



## Ricerca di Sistema elettrico

Studio, progettazione e sviluppo di  
prototipi/dimostratori da laboratorio di  
sensori per il monitoraggio dei parametri  
ambientali CO<sub>2</sub>/VOC e delle presenze  
(GridEye)

G. Gatto, A. Kumar, M. Losito, A. Vincis



STUDIO, PROGETTAZIONE E SVILUPPO DI PROTOTIPI/DIMOSTRATORI DA LABORATORIO DI SENSORI PER IL MONITORAGGIO DEI PARAMETRI AMBIENTALI CO<sub>2</sub>/VOC E DELLE PRESENZE (GRIDEYE)

G. Gatto, A. Kumar, M. Losito, A. Vincis (Università degli Studi di Cagliari - Dipartimento di Ingegneria Elettrica ed Elettronica)

Aprile 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico (oggi Ministero della Transizione Ecologica) - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Obiettivo: *N. 1 - Tecnologie*

Progetto: *1.5 - Tecnologie, tecniche e materiali per l'efficienza energetica ed il risparmio di energia negli usi finali elettrici degli edifici nuovi ed esistenti*

Work package: *1 - Edifici ad alta efficienza energetica*

Linea di attività: *LA1.36 - Sviluppo di una rete mesh di sensori innovativi per edifici adibiti ad uso pubblico e residenziale: il caso studio di Carbonia*

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work package: Domenico Iatauro, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *"Sviluppo di sensoristica con sistemi di energy harvesting e loro applicazione per la progettazione integrata"*

Responsabile scientifico ENEA: Giovanni Puglisi

Responsabile scientifico UNICA - DIEE: Gianluca Gatto

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	6
2.1 SENSORI.....	6
2.1.1 <i>Sensori per la misurazione della temperatura e dell'umidità</i> .....	7
2.1.2 <i>Sensori per la misurazione della qualità dell'aria</i> .....	8
2.1.3 <i>Misurazione dei parametri elettrici</i> .....	8
2.1.4 <i>Controllo presenze negli edifici</i> .....	8
2.2 ENERGY HARVESTING.....	9
2.2.1 <i>Onde radio</i> .....	10
2.2.2 <i>Energia cinetica</i> .....	11
2.2.3 <i>Luce ambientale</i> .....	12
2.2.4 <i>Termica</i> .....	13
2.3 WIRELESS SENSOR NETWORKS.....	14
2.3.1 <i>Il protocollo Z-Wave</i> .....	14
2.3.2 <i>La rete Z-Wave</i> .....	14
2.3.3 <i>Configurazione della rete Z-Wave</i> .....	15
2.3.4 <i>Topologia e instradamento</i> .....	15
2.3.5 <i>Associazioni di nodi Z-Wave</i> .....	16
2.4 IL PROGETTO.....	16
2.4.1 <i>La rete Z-Wave</i> .....	16
2.4.2 <i>Aspetti tecnici della progettazione</i> .....	17
2.4.3 <i>Scheda Z-Wave – Controller</i> .....	18
2.4.4 <i>Schede Z-Wave – Zuno Board</i> .....	19
2.4.5 <i>Scheda Z-Wave – GridEye</i> .....	19
2.4.6 <i>Scheda Z-Wave – CO2 e VOC</i> .....	20
2.4.7 <i>Scheda Z-Wave – Temperatura e umidità</i> .....	20
2.4.8 <i>Scheda Z-Wave – Misuratore di parametri elettrici</i> .....	20
3 CONCLUSIONI.....	21
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	22
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	24
APPENDICE.....	25

## Sommario

L'obiettivo dell'attività di ricerca relativa alla LA 1.36 che il Dipartimento di Ingegneria Elettrica ed Elettronica (DIEE) dell'Università degli Studi di Cagliari sta portando avanti in collaborazione con ENEA è stato quello di studiare, progettare e sviluppare dei dispositivi elettronici da laboratorio atti al monitoraggio dei parametri ambientali CO<sub>2</sub>, VOC e delle presenze all'interno degli ambienti costituenti gli edifici. Tali dispositivi costituiranno gli elementi di una rete wireless totalmente interconnessa (rete mesh) che verrà gestita da specifici dispositivi elettronici (controller) e sarà basata sul protocollo Z-Wave. L'aspetto innovativo della ricerca riguarda l'applicazione di tecniche di Energy Harvesting ai dispositivi elettronici, al fine di ottenere il prolungamento della durata di funzionamento della batteria che alimenta tali dispositivi.

Nella prima fase dell'attività di ricerca, è stato realizzato un approfondito studio dello stato dell'arte mediante analisi bibliografica e un'indagine sulle relative tecnologie disponibili sul mercato nell'ambito della sensoristica per il monitoraggio ambientale.

Successivamente sono state definite le caratteristiche tecniche dei sensori e delle tecnologie più idonee alla realizzazione della rete mesh.

Inoltre, sono state condotte le analisi delle diverse tipologie di sistemi di Energy Harvesting, scegliendo la tecnologia più appropriata allo scopo.

L'acquisizione delle conoscenze derivanti dalle analisi sopra descritte ha consentito di progettare e sviluppare un prototipo di dispositivo elettronico sul quale sono presenti i sensori per il monitoraggio ambientale, i microchip per la gestione dei segnali digitali, per la comunicazione Z-Wave e per l'implementazione delle funzioni di Energy Harvesting da fonte luminosa.

La realizzazione del prototipo ha consentito di verificare la possibilità di monitorare i parametri ambientali utilizzando le tecnologie individuate e di poter procedere ad una prima ingegnerizzazione del sistema al fine di testarne l'affidabilità *in situ*.

## 1 Introduzione

L'Accordo di Collaborazione tra ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Elettrica ed Elettronica (DIEE) dell'Università degli Studi di Cagliari ha ad oggetto lo svolgimento di un'attività di ricerca dal titolo "Sviluppo di sensoristica con sistemi di Energy Harvesting e loro applicazione per la progettazione integrata", inserita nell'ambito del Progetto: 1.5 "Tecnologie, tecniche e materiali per l'efficienza energetica ed il risparmio di energia negli usi finali elettrici degli edifici nuovi ed esistenti", parte del Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021.

L'attività di ricerca è volta a consentire il monitoraggio di parametri ambientali, nel caso specifico CO<sub>2</sub> e VOC, nonché il controllo delle presenze in diversi ambienti da individuare in un edificio pubblico nella città di Carbonia (CI). Ciò rientra all'interno di una più ampia attività di ricerca nell'ambito del progetto AUREE, avente come finalità la rilevazione e la classificazione del patrimonio edilizio di Carbonia, realizzata in collaborazione con i Dipartimenti DIMCM (Ingegneria Meccanica, Chimica e dei Materiali) e DICAAR (Ingegneria Civile, Ambientale e Architettura) dell'Università degli Studi di Cagliari e con il Centro di Ricerca Sotacarbo.

Il contesto nel quale si inserisce l'attività di ricerca del DIEE è quello dell'innovazione tecnologica legata all'introduzione negli edifici dei BEMS (Building Energy Management System) e dei BACS (Building Automation and Control System). Tale innovazione sta fortemente contribuendo a realizzare una migliore gestione degli edifici, impattando con decisione sulla riduzione dei consumi energetici. I sistemi BEMS e BACS sono inoltre in grado di rendere disponibile una notevole quantità di dati in termini di consumi, condizioni ambientali interne ed esterne e profili di utilizzo che costituiscono oramai un elemento di importanza strategica nella pianificazione di interventi strutturali (sia sull'involucro che sugli impianti) di riqualificazione energetica.

I BEMS e i BACS oggi costituiscono un valido supporto per la fase conoscitiva preliminare agli interventi di riqualificazione, comunemente definita "diagnosi energetica" o "audit energetico". Le metodologie di audit più complesse richiedono il ricorso ad approfondite indagini strumentali sull'edificio, che possono produrre una mole di dati importante; tra questi dati vi rientrano senza dubbio quelli che vengono acquisiti in modalità continua da sistemi come i BEMS e i BACS che, avendo il compito di controllare e automatizzare l'edificio, misurano continuamente grandezze di varia natura (per il tramite di sensori).

La rilevazione dei dati tramite sensori, o più precisamente reti di sensori, consente non solo un'agevole acquisizione ma anche una più efficace gestione del loro trasferimento per il successivo impiego per la progettazione di interventi di riqualificazione. La digitalizzazione delle informazioni del processo edilizio sta alimentando la diffusione di metodologie e strumenti di Building Information Management (BIM) che costituiscono un promettente ambiente di immagazzinamento, elaborazione e rappresentazione dei dati [1,2].

Al contempo, si assiste ad un incessante sviluppo delle reti di sensori necessarie per il monitoraggio dei parametri ambientali e per la corretta trasmissione dei dati acquisiti verso i sistemi di raccolta dati, utili per successive elaborazioni. I sistemi di comunicazione si sono quindi spostati sempre più verso soluzioni senza fili, realizzando così le architetture di rete di sensori wireless: le cosiddette Wireless Sensor Networks (WSN). Le WSN consentono la realizzazione di reti di sensori distribuiti nell'ambiente edilizio da controllare, permettendo di evitare cablaggi che spesso risultano essere invasivi, costosi o incompatibili con gli impianti elettrici preesistenti.

