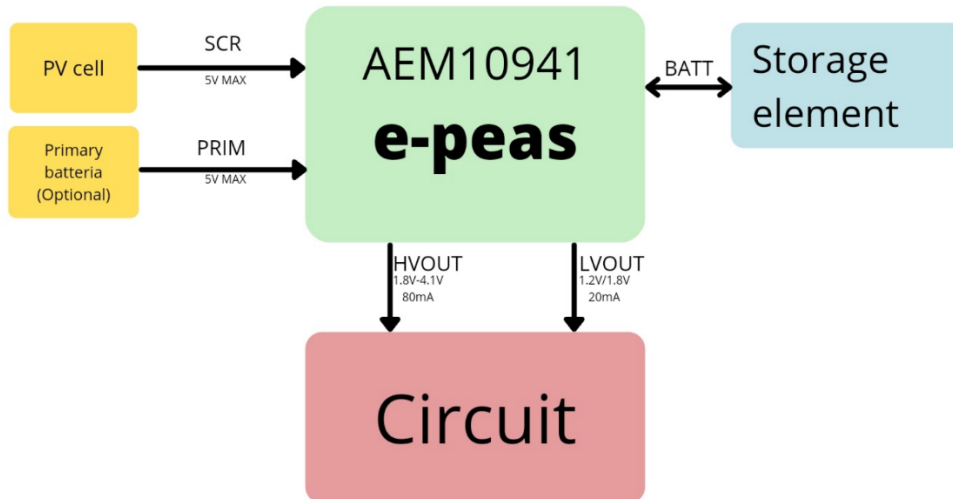


Figura 3: Schema semplificato del funzionamento del circuito integrato AEM10941

2.1.1 Convertitore DC-DC ad alta efficienza

All'interno presenta un convertitore DC-DC, ad elevata efficienza, costituito da una cascata di due regolatori a switching converter, in particolare un *boost converter* e un *buck converter*, implementati attraverso condensatori e induttori esterni al chip, come si può vedere in Figura 4.

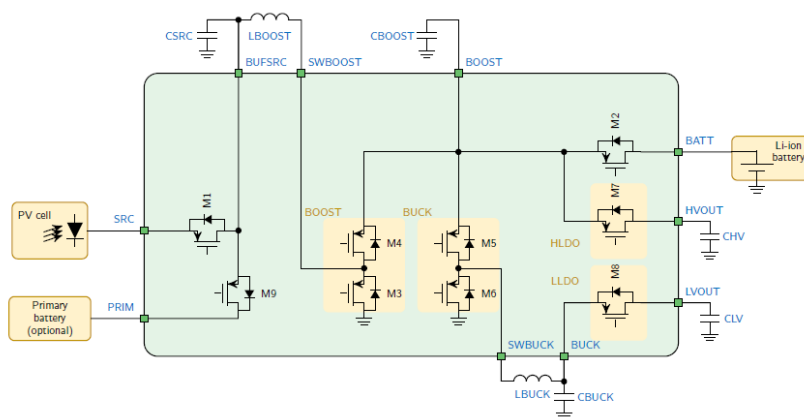


Figura 4: Schema semplificato della struttura interna del circuito, come riportato in [8]

Boost converter

Il convertitore permette di gestire la potenza in ingresso al dispositivo e di immagazzinare l'energia nei dispositivi di accumulo, tramite un apposito sistema di interruttori in tecnologia MOS.

Inizialmente, come mostrato in Figura 4 il sistema carica il condensatore sul nodo BUFSRC fino a un valore V_{SRC} compreso in un range di tensioni tra 2.2 V a 4.5 V, in base alle soglie del sistema configurato.

Ogni 5 secondi, inoltre, il sistema di MPPT (Maximum Power Point Tracking) scollega per 82 ms la sorgente e ne misura la tensione a vuoto V_{OC} , da cui ne ricava la tensione di riferimento V_{MPP} , informando l'utente attraverso il flag STATUS [2].

Oltre che calcolare la tensione corrispondente al punto di massima potenza (MPP), il sistema compara continuamente V_{SRC} e V_{MPP} . Quando il primo valore supera con una piccola isteresi il valore MPP, il convertitore boost viene acceso, mediante l'abilitazione dei transistor M3 e M4, estraendo carica dal condensatore C_{SRC} , in modo da ridurne l'energia e caricare l'elemento di accumulo. Invece, quando la tensione sul nodo scende al di sotto del valore V_{MPP} , a meno di una piccola isteresi, il convertitore viene spento in modo tale da farlo ricaricare.

Buck Converter

Il Buck converter a differenza del primo convertitore ha la funzione di abbassare la tensione presente sul nodo di BOOST, rendendo disponibile al nodo BUCK, attraverso i transistor M5 e M6, una tensione V_{BUCK} costante pari a 2.2 V, utilizzata anche internamente.

2.1.2 Fasi di funzionamento del sistema

Affinché l'alimentazione fornita all'esterno sia stabile, il chip segue un preciso algoritmo di funzionamento, come si può vedere in figura 5, il quale, attraverso delle soglie di tensione riferite ai dispositivi di accumulo, sceglie il suo stato di lavoro.

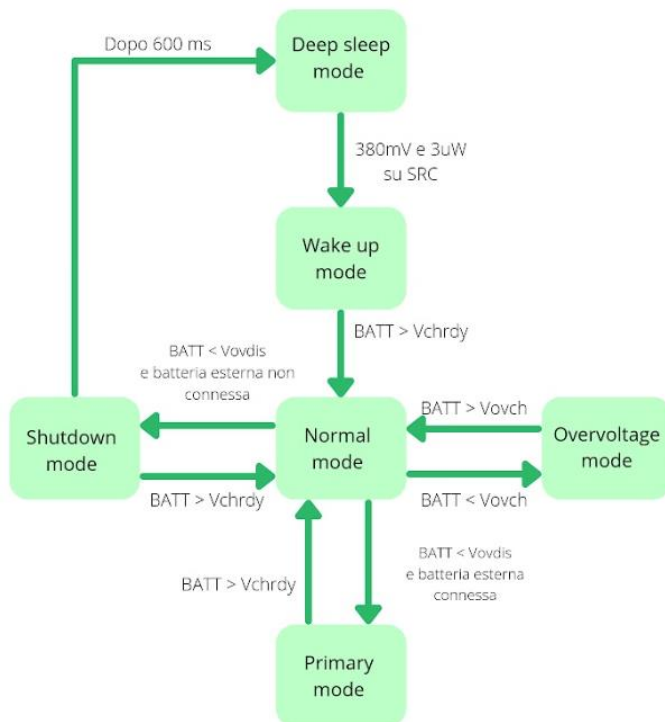


Figura 5: Algoritmo di funzionamento del circuito integrato AEM10941 [8]

1. Wake up mode

La fase di *Wake up mode* permette il ‘risveglio’ del PMIC e la ricarica del sistema di accumulo.

Non appena la cella fotovoltaica fornisce, sull’ingresso SRC, dei valori di tensione e potenza superiori alla soglia di accensione, scelta dall’utente mediante il dimensionamento del partitore di resistenze connesso tra i pin SRC e FB_COLD, il micro accende i convertitori e inizia ad accumulare energia.

Raggiunta la tensione V_{CHRDY} sul pin BATT, sistema è pronto per abilitare gli LDO e passa alla fase *Normal mode*.

2. Normal mode

In *Normal mode* la tensione sui dispositivi di accumulo è superiore alla tensione di riferimento V_{CHRDY} e quindi è considerata sufficiente per sopperire alle richieste energetiche del carico e del chip stesso. Il chip, inoltre, abilita il flag STATUS [0],

in modo tale che l'utente sia informato della possibilità di utilizzare i dispositivi LDO.

Per l'accensione dei due LDO, il micro predispone due pin ENLV e ENHV sui cui è necessario fornire V_{BUCK} o GND affinché vengano alimentate le relative uscite LVOUT e HVOUT.

ENLV	ENHV	LV output	HV output
0	0	Disabilitato	Disabilitato
0	1	Disabilitato	Abilitato
1	0	Abilitato	Disabilitato
1	1	Abilitato	Abilitato

Tabella 1: abilitazione e disabilitazione dei LDO mediante pin ENLV e ENHV [8]

In particolare, in questa fase la tensione presente sui supercapacitori è uguale alla tensione erogata dal boost converter, permettendo una continua carica anche dopo l'abilitazione degli LDO.

3. Overvoltage mode

Quando l'uscita sul pin BATT supera la soglia V_{OVCH} il chip entra nella fase *overvoltage mode*.

Il caricamento dei supercapacitori è concluso e, attraverso un'isteresi di qualche mV, la logica interna mantiene la tensione sul nodo BATT a V_{OVCH} , abilitando periodicamente il boost converter, in modo tale da non danneggiare i sistemi di accumulo a causa dell'eccessivo valore di tensione. Inoltre, quando il convertitore è spento, per evitare possibili scariche di corrente da parte della sorgente, quando V_{SRC} è maggiore di V_{OVCH} , viene scollegata la cella fotovoltaica dal circuito interno attraverso lo spegnimento del transistor M1 (Figura 4).

4.Primary mode

Questo stato di funzionamento è raggiungibile solo quando la tensione su BATT è scesa al di sotto di V_{OVDIS} ed è collegata al sistema una batteria esterna sul pin PRIM. Quest'ultima rende il funzionamento del sistema più robusto, poiché si sostituisce ai supercapacitori finché questi non raggiungeranno di nuovo la tensione V_{CHRDY} .

In questa situazione, il sistema abilita il flag STATUS [1] in modo tale che l'utente sappia che la batteria esterna si sta scaricando e possa intraprendere specifiche azioni.

5.Shutdown mode

Il sistema inizia il suo spegnimento quando entra in questa fase, in particolare quando la carica su BATT è al di sotto di V_{OVDIS} e non è presente nessuna batteria esterna, oppure quando la carica su di essa non è sufficiente.

Affinché il dispositivo esterno venga avvisato del possibile spegnimento dell'alimentazione, viene abilitato il flag STATUS [1].

Il sistema mantiene questa fase complessivamente per 600 ms, per poi spegnersi se la tensione sul sistema di accumulo non ritorna al di sopra di V_{CHRDY} .

2.2 Cella fotovoltaica

Il dispositivo preso in considerazione è una cella fotovoltaica, prodotta da Panasonic, in silicio amorfo per applicazioni indoor, della serie 'Amorton'.

La costruzione della cella con questo tipo di materiale garantisce robustezza e leggerezza, con dimensioni molto ridotte rispetto alle celle solari di tipo cristallino. Infatti, grazie alla tecnica di produzione adottata dal costruttore, ovvero, di utilizzare una superficie in vetro di appena un millimetro, le permette di essere molto sottile e allo stesso tempo piuttosto resistente.

Queste celle, essendo state progettate per lavorare con gli spettri tipici della radiazione luminosa presente in ambienti indoor, permettono di avere ai loro capi una tensione e una corrente relativamente stabili anche in condizioni di scarsa luminosità, rendendole ottime per applicazioni di energy harvesting inerenti all'alimentazione di nodi sensori autonomi da interno.

Poiché la scheda di comunicazione verrà utilizzata specialmente in ambienti al chiuso, è necessario utilizzare tecnologie indoor, in particolare la cella solare scelta per questo progetto è il modello AM-1454 [9], di dimensioni confrontabili con il modulo LoRaWAN di STMicroelectronics utilizzato.

All'interno di questo dispositivo sono presenti quattro celle collegate in serie che garantiscono maggiore tensione in uscita.