La realizzazione di WSN e la possibilità di alimentare i sensori con fonti di energia rinnovabile, ha spinto verso due direzioni ben distinte: da un lato la realizzazione di sistemi di raccolta di energia da fonti

rinnovabili, dall'altro la gestione dei consumi di energia elettrica da parte dei sensori stessi e dei sistemi di comunicazione dei dati da essi generati. Questa considerazione ha reso necessario, in sede di svolgimento delle attività della LA 1.36, effettuare preliminarmente delle ricerche bibliografiche necessarie ad acquisire delle conoscenze sulle caratteristiche dei sensori per il monitoraggio di parametri ambientali e sulle tecniche e sui sensori utilizzati per il monitoraggio delle presenze.

Elemento caratterizzante lo studio portato avanti dal DIEE è senza dubbio quello relativo alla "cattura" di una parte o della totalità dell'energia necessaria per il funzionamento dei sensori; ciò ha richiesto l'analisi di diverse tecniche di Energy Harvesting. L'utilizzo di tali tecniche consente di prolungare l'autonomia dei dispositivi a batteria e/o di alimentare, in alcuni casi, direttamente i sensori sfruttando l'energia disponibile in ambiente sotto forma di luce, calore, vibrazioni e onde elettromagnetiche.

L'obiettivo della LA 1.36 è quello di studiare, progettare e successivamente sviluppare dei prototipi/dimostratori da laboratorio di sensori per il monitoraggio dei parametri ambientali CO<sub>2</sub>, VOC e delle presenze (GridEye) che consentano di acquisire le conoscenze necessarie per realizzare, nella LA 1.37 di progetto, i dispositivi da installare *in situ* utili per l'acquisizione e il trasferimento dei dati.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 Sensori

Dall'analisi dello stato dell'arte è emerso che attualmente sono disponibili sul mercato diverse soluzioni tecnologiche per la misurazione delle grandezze fisiche mediante l'utilizzo di sensori a basso costo e basso consumo di energia [3,4], mentre sono in fase di sviluppo nuove tipologie di sensori (sul mercato si trovano attualmente diverse soluzioni non ancora tecnologicamente mature) che sfruttano le tecniche di Energy Harvesting per la loro alimentazione [5].

Storicamente, l'incremento delle funzionalità nei sistemi elettronici di questo tipo è stato realizzato a fronte di un maggior consumo di energia che ha condotto ad una minore durata del sistema di alimentazione (batteria) [6]. L'avvento delle tecniche di energy harvesting può consentire oggi non solo di invertire questa tendenza ma anche di implementare funzionalità aggiuntive.

L'approccio ai sistemi cosiddetti "low power", mediante l'utilizzo delle nuove tecnologie dei sensori con sistemi microelettromeccanici (MEMS) [7] e l'utilizzo di microcontrollori (MCU) [8] unitamente alla gestione energetica, consente di realizzare un incremento di funzionalità senza sacrificare la durata della batteria.

Un primo approccio al design a basso consumo energetico ha come elemento centrale la scelta del sensore, che può presentare uno o più stati di alimentazione a basso livello, come ad esempio una modalità di spegnimento e una modalità di funzionamento a potenza estremamente bassa. In molti casi, questo tipo di funzionamento del sensore è direttamente stabilito e controllato dal progettista del complessivo sistema, in ambito di applicazione finale. Ciò offre molti vantaggi in termini di consumi energetici ma ha come principale svantaggio il rallentamento della risposta dinamica del sensore stesso [4].

Un secondo approccio, utilizzato per garantire bassi consumi energetici, si basa sulla cosiddetta "logica digitale", considerata fin dalla fase di progettazione di un sensore. Chiamata frequentemente "smart sensing" [9], la capacità digitale aggiuntiva può essere utilizzata per consentire al sensore di eseguire autonomamente la propria gestione energetica; in tal modo, ad esempio, i dati possono essere campionati secondo le diverse necessità che di volta in volta si presentano. Un'applicazione tipica di tale logica è quella negli accelerometri con funzione "smart sensing", la quale oltre a consentire il semplice scuotimento del dispositivo per realizzarne l'accensione o lo spegnimento, può rilevare attività più complesse come i

cosiddetti “doppi picchi” oppure un movimento rotatorio, con la direzione di rotazione che può attivare un comando piuttosto che un altro e può consentire al sensore di avviare una serie di funzioni utili. In questo caso, il sensore attinge alla potenza in funzione delle necessità di funzionamento. La logica, incorporata nel sensore, rileva gli eventi e ne esegue la notifica ad una MPU (Micro Processor Unit) esterna su linee di interrupt utilizzando un’interfaccia su BUS I2C [10]. A differenza del primo approccio a bassa potenza, che non presenta alcun consumo energetico al suo livello più basso, questo tipo di approccio presenta un consumo energetico di pochi  $\mu\text{A}$  e consente di operare secondo una logica di attivazione e disattivazione del sensore stesso.

In un terzo approccio di progettazione per il rilevamento a bassa potenza, il sensore utilizza la capacità di calcolo locale di un MCU (Micro Controller Unit) [8]. Questa funzionalità può essere ottenuta prendendo in considerazione le operazioni a livello di sistema. Definita "capacità di calcolo locale", questa metodologia consente di alleggerire il carico computazionale del processore dell'applicazione di sistema, spostando tale onere su una MCU interna al sensore stesso [11]. Ad esempio, per un sistema primario che utilizza da 100 a 1.000 volte più potenza, un MCU locale, in grado di eseguire i calcoli necessari e consentire all'altro processore di passare a una modalità di minor consumo, offre un notevole risparmio energetico a livello di sistema, tale da giustificare l'aggiunta di una MCU più piccola. A differenza del secondo approccio, il quale fornisce funzionalità di interrupt per funzioni di base (ad esempio una transizione da una funzionalità a un'altra), in quest'ultimo caso tutti i calcoli possono essere eseguiti internamente, fornendo la piena capacità di un hub di sensori [12].

### 2.1.1 Sensori per la misurazione della temperatura e dell'umidità

Durante lo svolgimento dell'attività di ricerca, sono stati analizzati i dispositivi in commercio, rilevando numerose tipologie di sensori per la misurazione della temperatura e dell'umidità, molti dei quali miniaturizzati, a bassissimo consumo energetico e con funzionalità di comunicazione digitale mediante MCU interna e registri che contengono i dati. Il mercato di questi sensori offre un'accuratezza della misura di temperatura dell'ordine del decimo di grado centigrado, risoluzione digitale della temperatura rilevata a 16 bit, un range di temperature operative compreso tra i  $-55$  e i  $125$  °C, tensione di lavoro tra 1.9-5.5 Vdc e corrente assorbita tra i 3-10  $\mu\text{A}$ . Sono inoltre disponibili funzionalità di natura digitale rese disponibili dai produttori dei sensori mediante l'integrazione delle MCU che consentono di realizzare canali di comunicazione su BUS (I2C, SMBus, 2-wire, UART etc.).

Inoltre, diversi produttori di sensori offrono funzionalità di risparmio energetico che consentono di portare il dispositivo in uno stato di consumo ridotto con assorbimenti di corrente nell'ordine dei 200 nA.

Le caratteristiche che si possono tipicamente osservare in tali sensori sono le seguenti:

- Accuratezza umidità relativa:  $\pm 2$  % RH
- Range operativo umidità relativa: 0-100% RH
- Accuratezza temperatura:  $\pm 0.2$  °C
- Range operativo temperatura:  $-40$ - $125$  °C
- Tensione operativa: 1.6-5.5 Vdc
- Corrente media assorbita: 0.55  $\mu\text{A}$  @1 sample/sec
- Interfaccia di comunicazione: I2C

Tali dispositivi si prestano particolarmente bene per l'implementazione a livello di sistema con i dispositivi elettronici in grado di gestire la comunicazione senza fili all'interno di una rete di sensori distribuita.

### 2.1.2 Sensori per la misurazione della qualità dell'aria

Sono stati analizzati i sensori che consentono la rilevazione di composti che sono presenti nelle emissioni o nell'aria ambiente, ovvero la concentrazione equivalente di diossido di carbonio (CO<sub>2</sub>) e dei composti organici volatili (VOC) nonché la successiva gestione digitale dei dati raccolti, avendo al proprio interno una MCU che ne gestisce localmente la funzionalità. L'acquisizione di tali valori consente di monitorare le variazioni di CO<sub>2</sub> equivalenti in spazi confinati, ad esempio nelle sale riunioni o nelle cabine dei veicoli. Tipicamente, tali sensori dispongono di un'uscita a doppio segnale che può essere utilizzata per controllare la ventilazione su richiesta, consentendo il risparmio di energia. Alcune specifiche tipologie di sensori di questo tipo consentono anche la gestione energetica del dispositivo elettronico, permettendo di entrare in modalità di consumo energetico ridotto o in "sleep mode".

Le principali caratteristiche sono:

- Range di uscita CO<sub>2</sub>: 400 ppm – 29206 ppm
- Range di uscita equivalent Total Volatile Organic Compound (eTVOC): 0 ppb – 32768 ppb.
- Range operativo temperatura: -40-85 °C
- Tensione operativa: 1.8-3.3 Vdc
- Corrente assorbita: 19 uA (sleep mode), 26 mA (misurazione)
- Interfaccia di comunicazione: I2C

### 2.1.3 Misurazione dei parametri elettrici

Al fine di eseguire il monitoraggio dei consumi elettrici all'interno degli edifici, è stata eseguita un'analisi di dispositivi per la misurazione dei parametri elettrici, quali corrente, tensione, potenza, frequenza ed energia elettrica (oltre a numerosi altri parametri) consumati dal carico ad essi collegato.

I dispositivi analizzati consentono di attivare la modalità di risparmio energetico del sensore stesso e rendono disponibile un sistema di comunicazione digitale mediante l'utilizzo della loro MCU interna che ne gestisce completamente il funzionamento e la comunicazione con i dispositivi a livello di sistema.

La punto di vista dell'alimentazione, questi sensori non necessitano sistemi di Energy Harvesting in quanto possono prelevare l'energia necessaria per il loro funzionamento direttamente dalla rete elettrica monitorata e la batteria deve consentire di mantenere attiva la loro funzionalità durante i blackout, al fine di assicurare la continuità del funzionamento della rete di comunicazione.

### 2.1.4 Controllo presenze negli edifici

Sono state analizzate alcune soluzioni tecnologiche utilizzate per il monitoraggio delle presenze all'interno degli ambienti di edificio [13, 14]. Alcune si basano su tecnologie a ultrasuoni [15], altre su tecnologie a raggi infrarossi [16,17,18,19,20], mediante l'utilizzo di diverse tipologie di sensori. Ci si è concentrati sulle tecnologie a raggi infrarossi in quanto consentono di ottenere consumi inferiori. Sono stati individuati dispositivi di interesse per la gestione intelligente degli edifici (cognitive building) basati su tecnologie a raggi infrarossi e in particolare i cosiddetti "GridEye", sensori costituiti da una matrice di diodi IR (8x8) i quali, mediante la rilevazione della radiazione infrarossa emessa dagli oggetti, consentono di ottenere un'immagine e/o stima termografica degli oggetti o persone presenti di fronte ad essi [21]. Tale tipologia di sensori ha una MCU integrata la quale riceve i segnali di 64 diodi IR e ne gestisce la conversione e la memorizzazione in specifici registri interni ai quali si può accedere mediante interfaccia I2C. Il dispositivo mette a disposizione delle funzioni di risparmio energetico.

L'utilizzo di questi sensori per il conteggio delle presenze è stato studiato in diversi articoli scientifici [22,23,24], mediante l'utilizzo di tecniche di pattern recognition [21].

Le caratteristiche tipiche del sensore GridEye sono le seguenti:

- Risoluzione temperatura: 0.25 °C
- Accuratezza temperatura: +/-3 °C
- Angolo di visuale: 35.6 +/- 3°
- Range operativo temperatura: -20-80 °C
- Tensione operativa: 5 Vdc
- Corrente assorbita: 6.0 mA (normal mode), 0.4 mA (sleep mode), 1.1 mA (stand-by mode)
- Interfaccia di comunicazione: I2C

Un possibile utilizzo consiste nel posizionare il sensore GridEye sul varco di ingresso di un ambiente al fine di eseguire il conteggio netto degli individui che vi accedono, potendo così determinare il numero di persone presenti all'interno dell'ambiente monitorato. La funzionalità di conteggio è ottenuta mediante l'implementazione di un algoritmo di "pattern recognition".

La conoscenza del numero di persone presenti consente di avere una stima dell'apporto energetico del singolo individuo all'interno dell'edificio. Per ottenere questa funzionalità è però necessario eseguire continue interrogazioni del sensore, per cui è necessario definire, a livello di sistema, un metodo che consenta di mantenere il sensore in uno stato di "sleep mode" finché non si verifica il passaggio di una persona attraverso un varco posto all'ingresso della stanza. In questo modo si riesce a gestire in maniera ottimale i consumi energetici del sensore e quindi si può incrementare la durata delle batterie.

## 2.2 Energy Harvesting

Uno studio particolarmente approfondito ha riguardato le applicazioni di Energy Harvesting [25], tipicamente progettate per essere autosufficienti e che richiedono poca o nessuna manutenzione per diversi anni. Se l'energia risulta sufficiente ad alimentare direttamente il dispositivo, questo può addirittura operare senza alcuna batteria tradizionale, utilizzando solamente un piccolo buffer energetico, costituito di solito da un super-capacitore necessario per compensare la produzione non continua di energia elettrica.

L'Energy Harvesting rappresenta una tecnologia utilizzabile per alimentare dispositivi elettronici quando non sono disponibili fonti di energia convenzionale. Per questo motivo, risulta utile per l'applicazione in località remote, sott'acqua e in altri luoghi di difficile accesso.

I componenti del sistema di gestione dell'energia dovrebbero tipicamente avere le seguenti caratteristiche:

- Alta efficienza energetica nella memorizzazione di piccoli pacchetti di energia;
- Efficienza tale da garantire che l'energia consumata dal circuito di raccolta sia molto più piccola di quella catturata dalla sorgente;
- Energia condizionata dall'elettronica "low power" tale da soddisfare i requisiti di alimentazione relativamente all'applicazione desiderata;
- Ridotte dimensioni;
- Bassi costi di fabbricazione, manutenzione, montaggio, sostituzione.

Il segnale elettrico prodotto dai generatori harvesting (nano, micro e milli Volt) in genere non è direttamente utilizzabile e necessita di un pre-condizionamento che consiste in un adattamento energetico necessario per garantire una fonte di alimentazione stabile e con livelli di tensione adeguati. La regolazione della tensione è un aspetto di grande importanza in qualsiasi soluzione basata su Energy Harvesting poiché essa garantisce una fornitura stabile di energia elettrica al corrispondente carico. I convertitori DC/DC rappresentano l'elemento critico dei sistemi di raccolta dell'energia in quanto sono tenuti a soddisfare delle specifiche molto spinte e a consumare nello stesso tempo la minor quantità possibile di energia per eseguire la conversione elettrica.

Un generico sistema Energy Harvesting è costituito da:

- Generatore harvesting;
- Condizionamento/adattamento energetico;
- Convertitore DC/DC;
- Carico/accumulo.

Tutta l'energia presente in prossimità del dispositivo può essere convertita in energia elettrica utilizzabile per l'alimentazione, con efficienza più o meno elevata. Si riportano di seguito le principali fonti:

- onde radio (le stesse usate per la trasmissione dati): la radiazione elettromagnetica è una forma di energia derivante dalla propagazione contemporanea nello spazio di un campo elettrico e di un campo magnetico oscillanti, perpendicolari tra loro;
- energia cinetica: è l'energia posseduta dai corpi in moto; di particolare interesse è quella vibrante, cioè quella originata da pressioni applicate periodicamente, come le scarpe durante una camminata, oppure da vibrazioni meccaniche di motori o ancora da suoni o rumori ambientali a bassa frequenza, correnti d'aria o moti ondosi;
- luce ambientale, sia quella solare immagazzinata tramite celle fotovoltaiche sia luce artificiale proveniente dagli ambienti interni (es. lampadina) dove si impiegano apposite celle fotovoltaiche amorfe;
- termica: in presenza di gradienti termici si possono utilizzare generatori termoelettrici, con una tensione tipica di 0,1-0,2 mV/K; anche il calore umano e animale rientrano in questa categoria.

Per non perdere in efficienza, il circuito a valle del generatore deve presentare un'impedenza tale da portare il generatore a lavorare sempre vicino al punto di erogazione della massima potenza. Per soddisfare questa esigenza, esistono diverse topologie di convertitori con regolatori basate su algoritmi cosiddetti di MPPT (Maximum Power Point Tracking) che realizzano un adattamento di impedenza per eseguire il trasferimento della massima potenza.

Ai fini del progetto, l'unica fonte di energia ritenuta utile catturare è quella da sorgente luminosa, sia per applicazioni indoor che outdoor.

### 2.2.1 Onde radio

Oggi le onde radio ambientali sono presenti su una gamma sempre crescente di frequenze e livelli di potenza, specialmente in aree urbane altamente popolate. Le onde radio rappresentano una fonte di energia unica e ampiamente disponibile ma che deve essere efficacemente ed efficientemente raccolta. Il crescente numero di trasmettitori wireless comporta naturalmente una maggiore densità e disponibilità di potenza RF [25,26].