Come si può vedere in Figura 6, il dispositivo garantisce un livello di tensione a vuoto $V_{oc} = 2.4 \text{ V}$ e una corrente di cortocircuito $I_{sc} = 35 \mu\text{A}$, con 200 Lux (situazione tipica) presenti nella stanza.

Il range di luce che può sopportare prima che si danneggi va da 0 a 1000 Lux; perciò, è possibile utilizzarla anche per situazioni outdoor dove non vi è eccessiva luminosità e in ambienti indoor dove la luce artificiale è molto forte.

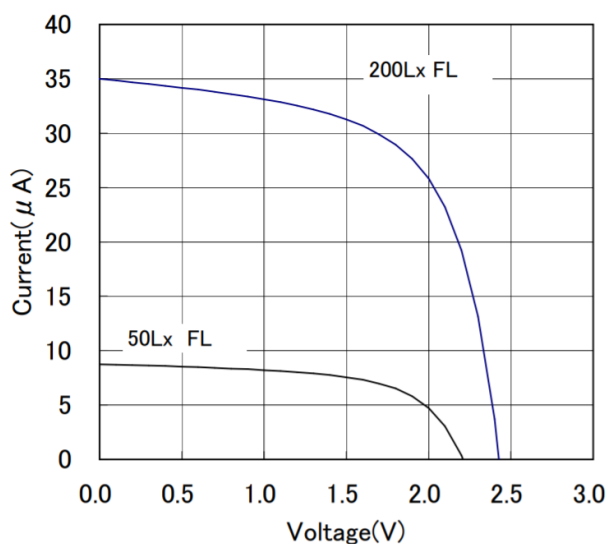


Figura 6: Andamento tensione-corrente ai capi della cella fotovoltaica [9]

2.3 SCHEDA DISCOVERY B-L072Z-LRWAN1

La scheda alimentata dal sistema progettato, è una discovery board B-L072Z-LRWAN1 di STMicroelectronics [10]. Questa presenta al suo interno un modulo CMWX1ZZABZ-091 di Murata, che implementa le varie specifiche del protocollo LoRaWAN e, perciò, rappresenta il cuore del sistema di comunicazione. All'interno del modulo è presente anche un microcontrollore STM32L072CZ che permette di lavorare a bassissima potenza, attraverso delle funzioni di 'sleep' avanzate che disabilitano le periferiche, quando non vi è comunicazione. Sempre all'interno del modulo è integrato un transceiver LoRa Semtech SX1276.

Inoltre, sono state apportate delle modifiche hardware, svolte e illustrate nella tesi di uno studente dell'Università di Bologna [7], che aveva studiato il comportamento dal punto di vista energetico della medesima scheda in diverse condizioni di funzionamento. Queste modifiche permettono di eliminare le componenti superflue alla comunicazione e consentono di usufruire di consumi ridotti dal punto di vista energetico. Questo è stato svolto con lo scopo di minimizzare il consumo di potenza da parte della scheda Discovery, in modo tale da completare la comunicazione utilizzando la minor energia possibile.

La scheda di alimentazione si collegherà alla Discovery board, mediante due connettori V3 Arduino, chiamati CN4 e CN5 (Figura7). In particolare, su CN4 è presente un pin di alimentazione 3V3 e due per la connessione a massa, invece su CN5 sono presenti due pin che ascoltano i flag 1 e 2 generati dal modulo di alimentazione.

Dal punto di vista energetico la Discovery, per funzionare correttamente, richiede sul suo pin di alimentazione 3V3 una tensione, fornita da un dispositivo esterno, che deve essere compresa tra i 3.3 V e 2.2 V da datasheet. Inoltre, tramite valutazioni sperimentali descritte in [7], si è osservato come questa possa effettuare correttamente una trasmissione di dati con una tensione minima di alimentazione di circa 1.9 V.

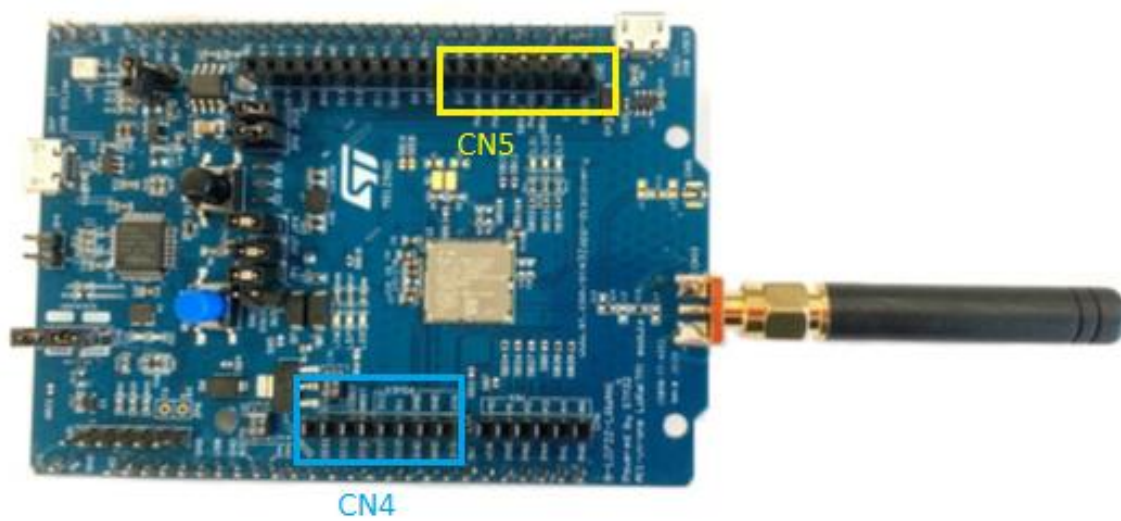


Figura 7: Discovery board B-L072Z-LRWAN1 di STMicroelectronics [7]

2.4 Funzionamento e configurazione del sistema

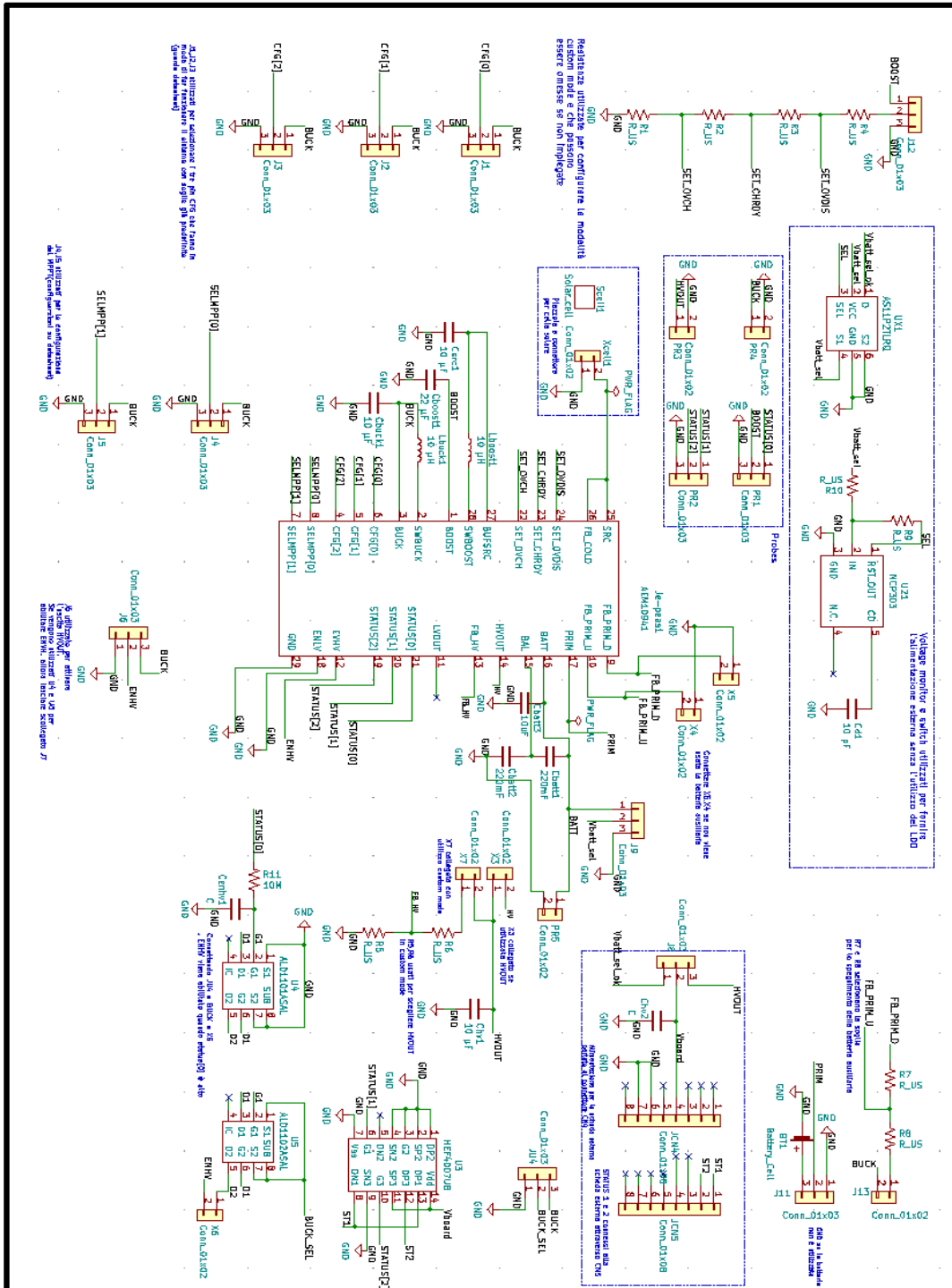


Figura 8: Schematico del modulo realizzato con il software KiCad [11]

Il modulo di alimentazione inizia a funzionare quando la cella fotovoltaica, connessa al pin SRC dell'AEM10941, inizia a convertire la luce in energia elettrica, fornendo valori di tensione e potenza superiori a 380 mV e 3 μ W.

Successivamente, la logica interna del PMIC AEM10941 attraverso un algoritmo di funzionamento FOCV MPPT (fractional open circuit voltage maximum power point tracking), che sfrutta il convertitore boost, inizia a caricare il sistema di accumulo, composto da due supercapacitori B0510-2R5224-R, scelti per le particolari caratteristiche costruttive relative alla loro elevata capacità e bassa resistenza serie, che permette di contenere un elevata densità di energia al loro interno e compatibile con l'energia consumata per trasmettere un dato con il protocollo LoRaWAN.

L'utente oltre che scegliere le soglie di funzionamento del sistema attraverso i jumper presenti sulla scheda, ha la possibilità di decidere come alimentare il nodo sensore esterno; infatti, la tensione V_{BOARD} che fornirà il modulo può essere gestita con LDO, oppure mediante un load switch controllato da un voltage monitor, connesso direttamente al nodo BATT.

Raggiunta la soglia minima di tensione V_{CHRDY} sul pin BATT è possibile effettuare l'abilitazione degli LDO da parte dell'utente. In particolare, l'LDO ad alta tensione può essere abilitato mediante jumper, oppure automaticamente dal modulo, anche attraverso un buffer, che fornisce la tensione V_{BUCK} al pin ENHV, quando il flag di STATUS [0] sale al valore logico '1'. L'LDO ad alta tensione, interno al PMIC, è in grado di funzionare con diverse tensioni di uscita, scelte attraverso l'impostazione dei pin CFG [2:0], inoltre, presenta una massima caduta di 300 mV ai suoi capi quando eroga una corrente massima di 80 mA, compatibile con la richiesta di corrente del modulo di comunicazione LoRaWAN quando trasmette un dato.