Un sistema di raccolta dell'energia in radiofrequenza può "catturare" e convertire l'energia elettromagnetica in una tensione continua; ciò può avvenire mediante una cosiddetta "rectenna", termine che deriva dalla contrazione delle parole "rectifying" ed "antenna" e vuole indicare una particolare antenna che sfrutta un particolare diodo Schottky per convertire la potenza prelevata alle radio frequenze in potenza continua. Per la rettificazione vengono utilizzati diodi Schottky in quanto sono quelli che presentano la minor tensione di soglia tra i diodi in commercio e quindi disperdono meno potenza per conduzione. L'altro componente, l'antenna, è il dispositivo mediante il quale si irradiano e si captano le onde elettromagnetiche; questo dispositivo consente la transizione da un'onda che si propaga in una struttura guidante (linea di trasmissione) a un'onda che si propaga in spazio libero e viceversa. Il modello elettrico che descrive la fonte di energia è fondamentalmente un generatore di tensione di tipo sinusoidale, avente un'impedenza interna prevalentemente resistiva. Generatore e resistenza dipendono dal tipo di antenna e dalla potenza che questa riesce a raccogliere. Per ottenere il massimo trasferimento di potenza, il circuito deve eseguire l'adattamento d'impedenza. Ciò è importante non solo per ottimizzare l'efficienza,

ma anche per eseguire una prima amplificazione (passiva) della tensione di ingresso. Viene usata la rete risonante LC in quanto i flussi di corrente continua attraverso l'induttore provocano un aumento di tensione e quindi una pre-amplificazione.

Poiché il segnale in ingresso AC ottenuto dall'antenna è generalmente molto più piccolo della soglia del diodo, sono stati sviluppati rettificatori che utilizzano al posto del diodo convenzionale il diodo Schottky che presenta una tensione di soglia più bassa. Questa soluzione ha un costo di elaborazione molto alto rispetto all'utilizzo del CMOS, quindi il diodo Schottky viene sostituito dai MOSFET. Il problema principale è dato dalla bassissima tensione d'ingresso che risulta essere minore della tensione di soglia dei diodi dei normali raddrizzatori. Viene utilizzato un particolare raddrizzatore CMOS (chiamato cella) a onda intera che permette, rispetto ai normali raddrizzatori, la rettifica della tensione e una discreta efficienza di conversione della potenza PCE, risultando particolarmente utile per RF Harvesting. Per migliorare ancora la PCE il raddrizzatore può presentare più stadi. Per rendere l'idea, l'architettura del raddrizzatore proposta è progettata con una tecnologia CMOS standard da 0,13  $\mu\text{m}$ . Per un ingresso RF da 950 MHz e un carico di uscita di 50 k $\Omega$ , i risultati delle simulazioni mostrano che il raddrizzatore raggiunge un PCE del 54% per un segnale di ingresso piccolo con un'ampiezza di 200 mV (-19 dBm) che è ben al di sotto della tensione di soglia nominale standard di transistori MOS nella tecnologia utilizzata.

### 2.2.2 Energia cinetica

L'energia cinetica, in particolare le vibrazioni a bassa frequenza come quelle prodotte dal vento, le vibrazioni meccaniche (ad es. trapano, tornio, passaggio di un treno, il movimento umano, l'inquinamento acustico), sono forme di energia meccanica convertibile in energia elettrica [25]. I dispositivi in grado di convertire il movimento meccanico in energia elettrica possono essere classificati in vari modi; una classificazione si basa sul metodo di conversione. È possibile quindi individuare tre classi di conversione:

- induzione magnetica;
- elettrostatica;
- piezoelettrica.

#### Induzione magnetica

Nei convertitori elettromagnetici è presente un sistema a magnete permanente il cui flusso viene concatenato con uno o più avvolgimenti; il moto relativo tra il magnete e l'avvolgimento causato dalle vibrazioni induce ai capi dell'avvolgimento (legge di Faraday-Lenz) una tensione proporzionale alla variazione nel tempo del flusso magnetico.

#### Elettrostatica

Nei convertitori elettrostatici (o capacitivi), assumendo che la capacità sia mantenuta in condizioni di carica costante, le vibrazioni fanno muovere le armature e il moto relativo tra le armature causa su queste una tensione proporzionale alla variazione della capacità nel tempo; la limitazione fondamentale consiste nel fatto che si deve prima caricare la capacità al fine di poter attuare la conversione.

#### Piezoelettrica

L'effetto piezoelettrico consiste nella proprietà di alcuni materiali sottoposti a stress meccanico di produrre un campo elettrico proporzionale allo stress stesso, ed è spiegabile a livello cristallografico con una distorsione del reticolo cristallino.

La tensione è proporzionale alla forza applicata, quindi per avere una tensione di intensità temporale abbastanza grande da poter essere utilizzata, occorre sottoporre il materiale a una forza continua (stress meccanico) in modo tale da avere un generatore abbastanza efficiente tipo il generatore piezoelettrico oscillante. La tensione in uscita da un generatore piezoelettrico ha un andamento pseudo-periodico ed assume alternativamente valori positivi e negativi; è quindi necessario un circuito raddrizzatore, in quanto i

carichi elettronici lavorano solitamente in corrente continua; in letteratura sono presenti tantissimi raddrizzatori, il più famoso è quello a ponte a diodi; questo presenta una caduta di tensione lungo i diodi molto elevata quindi il suo utilizzo in ambito harvesting a volte risulta non possibile. Per ovviare a questo problema sono stati sviluppati raddrizzatori a ponte a onda intera a bassa perdita, come quello basato su interruttori MOS che limita queste perdite.

### 2.2.3 Luce ambientale

Questa tipologia di dispositivi consente di eseguire una conversione della luce (o più in generale di una radiazione elettromagnetica) in energia elettrica [25,27]. In particolare, quando un flusso luminoso investe un reticolo cristallino di un semiconduttore, si verifica la transizione in banda di conduzione di un certo numero di elettroni al quale corrisponde un egual numero di lacune che passa in banda di valenza. Si rendono pertanto disponibili portatori di carica, che possono essere sfruttati per generare una corrente elettrica. L'unità di base di un generatore fotovoltaico è la cella; un insieme di celle collegate in serie o in parallelo per aumentare la quantità di energia erogata è chiamato modulo; l'unione di più moduli è chiamata pannello o sistema fotovoltaico. La densità di potenza irradiata dal sole è circa 1.353 kW/m<sup>2</sup>, solo una parte raggiunge la superficie terrestre, circa 1.000 W/m<sup>2</sup> (questo è solo un valore di riferimento, dato che l'irradiazione netta sulla superficie terrestre dipende da molti fattori: pulviscolo, nuvole, orario della giornata, ecc). In ambiente harvesting non si considera solo la luce solare ma anche quella delle illuminazioni artificiali, quindi la luce interna prodotta dai sistemi per illuminazione artificiale. Il circuito equivalente di tale tipologia di sensore può essere ricondotto a un generatore di corrente variabile in funzione dell'illuminazione e della temperatura. La dipendenza della corrente dalla temperatura e dall'intensità di irraggiamento porta ad avere una caratteristica I-V in cui il punto di massima potenza ( $I_{mp}$ ;  $V_{mp}$ ) si muove al variare della temperatura e della radiazione solare (quindi dell'angolo di incidenza che varia nell'arco di una giornata).

Occorre poter cambiare il punto di lavoro in base all'esigenza per poter avere sempre la massima potenza erogabile: esistono dei regolatori basati sul MPPT (Maximum Power Point Tracking). Di conseguenza, per massimizzare la produzione di energia, sia i sistemi di raccolta esterni che quelli interni sono progettati per mantenere la tensione di funzionamento al valore designato. Nei sistemi più complessi, gli algoritmi MPPT (Maximum Power Point Tracking) modificano dinamicamente la tensione operativa della cella per garantire che tenga traccia di eventuali cambiamenti nell'illuminazione o nelle condizioni operative. Mentre i raccoglitori di energia solare devono fare i conti con le nuvole e altre ombre passanti, i raccoglitori di energia per la luce interna possono affrontare differenze drammatiche nell'illuminazione a seconda del posizionamento all'interno di una stanza. Per tali motivi, i sistemi di raccolta dell'energia per l'illuminazione di interni richiedono l'uso di metodi simili per impostare e mantenere MPP al livello ottimale.

In commercio si riscontra un numero elevato di generatori fotovoltaici con un'ottima risposta su un ampio intervallo di lunghezze d'onda in modo tale da essere utilizzati in esterno e in interno (efficienza 17%) con dimensioni non troppo elevate.

Per non perdere in efficienza, il circuito a valle del generatore fotovoltaico deve presentare una impedenza variabile tale da portare il generatore a lavorare sempre il più vicino possibile al punto di erogazione della massima potenza.

In letteratura sono presenti moltissime topologie di convertitori con regolatori basate su algoritmi cosiddetti di MPPT. Alcuni di questi algoritmi sono implementabili in ambito harvesting:

### Tensione a vuoto

Questo metodo a catena aperta si basa sulla semplice osservazione che la tensione del M.P.P. è sempre una percentuale fissa della tensione di circuito aperto:

$$VMPP = kvVOC$$

Con  $k_v$  che varia da 0,71 - 0,78, basta quindi misurare la tensione a vuoto e si calcola la VMPP. Occorre quindi un sensore per misurare la temperatura dato che non necessita di un microcontrollore; anche se è un metodo approssimativo è facile ed economico da integrare.