Poiché non utilizzato nel sistema, l'LDO a bassa tensione è lasciato spento attraverso la connessione di ENLV a GND.

A differenza del primo dispositivo di alimentazione, che usufruisce della circuiteria interna del PMIC, il secondo sistema costituito da voltage monitor NCP303LSN20T1 [12] e da switch AS11P2TLR [13], è connesso direttamente ai supercapacitori e ne gestisce la carica e la scarica attraverso il rilevamento di

specifiche soglie di funzionamento. In particolare, quando i sistemi di accumulo raggiungono la tensione $V_{MAX} = 3 \text{ V}$, il voltage monitor inizia a caricare un condensatore C_D mediante una resistenza di pull-up. Raggiunta la tensione $0.645 \cdot V_{IN}$ sul pin a cui è connesso C_D , corrispondenti a 1.935 V sul nodo BATT, il sistema inizia ad alimentare il nodo sensore e smette quando la tensione sul nodo BATT cala al di sotto $V_{min} = 2.1 \text{ V}$, in modo tale da permettere al sistema di accumulo di ricaricarsi. In particolare, le soglie di accensione e spegnimento, sono scelte attraverso il dimensionamento di una certa isteresi V_{HYSnew} mediante due resistenze R9 e R10.

Affinché la scheda progettata possa essere connessa elettricamente al nodo sensore come shield, sono stati predisposti due connettori JCN4 e JCN5 che sono collegati direttamente a CN4 e CN5 della scheda LoRaWAN. In particolare, la tensione di alimentazione e il riferimento a massa verranno forniti sul connettore CN4 al pin 3V3 e GND, a differenza dei flag di sistema 1 e 2 connessi a CN5 su cui sono presenti numerose porte di I/O.

3. Dimensionamento e configurazione del modulo di alimentazione

Nel seguente paragrafo vengono mostrate le possibili configurazioni, con cui il modulo d'alimentazione può funzionare, attraverso l'impostazione dei vari jumper presenti sulla scheda. Inoltre, viene mostrata la scelta fatta per il dimensionamento del sistema di accumulo, facendo riferimento ai grafici relativi al consumo durante la fase di trasferimento dati con sistema LoRa, estratti dalla precedente tesi riguardante il sistema da alimentare.[7]

Infine, viene mostrata una tabella in cui sono elencati tutti i componenti utilizzati nel progetto, con i relativi codici del produttore.

3.1 Dimensionamento del sistema di accumulo

Partendo dalle considerazioni e grafici (figura 9 e figura 10) relativi alle richieste energetiche del nodo sensore, descritti nella tesi "Progetto di un nodo sensore LoRaWAN su piattaforma STM32" [7], si è scelto di utilizzare i supercapacitori B0510-2R5224-R, della marca EATON [14]; i quali presentano capacità di 220 mF e resistenza serie ESR = 2 Ω. Poiché ai loro capi la loro tensione massima di lavoro è 2.5 V e quindi non sufficiente alle specifiche da noi richieste, è stato necessario collegarne due in serie in modo tale da poter avere una maggiore tensione operativa, ottenendo complessivamente un ESR di 4 Ω e una capacità di:

$$C = \left[\left(\frac{1}{C_{BATT1}} \right) + \left(\frac{1}{C_{BATT2}} \right) \right]^{-1} = \frac{C_{BATT1} * C_{BATT2}}{C_{BATT1} + C_{BATT2}} = 110 \text{ mF}$$

Come si vede in Figura 9, il nodo sensore LoRaWAN presenta diversi consumi di corrente a seconda della tensione di alimentazione che viene fornita sul pin 3V3. In particolare, partendo dalla tensione di alimentazione 2.2 V fino ad arrivare alla tensione 3.3 V la corrente consumata durante la comunicazione (che avviene per tre volte ogni secondo, come da protocollo di comunicazione, per poi entrare in fase di 'sleep' avanzato, in cui la richiesta di corrente è di 5 μ A) aumenta, così aumentando la potenza assorbita a discapito del modulo di alimentazione. Infatti, come illustrato in Figura 10, alla fine della comunicazione l'energia assorbita dal nodo sensore alimentato con 3.3 V è molto superiore rispetto a quella consumata con 2.2 V.

Facendo riferimento al caso in cui l'alimentazione del sistema è fornita con switch e voltage monitor, l'energia che può fornire il supercapacitore partendo dalla soglia di accensione $V_{MAX} = 3$ V (non considerando che l'accensione avviene dopo che il condensatore C_D raggiunge tensione $0.675 \cdot V_{IN}$), fino ad arrivare alla tensione di spegnimento $V_{min} = 2.1$ V è:

$$E = \frac{1}{2} C (V_{max}^2 - V_{min}^2) = 252.4 \text{ mJ}$$

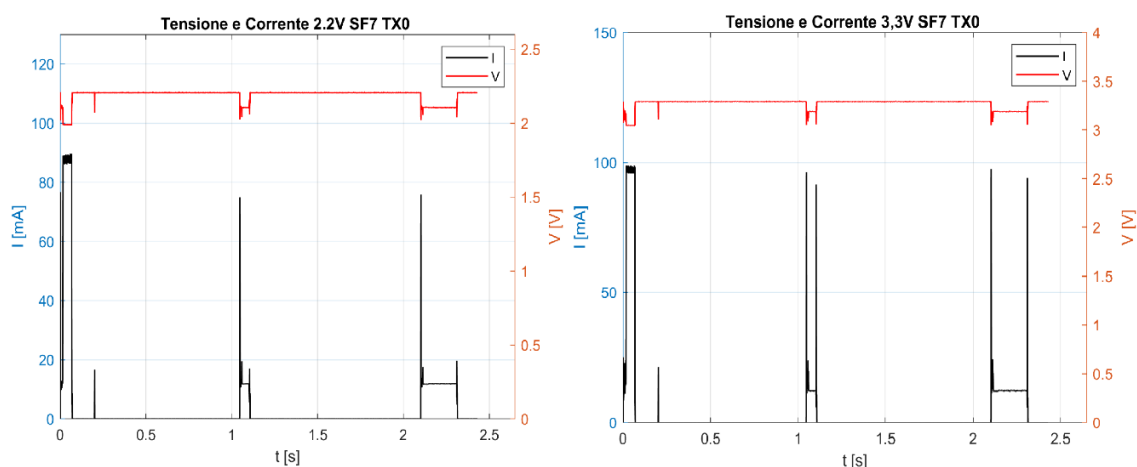


Figura 9: Consumi di corrente e tensione del nodo sensore, come riportati in [7]

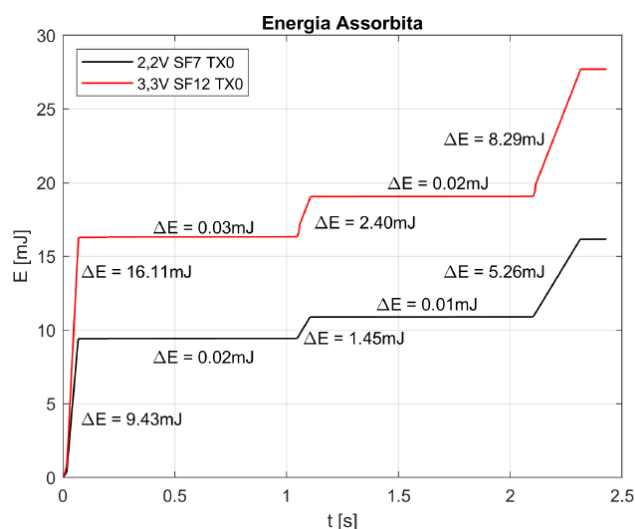


Figura 10: Consumi di energia del nodo sensore, come riportati in [7]

Per cui, dal calcolo appena effettuato, è possibile constatare, osservando la Figura 10, come il nostro sistema di accumulo possa fornire un'energia molto superiore a quella effettivamente richiesta, poiché il nodo sensore alimentato con 3.3 V nel caso ideale richiede un'energia pari a $E_{3.3} = 27.76$ mJ per completare la comunicazione.

Facendo ora riferimento ai valori di tensioni e corrente illustrati in Figura 9, si è simulato tramite il software 'Spice' il comportamento della tensione ai capi del sistema di accumulo nel caso in cui il picco di corrente sia prolungato per un tempo superiore a quello reale, in modo tale da dimostrare il corretto funzionamento del sistema. Infatti, come illustrato in Figura 11, supponendo che il condensatore C_D , collegato al voltage monitor, raggiunga $0.675 \cdot V_{IN}$ quando la tensione ai capi dei supercondensatori sia di 2.8 V (V_{MAX}), questa calerà fino a un massimo di 2.41 V considerando le cadute resistive, nel caso in cui il carico richiedesse 80 mA per 0.1 s. Potendo, quindi, dimostrare il corretto funzionamento del sistema, poiché la Discovery consuma 80 mA per circa 0.05 s, ogni volta che viene trasmesso un dato.

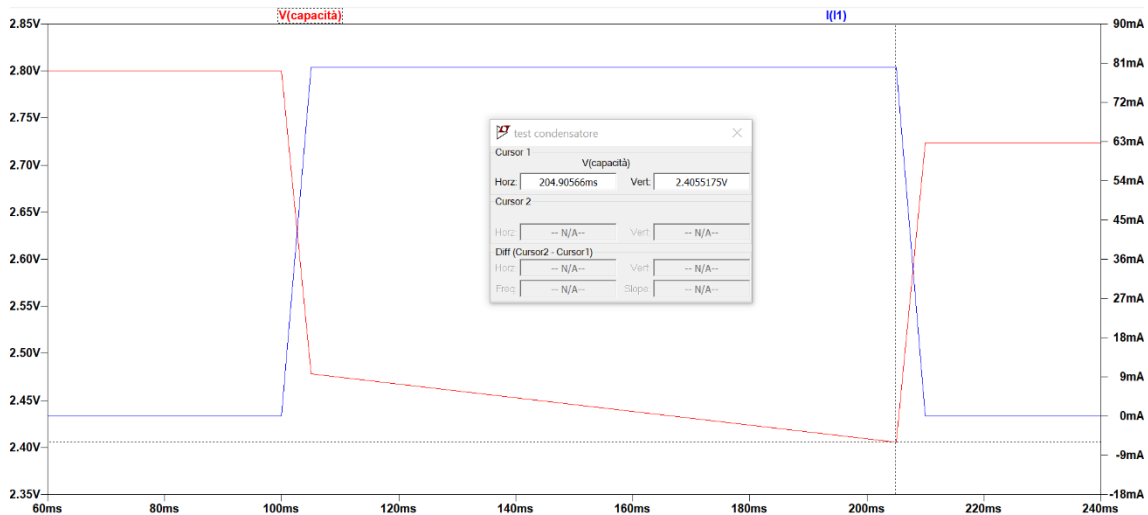


Figura 11: Simulazione della tensione sul supercapacitore alle richieste di corrente da parte del carico ($C_{BATT} = 110 \text{ mF}$, $I = 80 \text{ mA}$ per $t = 0.1 \text{ s}$, $V_{MAX} = 2.8 \text{ V}$).