### Frazione della corrente di cortocircuito

Simile a quello a tensione a vuoto, solo che ora la corrente del M.P.P. è una percentuale della corrente di cortocircuito:

$$IMPP = kiVOC$$

Con  $k_i$  che varia da 0,78 – 0,92, questo metodo in catena aperta sfrutta la proporzionalità fra la corrente di cortocircuito e il valore della corrente del maximum power point al variare dell'irraggiamento. Il principale vantaggio di questo metodo è costituito dal fatto che la proporzionalità rimane valida al variare della temperatura da 0 a 60 °C. Per la realizzazione di questa tecnica di inseguimento non è necessaria grande capacità di calcolo da parte del controllore. È richiesta tuttavia la presenza di un apposito sensore in parallelo al pannello che provveda a misurare la corrente di cortocircuito ad intervalli regolari.

### Perturba e osserva

Insegue il punto di massima potenza effettuando continue variazioni del valore di tensione di uscita del pannello fotovoltaico. Comparando la variazione di potenza ottenuta con la variazione di tensione effettuata, l'algoritmo stabilisce in quale direzione debba essere ricercato il M.P.P. Questo metodo è molto efficace in condizioni meteo costanti o lentamente variabili. Necessita di due sensori per corrente e tensione e di un microcontrollore.

### Conduttanza incrementale

Si basa sul fatto che la pendenza della curva tensione-corrente è zero nel punto di massima potenza M.P.P, positiva a sinistra e negativa a destra di esso. Il M.P.P. è determinato confrontando la conduttanza istantanea ( $I/V$ ) alla conduttanza incrementale ( $\Delta I/\Delta V$ ). Una volta raggiunto il punto M.P.P, il funzionamento della sorgente fotovoltaica viene mantenuto finché un cambiamento  $\Delta I$  non venga rilevato. Necessita di due sensori per corrente e tensione e di un microcontrollore.

## 2.2.4 Termica

Scoperta da T. J. Seebeck nel 1821, è un effetto termoelettrico per cui, in un circuito costituito da due o più conduttori metallici o semiconduttori, si riscontra in presenza di un gradiente termico una differenza di potenziale ( $\mu V$  per Kelvin di differenza) [25]. Questo è spiegabile a livello cristallino dalla diffusione termica dei portatori di carica: elettroni nei metalli, elettroni e lacune nei semiconduttori, ioni in conduttori ionici. Per esempio, nel caso dei metalli l'aumento di temperatura comporta il crescere dell'energia cinetica degli elettroni: nella zona dove la temperatura è maggiore essi si spostano dalle posizioni reticolari in modo più veloce rispetto alla zona a bassa temperatura. Questo effetto provoca una piccola differenza di potenziale a circuito aperto e la circolazione di corrente a circuito chiuso.

L'effetto Seebeck dunque è generato dalla diffusione di elettroni attraverso l'interfaccia di due metalli isotermitici a contatto, sottoposti ad un gradiente di temperatura: quello che riceve elettroni diventa (all'interfaccia) negativo, mentre quello che fornisce elettroni diventa positivo. In altre parole, avviene che i

portatori della zona a temperatura più alta diffonderanno verso quelli nella zona a temperatura più bassa. Così come i portatori di carica nella zona a bassa temperatura diffondono dalla zona più fredda a quella più calda, per la stessa ragione i due metalli generano potenziali elettrici differenti nelle due regioni a differente temperatura dando origine a un flusso di corrente.

#### Circuito equivalente

Il sistema si comporta elettricamente come un generatore di tensione continua con, in serie, una resistenza. Nella cella termoelettrica sono solitamente presenti diversi moduli, quindi quel valore di resistenza andrà moltiplicato per N, coprendo range che vanno da pochi Ohm a migliaia di Ohm.

## 2.3 Wireless Sensor Networks

Durante la fase di progettazione si è scelto di fare uso di tecnologie a corto raggio che consentissero di realizzare una topologia di rete mesh a basso consumo di energia e che al contempo permettessero l'utilizzo di un numero di nodi di rete elevato. La tecnologia scelta per lo sviluppo del progetto è Z-Wave che presenta come punto di forza la sua interoperabilità. La Z-Wave Alliance garantisce che ogni dispositivo Z-Wave sia conforme a una serie rigorosa di standard. Ogni dispositivo certificato Z-Wave funziona con ogni controller certificato Z-Wave. Ci sono oltre 600 produttori che producono un totale di oltre duemila prodotti certificati Z-Wave. Ciascuno è in grado di collegarsi direttamente alla rete di dispositivi Z-Wave esistente.

### 2.3.1 Il protocollo Z-Wave

Z-Wave è un protocollo nativo per la domotica, e viene utilizzato per l'automazione in diverse tipologie di ambienti [28]: residenziali, commerciali, ricettivo/alberghieri e recentemente anche in settori dell'assistenza sanitaria. Le applicazioni del protocollo riguardano vari ambiti, come la domotica, la telesorveglianza e la telemedicina, oltre che per intrattenimento domestico, il controllo accessi e i sistemi per la gestione dell'efficienza energetica.

Il protocollo scelto è uno standard internazionale per la realizzazione di reti mesh interoperabili e a bassa potenza e supporta la comunicazione bidirezionale tra i dispositivi abilitati, consentendo a prodotti di costruttori diversi di funzionare assieme in modo trasparente; questo aspetto è uno dei punti di forza del protocollo scelto in fase progettuale.

Esso utilizza inoltre un flusso di dati ridotto e tale scelta consente di ottenere una comunicazione a bassa latenza con una velocità di trasmissione dei dati fino a 100 kbps.

La frequenza operativa del protocollo Z-Wave è attorno ai 900 MHz e l'utilizzo di tale banda di frequenze permette di evitare interferenze con altri sistemi, come Wi-Fi, Bluetooth e altri sistemi che operano nella banda dei 2.4 GHz. Le frequenze cosiddette sub giga Hertz consentono al segnale Z-Wave di attraversare le pareti degli edifici con maggiore facilità rispetto a segnali a frequenze superiori, permettendo così una maggiore efficienza e affidabilità nella comunicazione.

Di base, il protocollo Z-Wave consente di supportare fino a 232 dispositivi per un solo network. Tuttavia, ogni nodo (cosiddetto hub) è in grado di gestire più di un network alla volta, per cui è possibile ottenere reti complesse con un numero molto elevato di nodi.

### 2.3.2 La rete Z-Wave

Una rete Z-Wave è costituita da vari nodi che si dividono in due categorie: controllori e slave.

I nodi controllori hanno la capacità di memorizzare la tabella di indirizzamento di tutta la rete e di eseguire i calcoli relativi ai percorsi che dovranno compiere i pacchetti dei dati per raggiungere le diverse destinazioni.

I controller infatti trasmettono i percorsi ai dispositivi slave al fine di abilitarli alla trasmissione dei dati, similmente a quello che avviene in una rete informatica in cui il router è preposto a eseguire operazioni simili.

I nodi slave invece non sono in grado di stabilire autonomamente i percorsi e in genere svolgono funzioni primitive di I/O, come ad esempio l'accensione, lo spegnimento di luci o la regolazione dell'intensità delle luci o ancora il rilevamento di parametri ambientali provenienti dai sensori dislocati all'interno dell'ambiente.

La creazione di una rete Z-Wave avviene mediante l'utilizzo di almeno un nodo controllore ed essa può ospitare fino a 232 nodi; ha un identificativo denominato Network ID, composto da 4 byte, che identifica l'insieme dei nodi appartenenti alla stessa rete, che non potranno comunicare con nodi aventi Network ID diverso. Ogni dispositivo è identificato mediante un Node ID univoco, ha una lunghezza di 1 byte e costituisce anche l'indirizzo del nodo all'interno della rete. Il Node ID viene assegnato dal controllore a ciascun dispositivo durante il processo di inclusione alla rete Z-Wave. Il controllore ha il compito di generare il Network ID e di imporlo a tutti i nodi della rete ed esso è designato automaticamente come Controllore Primario nel momento in cui assegna il primo Node ID della rete. All'interno di una rete Z-Wave potranno coesistere più controllori ma il primario è quello che imporrà il Network ID e il primo Node ID, gli altri saranno controllori secondari e potranno essere aggiunti in modo modulare alla rete esistente. Ad esempio, in un'abitazione in genere è sufficiente avere un solo controllore mentre in edifici più complessi potrebbe essere utile l'utilizzo anche di controllori secondari.