3.2 Configurazione Cold Start

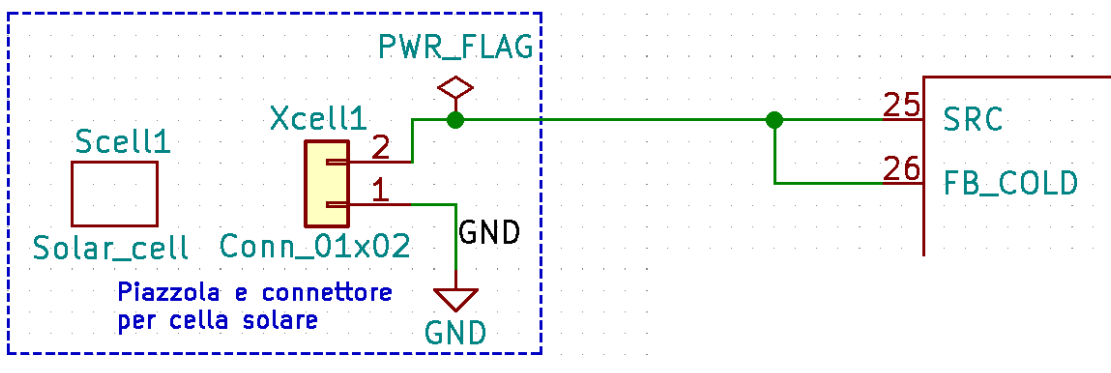


Figura 12: Ingresso cella fotovoltaica

Affinché il PMIC inizi a funzionare ed entri fase di *Wake up mode* la cella fotovoltaica deve fornire sull'ingresso SRC dei valori di tensione e potenza superiori a quelli di default, o scelti dall'utente mediante il dimensionamento del partitore resistivo tra i pin SRC e FB_COLD.

Poiché non vi è la necessità di avere dei valori di 'risveglio' più alti di quelli offerti di default dal micro, questi due ingressi sono cortocircuitati (figura 12) e quindi le

resistenze non collegate. In particolare, è sufficiente che la cella solare eroghi 380 mV e 3μW affinché il sistema esca dalla fase di *Deep sleep mode*.

3.3 Alimentazione con LDO ad alta tensione

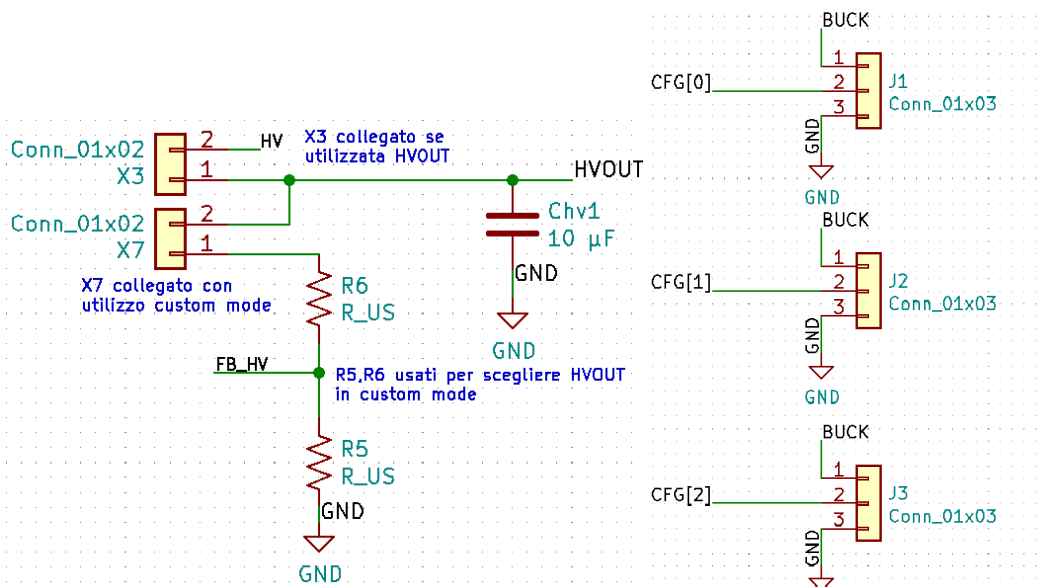


Figura 13: Componenti per la gestione del LDO ad alta tensione

Le soglie di tensione per il funzionamento del sistema e l'abilitazione degli LDO possono essere selezionate attraverso i jumper J1, J2, J3, connessi ai tre pin CFG [2:0]. Come si vede in figura 14, il dispositivo AEM10941 permette a seconda dei valori logici sui suoi pin di configurazione di utilizzare delle soglie di funzionamento e valori di uscita degli LDO, già predefiniti dal costruttore.

Configuration pins			Storage element threshold voltages			LDOs output voltages	
CFG[2]	CFG[1]	CFG[0]	Vovch	Vchrdy	Vovdis	Vhv	Vlv
1	1	1	4.12 V	3.67 V	3.60 V	3.3 V	1.8 V
1	1	0	4.12 V	4.04 V	3.60 V	3.3 V	1.8 V
1	0	1	4.12 V	3.67 V	3.01 V	2.5 V	1.8 V
1	0	0	2.70 V	2.30 V	2.20 V	1.8 V	1.2 V
0	1	1	4.50 V	3.67 V	2.80 V	2.5 V	1.8 V
0	1	0	4.50 V	3.92 V	3.60 V	3.3 V	1.8 V
0	0	1	3.63 V	3.10 V	2.80 V	2.5 V	1.8 V
0	0	0	Custom mode - Programmable through R1 to R6				1.8 V

Figura 14: Valori delle soglie di tensione per il funzionamento nelle configurazioni predefinite [8]

Quando viene utilizzata una configurazione predefinita, diversa da quella *custom*, è necessario impostare i jumper come descritto in Tabella 2.

J1	CFG [0]	X
J2	CFG [1]	X
J3	CFG [2]	X
J12	SET	GND
X3	HV_OUT	ON
X7	FB_HV	OFF
J9	Vbatt_sel	GND
J8	Vboard	HVOUT

Tabella 2: Alimentazione del nodo sensore con soglie di tensione predefinite

3.3.1 Custom mode

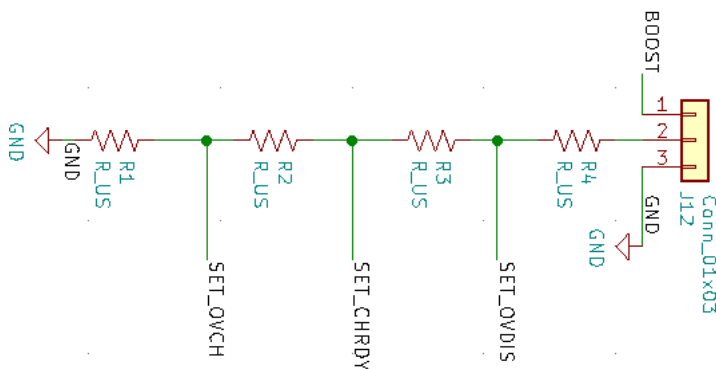


Figura 15: Partitore resistivo per selezionare le soglie nella modalità custom mode

Collegando i tre pin di configurazione a GND, l'utente ha la possibilità di usufruire della modalità *Custom mode*, la quale permette di selezionare le soglie del sistema e la tensione di uscita del LDO ad alta tensione mediante dei partitori resistivi.

I valori delle tensioni V_{OVCH} , V_{CHRDY} , V_{OVDIS} che rappresentano le regioni di funzionamento del convertitore, sono definiti mediante le resistenze R1, R2, R3

e R4 collegate rispettivamente agli ingressi SET_OVCH, SET_CHRDY, SET_OVDIS, come si vede in Figura 15.

Per il corretto funzionamento della scheda LoRaWAN con tensione di alimentazione di $V_{HV} = 2.1 \text{ V}$ uscente dal LDO, in modo tale che i consumi energetici siano ridotti il più possibile, sono state scelte le soglie di tensione (Tabella 3) che garantiscano il completo trasferimento dei dati inviati, senza rischiare di far spegnere il modulo d'alimentazione.

V_{OVCH}	2.86 V
V_{CHRDY}	2.79 V
V_{OVDIS}	2.27 V

Tabella 3: soglie di lavoro in Custom mode

Affinché queste scelte di progetto siano rispettate, sono state calcolate le resistenze del partitore, come segue:

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 40 \text{ M}\Omega$$

$$1 \text{ M}\Omega \leq R_T \leq 100 \text{ M}\Omega$$

$$R_1 = R_T \left(\frac{1}{V_{ovch}} \right) = 15 \text{ M}\Omega$$

$$R_2 = R_T \left(\frac{1}{V_{chrDY}} - \frac{1}{V_{ovch}} \right) = 0.39 \text{ M}\Omega$$

$$R_3 = R_T \left(\frac{1}{V_{ovdis}} - \frac{1}{V_{chrDY}} \right) = 3.28 \text{ M}\Omega$$

$$R_4 = R_T \left(1 - \frac{1}{V_{ovdis}} \right) = 24 \text{ M}\Omega$$

Per far sì, che la tensione di uscita del LDO ad alta tensione, fornita al nodo sensore, sia quella da noi scelta:

$$R_V = R_5 + R_6 = 10 \text{ M}\Omega$$

$$R_5 = R_V \left(\frac{1}{V_{hv}} \right) = 4.7 \text{ M}\Omega$$

$$R_6 = R_V \left(1 - \frac{1}{V_{hv}} \right) = 6.8 \text{ M}\Omega$$

L'utilizzo di resistenze così elevate (richieste dal costruttore [9]) fa in modo che la potenza consumata su di esse sia trascurabile.

Affinché sia possibile lavorare correttamente in condizione di *Custom mode* sulla scheda da noi costruita, è necessario impostare i jumper come indicato in Tabella 4.

J1	CFG [0]	GND
J2	CFG [1]	GND
J3	CFG [2]	GND
J12	SET	BOOST
X3	HV_OUT	ON
X7	FB_HV	ON
J9	Vbatt_sel	GND
J8	Vboard	HVOUT

Tabella 4: Alimentazione del nodo sensore attraverso Custom mode

3.4 Alimentazione controllata da voltage monitor e switch

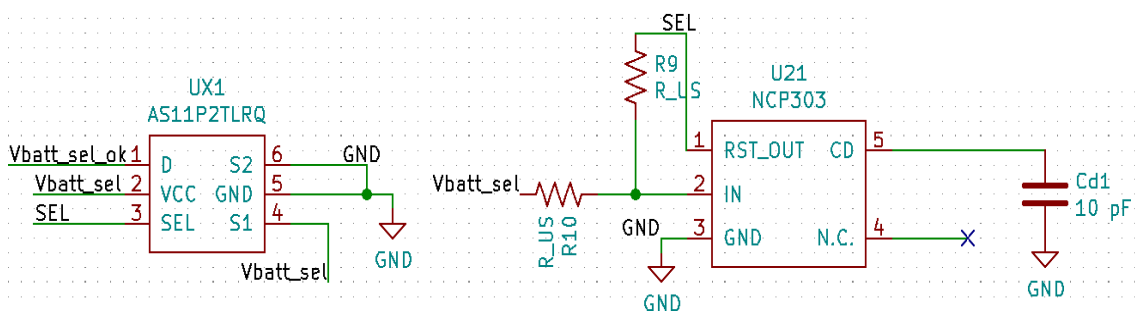


Figura 16: Configurazione di load gating tramite voltage monitor e switch

Come possibile alternativa all'LDO, si è pensato di implementare un secondo modo per generare la tensione d'alimentazione per il nodo sensore. In particolare, utilizzando un voltage monitor insieme a uno switch a bassissima

potenza è stato possibile gestire la tensione ai capi degli elementi di accumulo in maniera piuttosto efficiente, non dovendo usufruire della logica interna al AEM10941.