### 2.3.3 Configurazione della rete Z-Wave

La procedura di inclusione ed esclusione di un nodo all'interno di una rete Z-Wave viene eseguita con delle azioni, normalmente definite dai produttori dei dispositivi, che devono essere intraprese dall'utente sia sul nodo da includere (o escludere) che sul controllore. L'inclusione/esclusione di un nodo slave viene eseguita normalmente mediante un click su un pulsante o una combinazione di click su più pulsanti, mentre l'azione da compiere sul controllore consiste nell'esecuzione di un'operazione mediante l'interfaccia web di accesso e configurazione del dispositivo e della rete stessa. Tale procedura viene eseguita dal controllore e necessita che il dispositivo da includere/escludere nella rete si ponga nello stato di denominato "learning mode" durante il quale il dispositivo invia in broadcast i propri Network ID e Node ID, che per un dispositivo non ancora incluso sono rispettivamente un numero casuale e zero. Il controllore, nella fase di inclusione, risponde inviando il Network ID e il Node ID al dispositivo slave richiedente l'inclusione il quale, essendo appunto in learning mode, memorizzerà tali valori aggiornando le proprie informazioni di nodo. In modo simile, la procedura di esclusione, dopo che il controllore ha identificato il dispositivo da escludere mediante la ricezione dei messaggi "broadcast" del dispositivo che è stato messo in learning mode, procede alla rimozione di tutte le informazioni relative al dispositivo dalla propria tabella di instradamento. Il nodo che ha eseguito la richiesta di esclusione, azzerà tutte le informazioni di rete che aveva memorizzato, azzerà le configurazioni e le eventuali personalizzazioni e imposta il suo Node ID a zero ed il Network ID ad un numero casuale in modo che possa successivamente essere nuovamente incluso in una rete Z-Wave.

### 2.3.4 Topologia e instradamento

Il protocollo Z-Wave utilizza una topologia di rete mesh (a maglia o totalmente interconnessa) e mediante il proprio nodo controllore viene definito il percorso dei dati (tabella di indirizzamento). Al fine di rendere meno gravoso il compito di instradare i pacchetti di dati all'interno della rete Z-Wave, sono stati creati due tipi di nodi slave abilitati a eseguire delle procedure di instradamento: i Routing Slave e gli Enhanced Routing Slave. Essi possono contenere dei percorsi preconfigurati, che vengono assegnati dal controllore e li abilitano ad avviare la comunicazione. Una caratteristica fondamentale delle reti Z-Wave consiste nella possibilità di eseguire la trasmissione di un messaggio da un nodo all'altro sia, con una comunicazione radio diretta sia in maniera indiretta appoggiandosi alla capacità dei nodi di funzionare da ripetitori. Questa

caratteristica fa sì che i nodi siano in grado di ritrasmettere i messaggi al fine di garantire una connettività mesh che presenti più percorsi possibili da un nodo A a un nodo B. Ciò consente inoltre di estendere la portata di un singolo nodo in caso di impossibilità alla comunicazione diretta.

### 2.3.5 Associazioni di nodi Z-Wave

Un'ulteriore caratteristica del protocollo Z-Wave consiste nella possibilità di eseguire le cosiddette "associazioni" di nodi. I nodi associati sono nodi in cui uno dei dispositivi (nodo A) esegue una azione sotto il controllo dell'altro dispositivo (nodo B). Ad esempio, se il nodo A è associato al nodo B significa che A è sotto il controllo di B. Ad esempio, A potrebbe essere un dispositivo che comanda una presa elettrica e B un sensore di temperatura che attiva la presa elettrica in funzione dei livelli di temperatura rilevati. Le associazioni vengono utilizzate per permettere ai nodi, che possono avviare una comunicazione, di eseguire il controllo di un altro nodo della rete senza che vi sia necessità di azioni da parte del controllore e ciò semplifica sia il tempo di esecuzione di alcuni comandi sia la necessità di instradare ulteriori comunicazioni da parte del controllore per svolgere azioni semplici. La caratteristica delle associazioni consente di rendere la rete più veloce e più robusta, infatti una volta impostate le associazioni tramite il controllore, sollevano il controllore dal compito di controllare quella specifica funzionalità.

## 2.4 Il progetto

La rete di sensori definita per il progetto sarà applicata all'interno di un edificio individuato nella città di Carbonia. Essa sarà costituita da un numero di controllori Z-Wave, in funzione delle dimensioni degli ambienti e delle distanze tra essi, connessi a loro volta alla rete informatica locale dell'edificio tramite connessione Wi-Fi o cablata (ethernet); essi saranno installati internamente agli ambienti da monitorare. Ai controller saranno associati un sensore di temperatura e umidità, un sensore CO2+VOC, un sensore GridEye e un sensore per la misura dei parametri elettrici; anch'essi saranno posizionati internamente agli ambienti scelti.

Ciascun dispositivo dovrà essere dotato di un sistema di Energy Harvesting a supporto della batteria di alimentazione del sensore. Il dispositivo per l'harvesting sarà costituito da un mini pannello fotovoltaico in silicio amorfo, installato esternamente al contenitore plastico del sensore.

Il dispositivo gateway/controller Z-Wave, sarà invece costituito da un micro computer Raspberry PI Zero W, al quale sarà collegata una pennina USB, necessaria per utilizzare il dispositivo come gateway Z-Wave.

Esso verrà collegato a un alimentatore connesso alla rete elettrica e quindi non sarà dotato di sistema di Energy Harvesting.

Al controller dovranno essere associati i sensori Z-Wave Temperatura e umidità, CO2+VOC, GridEye e il misuratore delle grandezze elettriche, al fine di garantire la corretta lettura dei dati e la comunicazione degli stessi alla piattaforma connessa sia in locale che in cloud.

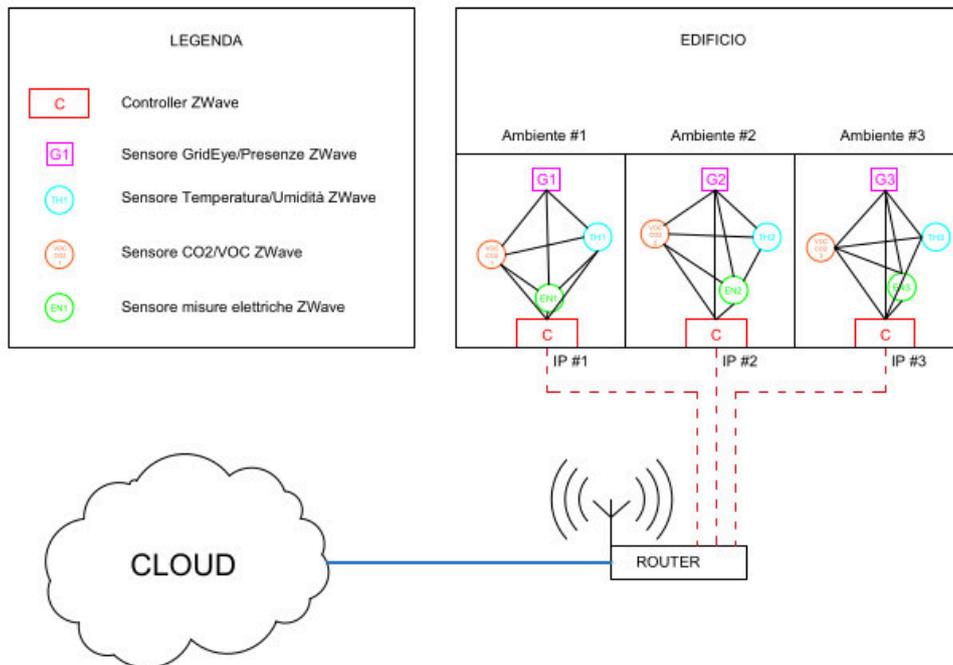
Successivamente avverrà l'associazione dei dispositivi al controller e, dopo aver verificato la corretta associazione alla rete Z-Wave creata, i sensori saranno visualizzati nell'interfaccia locale e in Cloud.

### 2.4.1 La rete Z-Wave

La rete progettata in tal modo consentirà di realizzare a livello di singolo ambiente una topologia mesh, nella quale ogni dispositivo presente nell'ambiente comunicherà con il gateway/controller di zona/ambiente ed eventualmente, anche in modo diretto, con altri dispositivi Z-Wave. A livello di edificio invece, l'architettura sarà a stella e i controller Z-Wave dialogheranno con un sistema locale o remoto, in funzione del tipo di controllo che si vorrà eseguire all'interno dell'edificio. Questa struttura consentirà inoltre di aggiungere, rimuovere o modificare il numero e la tipologia di sensori presenti nell'ambiente,

semplicemente associando o dissociando il dispositivo dal rispettivo controller di zona ma anche di aggiungere o rimuovere interi ambienti semplicemente aggiungendo dei gateway/controller negli ambienti di interesse.

Questa metodologia permette un'estrema flessibilità e modularità oltre a consentire di aggiornare i firmware dei singoli dispositivi Z-Wave presenti grazie all'interfaccia web. Sarà inoltre possibile eseguire un controllo da remoto di tutti gli ambienti e degli eventuali futuri edifici strutturati con questo sistema. La struttura della rete progettata è riportata nella figura 1:



**Figura 1 – schema topologico della rete progettata**

#### 2.4.2 Aspetti tecnici della progettazione

Il protocollo Z-Wave nasce in ambito building automation, in cui è necessario dialogare con i dispositivi sensore dislocati nei vari ambienti che costituiscono l'edificio. Esso quindi sarà caratterizzato da diversi sensori dotati di dispositivi Z-Wave integrati che comunicheranno con i rispettivi controller e con il sistema di monitoraggio.