La tensione presente sui supercondensatori viene controllata dal voltage monitor NCP303LSN20T1[12], il quale presenta una soglia a $V_{DET-} = 2 \text{ V}$, con isteresi $V_{HYS} = 0.11 \text{ V}$ ($V_{DET+} = 2.11 \text{ V}$) che può essere incrementata mediante il partitore resistivo R9, R10 da noi dimensionato.

Questo dispositivo ha lo scopo di mantenere la sua uscita RST_OUT alta al valore della tensione di ingresso tramite pull-up finché la tensione in ingresso al suo pin IN, cioè V_{batt_sel} , non scenda al di sotto della soglia V_{min} . Quando il pin di ingresso supererà la soglia V_{MAX} , la resistenza di pull-up (R9) inizia a caricare il condensatore C_D ; non appena raggiunta la tensione $0.645 \cdot V_{IN}$ sul relativo pin a cui è connesso, il voltage monitor permetterà di alimentare nuovamente l'uscita RST_OUT. Inoltre, l'utente ha la possibilità di dimensionare un delay di attesa attraverso il dimensionamento del valore $T = R9 \cdot C_D$.

Per il corretto funzionamento del nodo sensore sono stati scelti i valori di resistenza $R9 = 1 \text{ M}\Omega$, $R10 = 3 \text{ M}\Omega$, in modo tale da incrementare il valore delle soglie a $V_{MAX} = 3 \text{ V}$, $V_{min} = 2.1 \text{ V}$ e quindi dell'isteresi $V_{HYSnew} = 0.9 \text{ V}$.

$$V_{min} = \left(\frac{R9}{Rin} + 1 \right) V_{DET-} = 2.1 \text{ V} \quad \text{con } Rin = 10 \text{ M}\Omega$$

$$V_{MAX} = \left(\frac{R10}{Rin || R9} + 1 \right) (V_{DET-} + V_{HYS}) = 3 \text{ V}$$

$$V_{HYSnew} = V_{MAX} - V_{min} = 0.9 \text{ V}$$

L'uscita del voltage monitor è collegata direttamente all'ingresso SEL dello switch ultra-low power AS11P2TLR [13], connesso direttamente al nodo sensore mediante il jumper J12.

Finché la tensione uscente dal nodo RST_OUT rimane alta, l'uscita dello switch $V_{batt_sel_ok}$ è collegato al pin S1 e quindi a V_{batt_sel} . Quando la tensione sul pin SEL cala al valore logico '0', poiché l'energia nei dispositivi di accumulo è troppo bassa, il nodo d'uscita verrà collegato a S2, cioè a GND, in modo tale da permettere ai supercondensatori di ricaricarsi.

Affinché sia possibile alimentare correttamente il dispositivo esterno, è necessario impostare i jumper sulla scheda come riportato in Tabella 5.

J1	CFG [0]	GND
J2	CFG [1]	GND
J3	CFG [2]	GND
J12	SET	GND
X3	HV_OUT	OFF
X7	FB_HV	OFF
J9	Vbatt_sel	BATT
J8	Vboard	Vbatt_sel_ok

Tabella 5: Configurazione jumper per alimentare board tramite voltage monitor e switch

3.5 Configurazione MPPT

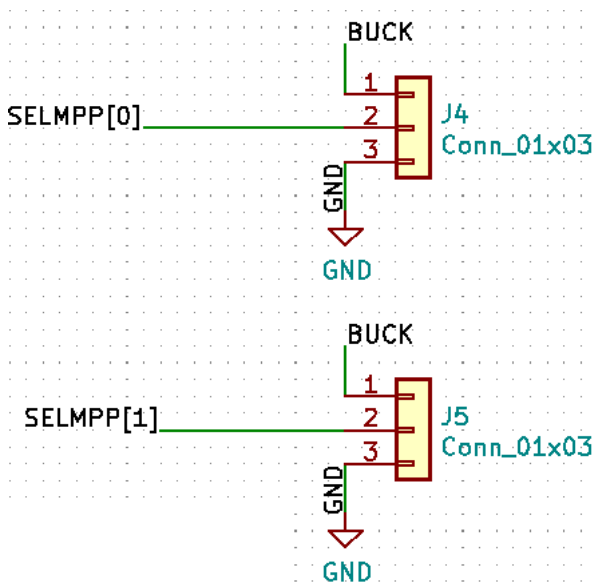


Figura 17: Jumper per definire l'MPPT

Per avere la migliore efficienza di conversione dalla cella fotovoltaica, il chip AEM10941 implementa, attraverso l'accensione e lo spegnimento di switch in

istanti di tempo periodici, un sistema che è in grado calcolare la tensione a vuoto della cella (V_{oc}) e comparare continuamente la tensione su SRC con la tensione di V_{MPP} , calcolata come frazione della V_{oc} .

Affinché l'utente possa scegliere il rapporto tra V_{MPP} e V_{oc} sono presenti i jumper J4 e J5, connessi ai pin SELMPP [0] e SELMPP [1], la cui configurazione è riportata in Tabella 6.

SELMPP [1]	SELMPP [0]	V_{MPP} / V_{oc}
0	0	70%
0	1	75%
1	0	85%
1	1	90%

Tabella 6: Configurazione del rapporto V_{MPP} / V_{oc}

3.6 Configurazione batteria esterna

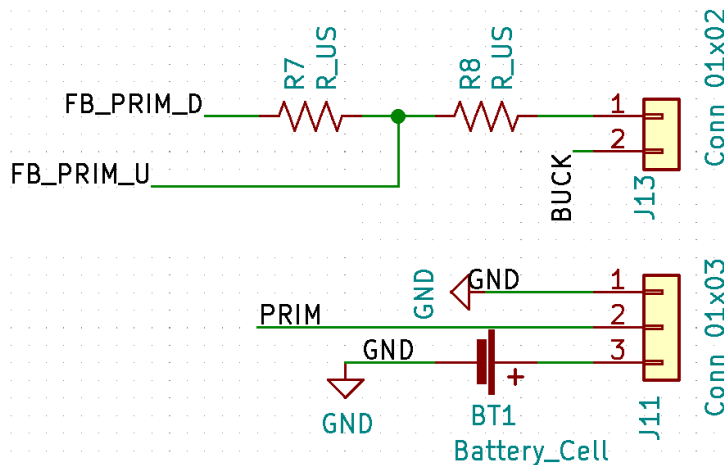


Figura 18: Batteria esterna e dispositivi per la sua configurazione

Quando una batteria esterna è connessa al chip, questo ne verifica la disponibilità mediante la logica interna, misurando la tensione a vuoto sul pin PRIM (V_{PRIM_MIN}) a cui è connessa e la compara con la tensione sul nodo resistivo FB_PRIM_U. Se $V_{PRIM_MIN} > (V_{FB_PRIM_U} / 4)$ la batteria è considerata carica e può essere utilizzata.

La batteria sarà utilizzata solamente nel caso in cui non sia disponibile sufficiente energia sul condensatore di accumulo.

Per scegliere la soglia minima di funzionamento dell'alimentazione esterna pari a $V_{PRIM_MIN} = 2.2$ V, è stato necessario dimensionare il partitore resistivo calcolando le resistenze R7 e R8 come segue:

$$R_P = R_7 + R_8 = 0,4 \text{ M}\Omega$$

$$R_7 = \frac{\left(\frac{V_{PRIM_MIN}}{4} * R_P\right)}{2.2} = 0,1 \text{ M}\Omega$$

$$R_8 = R_P - R_7 = 0,3 \text{ M}\Omega$$

Quando l'utente non utilizza la batteria esterna è necessario che i suoi nodi di configurazione e quello a cui è connessa siano portati a GND, per cui sono stati predisposti i jumper X4, X5 e J11.

Nel caso, invece, in cui la batteria sia collegata al nodo PRIM è necessario che l'utilizzatore imposti i jumper come indicato in Tabella 6.

J11	PRIM	BT1
J13	FB	ON
X4	FB_PRIM_U	OFF
X5	FB_PRIM_D	OFF

Tabella 7: Impostazione dei jumper in caso di utilizzo della batteria esterna

3.7 Abilitazione del regolatore LDO ad alta tensione

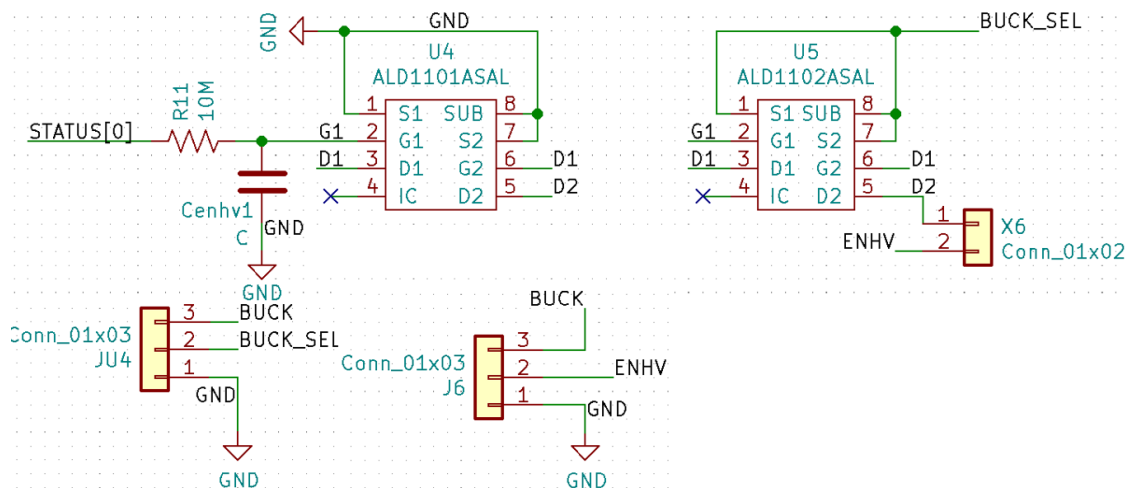


Figura 19: Buffer per l’abilitazione automatica del regolatore LDO

Come detto in precedenza, l’LDO ad alta tensione deve essere abilitato solo quando il sistema entra in modalità di *Normal mode* e quindi quando il flag STATUS [0] viene abilitato.

Per non riscontrare problemi, causati da una possibile accensione del LDO quando ancora il sistema è in *Wake up mode*, è stato predisposto un buffer, composto da due NOT logici in cascata, il quale è controllato direttamente da STATUS [0], in modo tale che il pin ENHV venga abilitato con tensione V_{BUCK} , anziché dall’utente mediante jumper J6, quando il flag sale al valore logico ‘1’.

Per la realizzazione del buffer sono stati utilizzati un ALD1101 [15], composto da due transistori MOS N-channel e un ALD1102 [16] composto da due transistor MOS P-channel.

La scelta di utilizzare questo tipo di dispositivi è fatta in modo tale che la potenza dissipata da questo “switch controllato”, sia il più possibile trascurabile, poiché come si può vedere nel loro datasheet in [15] [16] le correnti da loro assorbite sono dell’ordine dei μA .

Inoltre, per assicurare il funzionamento del sistema anche senza l’utilizzo delle logiche è stato predisposto il jumper J6, che permette di bypassare il buffer.

Affinché il sistema abiliti automaticamente l'LDO, è necessario che l'utente posizioni i jumper come indicato in Tabella 8.