I controller Z-Wave gestiranno uno o più ambienti nei quali saranno dislocati i diversi sensori e comunicheranno via radio (WiFi) coi router/acces point verso l'esterno.

Il sistema di monitoraggio, chiamato Zway, consentirà la gestione di scenari e quindi il controllo dei parametri ambientali e dei consumi elettrici di ogni stanza interna all'edificio, monitorandone inoltre lo stato di occupazione mediante i sensori di presenza.

Ogni sensore sarà dotato di sistema di Energy Harvesting, capace di ricevere l'energia sotto forma luminosa dall'impianto di illuminazione interno, ma anche dall'esterno, e di renderla disponibile per i dispositivi elettronici o per la batteria, al fine di prolungarne la vita utile.

### 2.4.3 Scheda Z-Wave – Controller

La scheda Z-Wave controller è costituita da una unità Raspberry PI Zero W nella quale è montato un Z-Wave USB Stick (UZB) che consente di utilizzare il Raspberry come controllore della rete Z-Wave, unitamente al software di gestione della rete Z-Wave, denominato ZWay. Il dispositivo Raspberry PI Zero W è mostrato in figura 2:

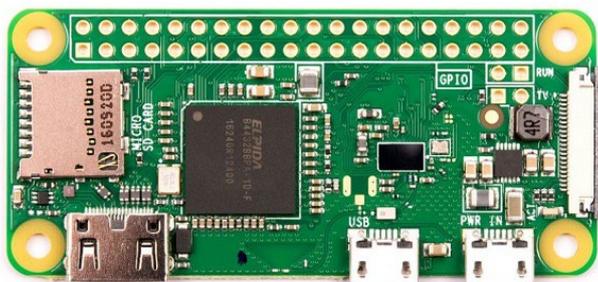


Figura 2 – Raspberry PI Zero W

Il dispositivo UZB è mostrato in figura 3:



Figura 3 – UZB Stick

Il dispositivo è collegato a una porta USB del Raspberry, nel quale viene installato il software Zway che consente di realizzare un sistema di controllo per building automation che supporta Z-Wave ma anche altre tecnologie, come ad esempio il WiFi. Funziona su un'ampia varietà di hardware come Raspberry Pi, Windows, Ubuntu, Debian, etc. Il sistema è altamente modulare e consiste di vari elementi che possono essere utilizzati insieme oppure separatamente. È inoltre necessario l'uso di un riduttore USB-Mini USB per collegare il dispositivo UZB al Raspberry PI Zero W (figura 4).



Figura 4 – adattatore USB Micro-USB

Sarà necessario alimentare il dispositivo con un alimentatore AC/DC con tensione di uscita a 5Vdc e corrente massima 2A con connettore mini USB in uscita per adattarsi agevolmente al connettore del Raspberry PI Zero W. Il dispositivo con tutte le periferiche dovrà essere alloggiato in apposito contenitore plastico, dotato di opportuni fori per il passaggio del cavo di alimentazione e dovrà essere eventualmente apribile.

#### 2.4.4 Schede Z-Wave – Zuno Board

Nella fase preliminare è stata utilizzata una board di sviluppo per dispositivi Z-Wave basata sui processori della Silicon Labs della famiglia dei moduli Z-Wave 500 ZM5101 (figura 5). La Board, denominata Zuno, consente di implementare il sistema di controllo dei sensori, le eventuali operazioni di elaborazione dei segnali e la gestione della comunicazione Z-Wave mediante programmazione del chip attraverso l'ambiente di sviluppo Arduino IDE.

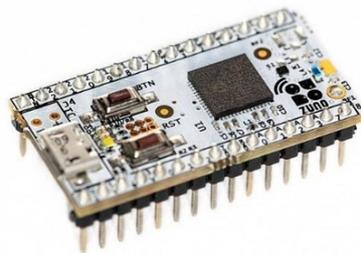


Figura 5 – Zuno Board

Le caratteristiche del dispositivo sono le seguenti:

- Conforme allo Z-Wave Plus;
- Adatto a tutte le frequenze Z-Wave;
- Supporto per sicurezza AES 128 bit (S0 ed S2);
- Upgrade via USB o radio (Z-Wave OTA);
- Multicanale (32 canali);
- 5 Gruppi di associazione;
- Switch di controllo, dimmer, chiudi porte e scene.

Zuno viene utilizzato nel dispositivo progettato al fine di comunicare tramite interfaccia I2C coi sensori a bordo scheda e mediante il protocollo Z-Wave con il controller e/o coi dispositivi router Z-Wave se configurati per far transitare le informazioni attraverso essi all'interno della rete mesh.

#### 2.4.5 Scheda Z-Wave – GridEye

La scheda GridEye è un End-Device Z-Wave che consente di eseguire il conteggio delle persone che transitano attraverso un varco, consentendo quindi il monitoraggio delle persone presenti all'interno di un determinato ambiente. La scheda sarà dotata di:

- Un PCB;
- Un dispositivo a microcontrollore per l'esecuzione dei calcoli relativi al pattern recognition;
- Un dispositivo per la gestione e la connessione alla rete Z-Wave
- Un sensore AMG8833/AMG8834 montato su opportuna board
- Un cavo flessibile per il collegamento tra il sensore AMG e il PCB;
- Una batteria al Li-Po/Li-Ion da 3.7V 2200mAh ;

- Un dispositivo elettronico per energy harvesting;
- Un pannello fotovoltaico in silicio amorfo;
- Un convertitore AC/DC a 5V 200mA;
- Un case plastico.

#### 2.4.6 Scheda Z-Wave – CO2 e VOC

La scheda CO2 e VOC è un End-Device Z-Wave che consente di eseguire la verifica della qualità dell'aria mediante la misurazione e il monitoraggio dei valori di CO2 e VOC all'interno dell'ambiente. La scheda sarà dotata di:

- Un PCB;
- Un dispositivo a microcontrollore per l'esecuzione dei calcoli relativi alle misurazioni dei parametri ambientali e gestione della connessione alla rete Z-Wave;
- Un sensore mics-vz-89te montato su opportuna board;
- Un cavo flessibile per il collegamento tra il sensore mics-vz-89te e il PCB;
- Una batteria al Li-Po/Li-Ion da 3.7V 2200mAh ;
- Un dispositivo elettronico per energy harvesting;
- Un pannello fotovoltaico in silicio amorfo;
- Un case plastico.

#### 2.4.7 Scheda Z-Wave – Temperatura e umidità

La scheda Temperatura e Umidità è un End-Device Z-Wave che consente di eseguire la verifica, la misurazione e il monitoraggio dei valori di temperatura e umidità all'interno dell'ambiente. La scheda sarà dotata di:

- Un PCB;
- Un dispositivo a microcontrollore per l'esecuzione dei calcoli relativi alle misurazioni dei parametri ambientali e la gestione della connessione alla rete Z-Wave;
- Un sensore scc30-db RH/T montato su opportuna board;
- Un cavo flessibile per il collegamento tra il sensore scc30-db RH/T e il PCB;
- Una batteria al Li-Po/Li-Ion da 3.7V 2200mAh ;
- Un dispositivo elettronico per energy harvesting;
- Un pannello fotovoltaico in silicio amorfo;
- Un case plastico.

#### 2.4.8 Scheda Z-Wave – Misuratore di parametri elettrici

Il misuratore di parametri elettrici selezionato per il progetto è un dispositivo commerciale prodotto da una società sarda, WiDom SRL, che consente di eseguire la misurazione di tensione, corrente, potenza ed energia mediante il collegamento del dispositivo alla linea elettrica da cui si preleva energia verso un determinato carico.

Lo stesso dispositivo consente di eseguire uno switch on e off del carico in funzione di ciò che viene configurato a livello di sistema di controllo, qualora richiesto dalla applicazione.