X6	ENVH	ON
JU4	BUCK_SEL	BUCK
J6	ENVH	FLOATING

Tabella 8: Impostazione dei jumper per l'abilitazione automatica del LDO

3.8 Gestione dei segnali STATUS [1] e STATUS [2]

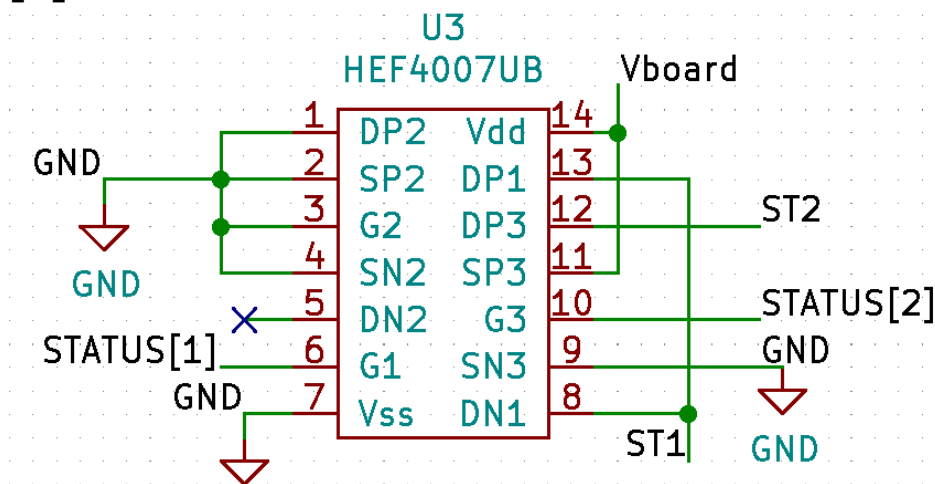


Figura 20: Dispositivo per la gestione dei flag 1 e 2

Affinché il nodo sensore LoRaWAN sia informato dello stato di funzionamento del sistema d'alimentazione, sono stati collegati gli STATUS [1:2] al connettore CN5 della board esterna, in particolare, ai pin PB4 e PB5.

Poiché non è possibile mettere in tensione i pin della scheda esterna, prima che questa venga alimentata, sono stati predisposti due invertitori, collegati ai due flag, che vengono alimentati dalla tensione V_{BOARD} , in modo tale che questi segnali siano visibili solo quando il nodo sensore è attivo. Inoltre, i segnali che il nodo sensore vedrà sui suoi pin saranno opposti a quelli generati dal modulo di alimentazione, a causa dei dispositivi utilizzati per interfacciarli con la scheda Discovery.

Il chip che contiene le porte logiche è un HEF4007UB [17], il quale è stato scelto per la sua importante caratteristica di avere consumi di potenza minimi.

3.9 Tabella componenti

Si riporta di seguito la *bill of materials* del progetto:

Componente	Valore	Cod. produttore
Csrc1	10 μ F	C1608X5R1A106M080AC
Cbuck1	10 μ F	C1608X5R1A106M080AC
Cboost1	22 μ F	GRM188R61A226ME15D
R3	3,48 M Ω	MC0063W060312M48
R2	0.39 M Ω	ERJ3GEYJ394V
R1	15 M Ω	RC0603JR-0715ML
R4	24 M Ω	HV732ATTD246J
Chv1	10 μ F	C1608X5R1A106M080AC
R6	5,23 M Ω	CRCW06035M23FKEA
Cbatt1	220mF	B0510-2R5224-R
PR5	Conn_01x02	\
Chv2	10 μ F	C1608X5R1A106M080AC
Lboost1	10 μ H	LPS4012-103MR
Lbuck1	10 μ H	MLZ1608M100WT
UX1	AS11P2TLRQ	AS11P2TLRQ
U21	NCP303	NCP303LSN24T1
Cd1	10 pF	Non utilizzata
R9	R_US	Non utilizzata
R10	R_US	
X3	Conn_01x02	\
J9	Conn_01x03	\
R8	R_US	Non utilizzata
R7	R_US	Non utilizzata
BT1	Battery_Cell	Non utilizzata
J11	Conn_01x03	\
J1	Conn_01x03	\
J2	Conn_01x03	\

J3	Conn_01x03	\
J4	Conn_01x03	\
J5	Conn_01x03	\
J8	Conn_01x03	\
J12	Conn_01x03	\
JCN5	Conn_01x08	\
J6	Conn_01x03	\
Xcell1	Conn_01x02	\
X5	Conn_01x02	\
J13	Conn_01x02	\
Je-peas1	AEM10941	AEM10941-QFN
JU4	Conn_01x03	\
R11	10 MΩ	ERJ-U03J106V
X6	Conn_01x02	\
X7	Conn_01x02	\
Cbatt2	220mF	B0510-2R5224-R
U3	HEF4007UB	HEF4007UB653
U4	ALD1101ASAL	ALD1101ASAL
U5	ALD1102ASAL	ALD1102ASAL
R5	4.7 MΩ	CRCW06034M70FKEA
Cenhv1	10 mF	C1608X5R1A106M080AC
JCN4	Conn_01x08	\
Scell1	Solar_cell	AM-1454CA
X4	Conn_01x02	\
PR3	Conn_01x02	\
PR1	Conn_01x03	\
PR4	Conn_01x02	\
PR2	Conn_01x03	\
Cbatt3	10uF	C1608X5R1A106M080AC

Figura 21: Tabella componenti

4. Collaudo

Dopo la fase di progettazione, il modulo di alimentazione è stato assemblato e collaudato.

Inizialmente è stata osservata la fase di caricamento del dispositivo di accumulo e quindi constatato il corretto funzionamento del convertitore *boost*, interno al PMIC. Successivamente è stato verificato che la scheda Discovery, alimentata con il modulo da noi progettato, fosse realmente in grado di effettuare una comunicazione, controllando attraverso l'oscilloscopio il comportamento della tensione ai capi dei supercapacitori e all'uscita del regolatore LDO.

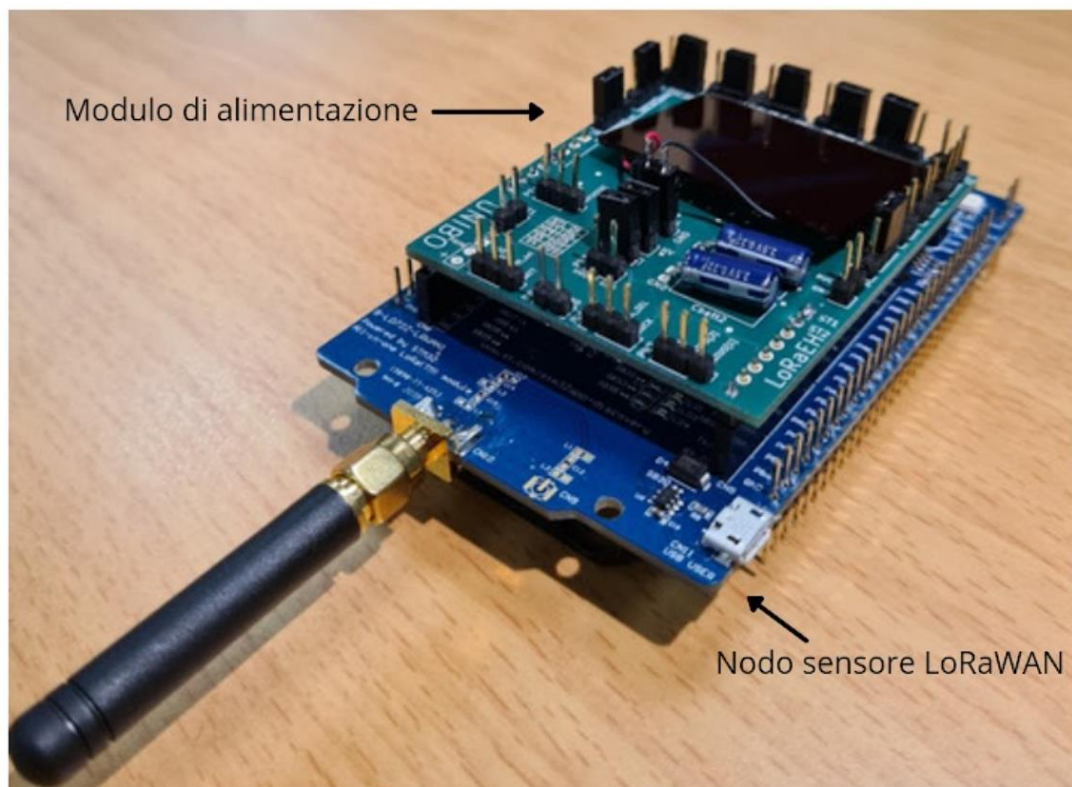


Figura 22: Modulo di alimentazione collegato alla Discovery board

4.1 Caricamento del dispositivo di accumulo

Prima di iniziare i test, per osservare il caricamento del dispositivo di accumulo, si è deciso: d'impostare i pin CFG [2:0], del PMIC, nella configurazione '001' (Figura 14) e di scegliere un valore di MPPT del 75%, solitamente utilizzato per questa tipologia di applicazioni. Dunque, se la cella lavorasse nella sua condizione tipica di lavoro di 200 lux, nella quale presenta una tensione a vuoto $V_{oc} = 2.4 \text{ V}$, questa avrà il punto di MPP al valore di tensione $V_{MPP} = 1.8 \text{ V}$.

Come si può vedere in Figura 23, subito dopo aver collegato la cella fotovoltaica, al modulo di alimentazione, la tensione ai capi dei supercondensatori, alimentati dal *boost converter*, inizia a crescere in maniera lineare per circa 42 minuti, per poi fermarsi e rimanere costante alla soglia di riferimento $V_{OVCH} = 3.6 \text{ V}$. Allo stesso modo anche l'energia al loro interno sale (Figura 24) ma in maniera quadratica, come si può dedurre dalla relazione che vi è con la tensione ai capi del condensatore.

$$E(t) = \frac{1}{2} CV(t)^2$$

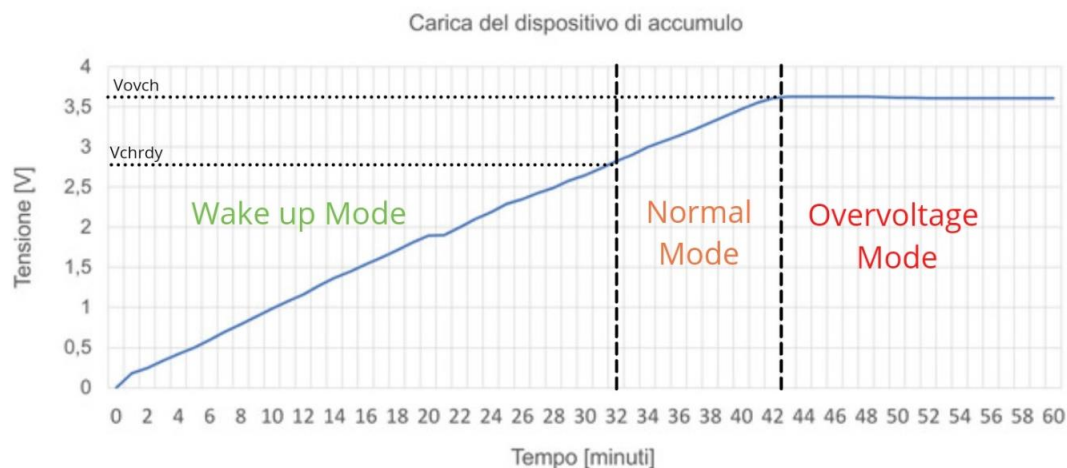


Figura 23: Carica del dispositivo di accumulo

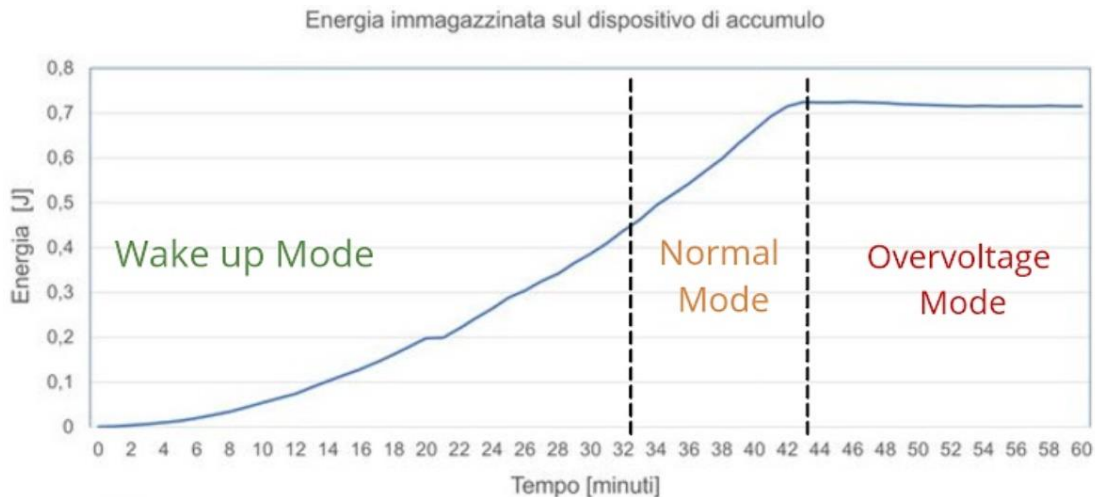


Figura 24: Energia immagazzinata nel dispositivo di accumulo durante la sua carica

Inoltre, prendendo in considerazione il caso in cui il nodo sensore sia alimentato con tensione 3.3 V (caso peggiore dal punto di vista dei consumi energetici) è possibile constatare dalla Figura 24, come l'energia disponibile quando si è in condizione di *Normal Mode* sia molto superiore ai 27.76 mJ richiesti per effettuare una comunicazione.

Per conoscere la potenza che il PMIC fornisce al dispositivo di accumulo per caricarlo, abbiamo sfruttato la relazione che questa ha con l'energia.

$$P(t) = \frac{dE(t)}{dt}$$

Osservando, quindi, la Figura 25 deduciamo che la potenza trasferita non è costante come potevamo pensare, ma segue in maniera quasi lineare la crescita della tensione ai capi dei supercondensatori, con un picco massimo di 0.52 mW. Per confermare la correttezza della valutazione è possibile osservare, infatti, come la potenza sia nulla quando il dispositivo entra nello stato di funzionamento '*Overvoltage Mode*', in cui viene imposto dal PMIC di scollegare la sorgente d'alimentazione, in modo tale da fermare la carica.

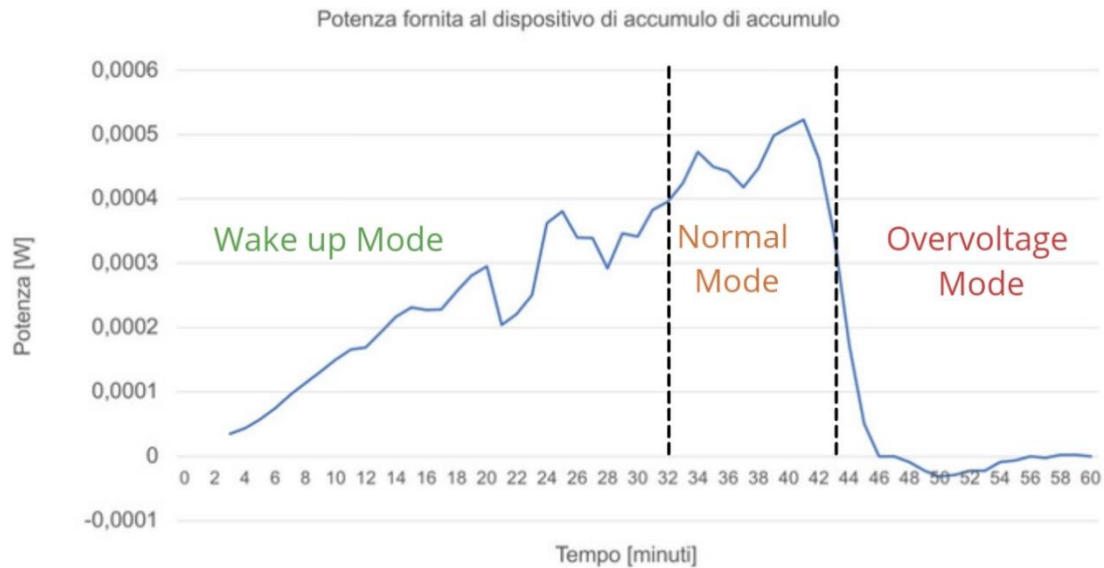


Figura 25: Potenza fornita al dispositivo di accumulo durante la sua carica

4.2 Alimentazione del nodo sensore con LDO

Per testare il funzionamento della scheda LoRaWAN alimentata dal modulo progettato, è stato scelto di impostare i pin CFG [2:0] in modo tale che l'AEM10941 sia in modalità di *Custom Mode* (Paragrafo 3.3.1). e quindi che la tensione in uscita al LDO sia il più piccola possibile, per limitare l'energia consumata durante la trasmissione dei dati

Come si vede in Figura 26, quando viene raggiunta la tensione V_{CHRDY} ai capi dei supercondensatori il PMIC abilita l'uscita del LDO, in modo da permettere alla scheda di accendersi, la quale inizia a tramettere immediatamente; infatti, sono visibili le 3 finestre di comunicazione del protocollo LoRa (TX, RX1 e RX2).

Per cui è possibile constatare il corretto funzionamento del sistema d'alimentazione, infatti, quando la comunicazione ha inizio la tensione di alimentazione non varia e permette, oltre che a completare il primo trasferimento dati, di effettuarne altri.

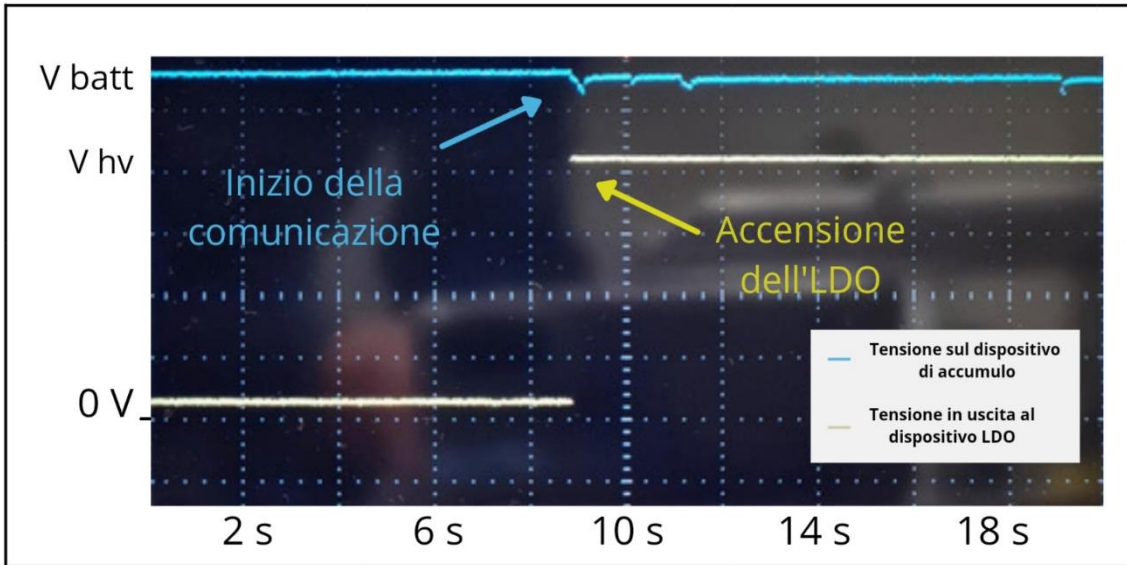


Figura 26: Accensione del LDO e inizio della comunicazione

Osservando più attentamente la Figura 27, in cui viene mostrata la tensione ai capi della batteria durante una comunicazione, è possibile vedere come la scarica del dispositivo di accumulo si comporti esattamente come quella di un circuito RC, la cui capacità è quella relativa ai supercapacitori e la resistenza è rappresentata dalla loro ESR (Equivalent Series Resistance). Sono visibili sia le cadute sulle ESR che la scarica parziale del supercondensatore in seguito al consumo del nodo sensore

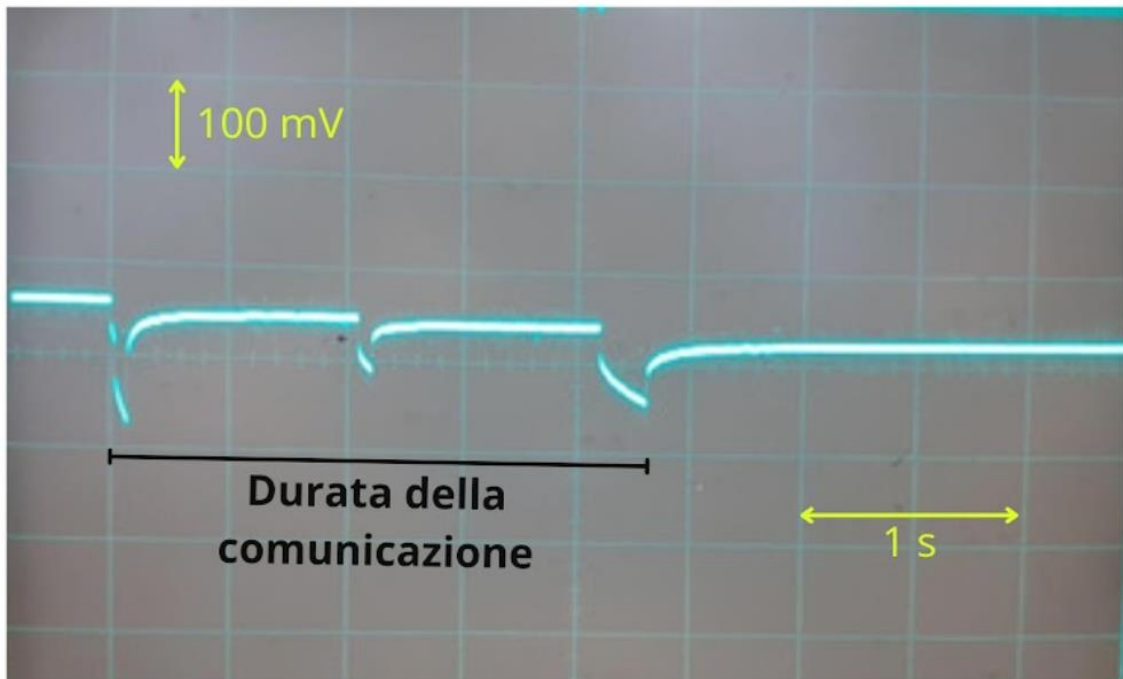


Figura 27: Comportamento della tensione ai capi del dispositivo di accumulo durante una comunicazione. Sono visibili le 3 finestre di comunicazione del protocollo LoRa.

Inoltre, sempre in Figura 27 è possibile vedere come per effettuare una costante comunicazione siano necessari complessivamente 30 mV. Per cui, considerando che la tensione disponibile calcolata come differenza tra le soglie di funzionamento V_{CHRDY} e V_{OVDIS} sia di 0.52 V, nella condizione *Custom Mode* da noi utilizzata, teoricamente sarebbe possibile effettuare un numero più elevato di comunicazioni prima che il PMIC spenga LDO.

In realtà, il numero di comunicazioni sarà sicuramente superiore considerando che la cella fotovoltaica continua a caricare il dispositivo di accumulo anche quando è in atto il trasferimento dei dati e che vi è una certa tolleranza sulle resistenze con le quali si sono dimensionate le soglie V_{CHRDY} , V_{OVDIS} e V_{OVCH} della condizione di funzionamento scelta per il sistema d'alimentazione.

Infatti, durante la sperimentazione si è notato come il nodo sensore riesca ad effettuare circa quaranta comunicazioni prima che LDO venga disabilitato, le quali sono effettuate ogni 10 secondi come è possibile vedere in Figura 26 e facendo lavorare, quindi, il sistema in un caso estremo di funzionamento.

Inoltre, è possibile vedere in Figura 28 come ,147 dati inviati, il giorno dei test (11 novembre 2021), dal nodo sensore siano stati correttamente ricevuti dal gateway LoRa Dragino LPS8 collocato in laboratorio, il quale li inoltra a un server ChirpStack presente all'interno del Centro di Ricerca ARCES dell'Università di Bologna.

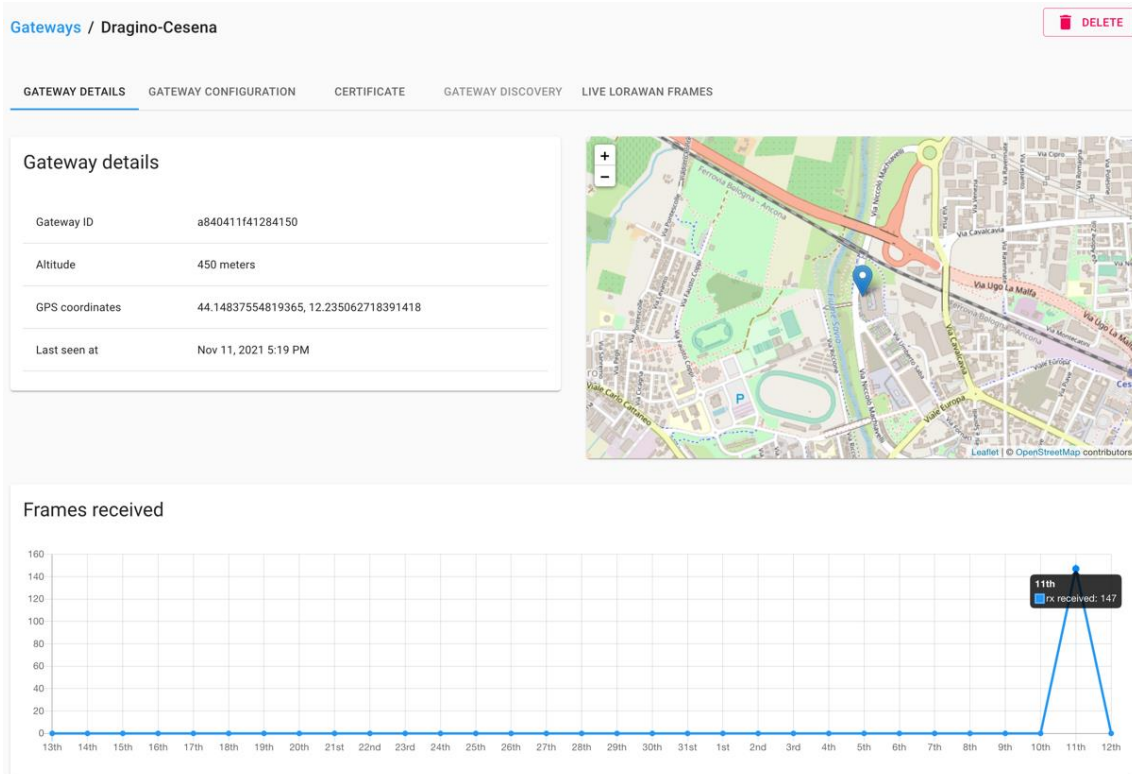


Figura 28: Dati ricevuti dal gateway LoRa Dragino LPS8

Conclusione

In conclusione, l'obiettivo che questo elaborato si era prefissato, cioè quello di rendere completamente indipendente la vita del nodo sensore LoRaWAN dalle fonti di energia non rinnovabili, mediante il processo di energy harvesting, è stato raggiunto.

Infatti, la scheda Discovery alimentata solamente dal modulo d'alimentazione progettato, è in grado di effettuare correttamente numerose trasmissioni di dati, senza l'utilizzo di dispositivi esterni. Per cui, non essendoci la necessità di usufruire di una batteria esterna, questa non è mai stata collegata e perciò non è mai stato sfruttato il possibile funzionamento in regione di *Primary Mode* di cui il PMIC poteva usufruire, dimostrando così la nostra tesi.

Purtroppo, la soluzione con voltage monitor e switch non è stata implementata, poiché nel tempo allocato per la sperimentazione, si è scelto di utilizzare il sistema di alimentazione, teoricamente, più efficiente dal punto di vista dei consumi energetici e in grado di assicurare tensione di alimentazione costante al nodo.

Infine, è possibile dire che con l'impiego di questo tipo d'implementazione in uno scenario scientifico e industriale, riguardante il monitoraggio ambientale in zone in cui la vita dei nodi sensore deve avere una lunga autonomia, risparmierebbe l'utilizzo di milioni di batterie, che dopo qualche anno sarebbero da smaltire.

Indice delle figure

Figura 1: Range di potenze tipiche in applicazioni di energy harvesting[1]	3
Figura 2: Gli ambiti applicativi del progetto H2020 ENABLES [1].....	5
Figura 3: Schema semplificato del funzionamento del circuito integrato AEM10941.....	9
Figura 4: Schema semplificato della struttura interna del circuito, come riportato in [9]	9
Figura 5: Algoritmo di funzionamento del circuito integrato AEM10941	11
Figura 6: Andamento tensione-corrente ai capi della cella fotovoltaica [10].....	14
Figura 7: Discovery board B-L072Z-LRWAN1 di STMicroelectronics [8]	16
Figura 8: Schematico del modulo realizzato con il software Kicad	17
Figura 9: Consumi di corrente e tensione del nodo sensore, come riportati in [8]	21
Figura 10: Consumi di energia del nodo sensore, come riportati in [8].....	22
Figura 11: Simulazione della tensione sul supercapacitore alle richieste di corrente da parte del carico ($C_{BATT} = 110 \text{ mF}$, $I = 80 \text{ mA}$ per $t = 0.1 \text{ s}$, $V_{MAX} = 2.8 \text{ V}$).....	23
Figura 12: Ingresso cella fotovoltaica	23
Figura 13: Componenti per la gestione del LDO ad alta tensione	24
Figura 14: Valori delle soglie di tensione per il funzionamento nelle configurazioni predefinite [9].....	24
Figura 15: Partitore resistivo per selezionare le soglie nella modalità custom mode	25
Figura 16: Configurazione di load gating tramite voltage monitor e switch.....	27
Figura 17: Jumper per definire l'MPPT	29
Figura 18: Batteria esterna e dispositivi per la sua configurazione.....	30

Figura 19: Buffer per l'abilitazione automatica del regolatore LDO	32
Figura 20: Dispositivo per la gestione dei flag 1 e 2	33
Figura 21: Tabella componenti	35
Figura 22: Modulo di alimentazione collegato alla Discovery board	36
Figura 23: Carica del dispositivo di accumulo	37
Figura 24: Energia immagazzinata nel dispositivo di accumulo durante la sua carica.....	38
Figura 25: Potenza fornita al dispositivo di accumulo durante la sua carica	39
Figura 26: Accensione del LDO e inizio della comunicazione	40
Figura 27: Comportamento della tensione ai capi del dispositivo di accumulo durante una comunicazione. Sono visibili le 3 finestre di comunicazione del protocollo LoRa	41
Figura 28: Dati ricevuti dal gateway LoRa Dragino LPS8.....	42

Indice delle tabelle

Tabella 1: abilitazione e disabilitazione dei LDO mediante pin ENLV e ENHV	12
Tabella 2: Alimentazione del nodo sensore con soglie di tensione predefinite.	25
Tabella 3: soglie di lavoro in Custom mode.....	26
Tabella 4: Alimentazione del nodo sensore attraverso Custom mode.....	27
Tabella 5: Configurazione jumper per alimentare board tramite voltage monitor e switch	29
Tabella 6: Configurazione del rapporto VMPP / VOC.....	30
Tabella 7: Impostazione dei jumper in caso di utilizzo della batteria esterna ...	31
Tabella 8: Impostazione dei jumper per l'abilitazione automatica del LDO	33

Bibliografia

- [1] M. Hayes, G. Fagas, J. Donnelly, R. Salot, G. Savelli, P. Spies, G. Boegel, M. Konijnenburg, D. Stenzel, A. Romani, C. Gerbaldi, F. Cottone, A. Weddwell, “Reserch Infrastructure Position Paper”, H2020 ENABLES “European Infrastructure Powering the Internet of Things”, https://www.enables-project.eu/wp-content/uploads/2021/02/EnABLES_ResearchInfrastructure_PositionPaper.pdf
- [2] Green Deal europeo, Wikipedia: https://it.wikipedia.org/wiki/Green_Deal_europeo
- [3] Mario Malcangi, “recuperare l’energia dall’ambiente con l’energy harvesting”, ElettronicaNews, Power Electronics, 22 Gennaio 2018: <https://www.elettronicanews.it/recuperare-lenergia-dallambiente/>
- [4] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia-Segui, T. Watteyne, “Understanding the Limits of the LoRaWAN”, in IEEE Communications Magazine, vol.55, no. 9, pp. 34-40, Sept. 2017, doi : 10.1109/MCOM.2017.1600613
- [5] Lora, Wikipedia: <https://it.wikipedia.org/wiki/LoRa>
- [6] Low-power wide-area network, Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Low-power_wide-area_network

- [7] Mattia Pagliarani, “Progetto di un nodo sensore LoRaWAN su piattaforma STM32”, Tesi di laurea in Ingegneria elettronica per l’energia e l’informazione, Università di Bologna, Sessione ||, A.A 2020/2021
- [8] E-peas, Datasheet: AEM10941 <https://e-peas.com/wp-content/uploads/2021/03/e-peas-AEM10941-datasheet-energy-harvesting.pdf>
- [9] Panasonic, Datasheet: AM-1454, <https://industry.panasonic.eu/products/energy-building/amorphous-solar-cells/amorton-indoor-environment>
- [10] STMicroelectronics; STM32L0 Discovery kit LoRa, Sigfox, low-power wireless, B-L072Z- LRWAN1: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/b-l072z-lrwan1.html>
- [11] Kicad; <https://www.kicad.org/>
- [12] ONSEMI, Datasheet: NCP302/3 <https://www.onsemi.com/products/power-management/voltage-references-supervisors/voltage-supervisors/ncp303>
- [13] STMicroelectronics, Datasheet: AS11P2TLR
- [14] EATON, Datasheet: Supercapacitor cell B0510-2R5224-R
- [15] Advanced Linear Devices, Datasheet: ALD1101, <https://www.aldinc.com/pdf/ALD1101.pdf>
- [16] Advanced Linear Devices, Datasheet: ALD1102, <https://www.aldinc.com/pdf/ALD1102.pdf>
- [17] Nexperia, Datasheet: HEF4007UB <https://www.nexperia.com/products/analog-logic-ics/control-logic/gates/combination-gates/HEF4007UBT.html>