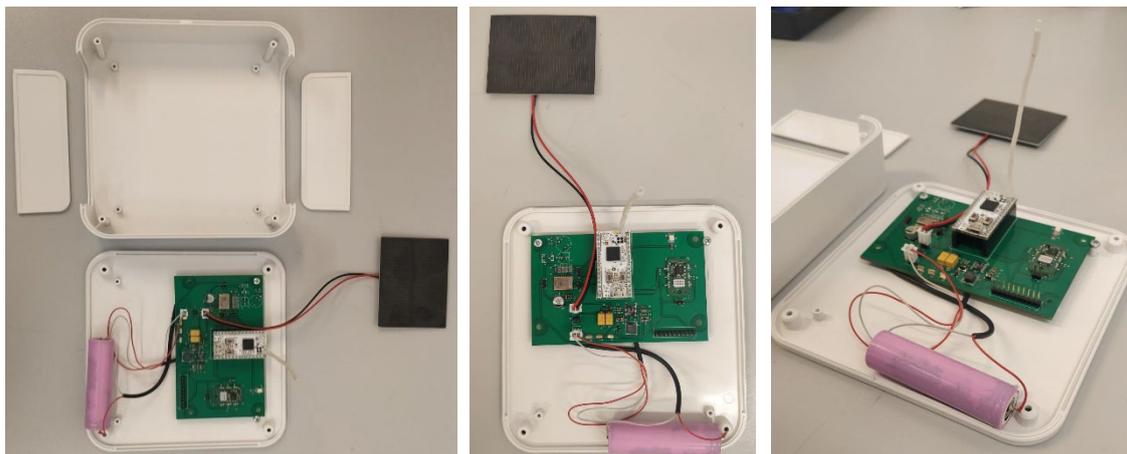
### 3 Conclusioni

L'attività di progetto relativa alla LA 1.36, condotta nella prima annualità, ha riguardato nelle prime fasi lo studio dello stato dell'arte mediante analisi della letteratura sul tema dei sensori (caratteristiche e tipologie), dei sistemi di Energy Harvesting e dei protocolli che consentono di realizzare reti mesh utilizzate per il monitoraggio di parametri ambientali all'interno degli edifici. È stata inoltre effettuata un'analisi dei dispositivi presenti sul mercato. Successivamente sono stati definiti i criteri di scelta dei componenti necessari per la realizzazione della rete mesh, in coerenza con le esigenze di progettazione e di sviluppo dei dispositivi individuate. A seguire è stata effettuata la progettazione della rete mesh e, nell'ultima fase della LA 1.36, le attività sono state concentrate sullo sviluppo di un prototipo da laboratorio di sensori radio dotati di Energy Harvesting.

I risultati raggiunti hanno riguardato dapprima l'acquisizione delle conoscenze sulle tecnologie disponibili per la realizzazione delle reti mesh. Tali conoscenze hanno consentito di poter operare scelte consapevoli sia in merito alle caratteristiche dei componenti (sensori, controllori, schede elettroniche) sia in merito alla definizione della topologia della rete mesh.

Le attività di progettazione e di sviluppo hanno condotto alla realizzazione di un dispositivo elettronico unico (figura 6), costituito attualmente dai sensori GridEye, CO2 e VOC ed estendibile a ulteriori sensori (temperatura, umidità degli ambienti) presenti in un'unica board da laboratorio, dotata di dispositivi per la connessione alla rete Z-Wave e per la gestione dei dati provenienti dai sensori.

Il dispositivo elettronico è dotato di un sistema di Energy Harvesting ed è stato progettato per essere inserito all'interno di una contenitore plastico; in uno sviluppo futuro si potrebbero includere ulteriori fonti di energia disponibili nell'ambiente per consentire l'alimentazione dell'Harvester. Anche i controller Z-Wave sono dotati di un contenitore plastico, all'interno del quale viene alloggiato il dispositivo Raspberry PI Zero W, che sarà connesso tramite WIFI alla rete informatica dell'edificio individuato nel progetto. Ogni dispositivo Raspberry PI Zero W sarà equipaggiato con un dispositivo UZB e con un opportuno alimentatore da collegare alla rete elettrica.



**Figura 6 – prototipo di sensore Z-Wave realizzato**

## 4 Riferimenti bibliografici

1. Kubba, S., Building Information Modeling (BIM). In *Handbook of Green Building Design and Construction*, 2017; pp 227-256.
2. Akanmu, A.; Olatunji, O.; Love, P. E. D.; Nguyen, D.; Matthews, J., Auto-generated site layout: an integrated approach to real-time sensing of temporary facilities in infrastructure projects\*. *Structure and Infrastructure Engineering* 2015, 12, (10), 1243-1255.
3. Hayat, H.; Griffiths, T.; Brennan, D.; Lewis, R. P.; Barclay, M.; Weirman, C.; Philip, B.; Searle, J. R., The State-of-the-Art of Sensors and Environmental Monitoring Technologies in Buildings. *Sensors* 2019, 19, (17).
4. Kim, J. W.; Jeong, Y. K.; Lee, I. W., Automatic sensor arrangement system for building energy and environmental management. *Energy Procedia* 2012, 14, 265-270.
5. Zhang Y. (2019) Energy Harvesting Technologies in Wireless Sensor Networks. In: Shen X., Lin X., Zhang K. (eds) *Encyclopedia of Wireless Networks*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-32903-1\\_262-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-32903-1_262-1).
6. AL Shaqsi, A. Z., Sopian, K. and Al-Hinai, A. (2020) "Review of energy storage services, applications, limitations, and benefits," *Energy reports*, 6, pp. 288–306.
7. Mishra, M. K. *et al.* (2019) "MEMS Technology: A Review," *Journal of Engineering Research and Reports*, pp. 1–24.
8. Wu, Z., Qiu, K. and Zhang, J. (2020) "A smart microcontroller architecture for the Internet of Things," *Sensors (Basel, Switzerland)*, 20(7), p. 1821.
9. Kim, W. and Jung, I. (2019) "Smart sensing period for efficient energy consumption in IoT network," *Sensors (Basel, Switzerland)*, 19(22), p. 4915.
10. Addabbo, T. *et al.* (2019) "Using the I2C bus to set up long range wired sensor and actuator networks in smart buildings," in *2019 4th International Conference on Computing, Communications and Security (ICCCS)*. IEEE.
11. Domb, M. (2019) "Smart home systems based on internet of things," in *Internet of Things (IoT) for Automated and Smart Applications*. IntechOpen.
12. Lengyel, L. *et al.* (2015) "SensorHUB: An IoT driver framework for supporting sensor networks and data analysis," *International journal of distributed sensor networks*, 11(7), p. 454379.
13. Jin, X.; Wang, G.; Song, Y.; Sun, C., Smart building energy management based on network occupancy sensing. *Journal of International Council on Electrical Engineering* 2018, 8, (1), 30-36.
14. Han, K.; Zhang, J., Energy-saving building system integration with a smart and low-cost sensing/control network for sustainable and healthy living environments: Demonstration case study. *Energy and Buildings* 2020, 214.

15. Caicedo, D.; Pandharipande, A., Ultrasonic array sensor for indoor presence detection. In *2012 Proceedings of the 20th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, IEEE: Bucharest, 2012; pp 175-179.
16. Besson, J.; Keller, H.; Cima, D., Achieving High Reliability In Passive Infrared Intruder Alarms With Lithium Tantalate Pyroelectric Detectors. In *Advanced Infrared Sensor Technology*, 1983; pp 238-248.
17. Sun, Q.; Hu, F.; Hao, Q., Mobile Target Scenario Recognition Via Low-Cost Pyroelectric Sensing System: Toward a Context-Enhanced Accurate Identification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems* 2014, 44, (3), 375-384.
18. Yang, B.; Luo, J.; Liu, Q., A novel low-cost and small-size human tracking system with pyroelectric infrared sensor mesh network. *Infrared Physics & Technology* 2014, 63, 147-156.
19. Qi, H.; Fei, H.; Yang, X., Multiple Human Tracking and Identification With Wireless Distributed Pyroelectric Sensor Systems. *IEEE Systems Journal* 2009, 3, (4), 428-439.
20. Chowdhury, Z. I.; Imtiaz, M. H.; Azam, M. M.; Sumi, M. R. A.; Nur, N. S., Design and implementation of Pyroelectric Infrared sensor based security system using microcontroller. In *IEEE Technology Students' Symposium*, 2011; pp 1-5.
21. Perra, C. *et al.* (2021) "Monitoring indoor people presence in buildings using low-cost infrared sensor array in doorways," *Sensors (Basel, Switzerland)*, 21(12), p. 4062.
22. Basu, C.; Rowe, A., Tracking Motion and Proxemics using Thermal-sensor Array. *CoRR* 2015, abs/1511.08166.
23. Mohammadmoradi, H.; Munir, S.; Gnawali, O.; Shelton, C., Measuring People-Flow through Doorways Using Easy-to-Install IR Array Sensors. In *2017 13th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, 2017; pp 35-43.
24. Trofimova, A. A.; Masciadri, A.; Veronese, F.; Salice, F., Indoor Human Detection Based on Thermal Array Sensor Data and Adaptive Background Estimation. *Journal of Computer and Communications* 2017, 05, (04), 16-28.
25. C. Knight, J. Davidson, e S. Behrens, «Energy Options for Wireless Sensor Nodes», *Sensors*, vol. 8, n. 12, Art. n. 12, dic. 2008, doi: 10.3390/s8128037.
26. «RF Energy Harvesting for the Low Energy Internet of Things - PDF Free Download». <https://docplayer.net/3393182-Rf-energy-harvesting-for-the-low-energy-internet-of-things.html> (consultato gen. 24, 2021).
27. J. You et al., «A polymer tandem solar cell with 10.6% power conversion efficiency», *Nat. Commun.*, vol. 4, n. 1, Art. n. 1, feb. 2013, doi: 10.1038/ncomms2411.
28. Yassein, M. B.; Mardini, W.; Khalil, A., Smart homes automation using Z-wave protocol. In *2016 International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS)*, 2016; pp 1-6.

## 5 Abbreviazioni ed acronimi

BEMS - Building Energy Management System  
BACS - Building Automation and Control System  
BIM - Building Information Management  
WSN - Wireless Sensor Networks  
MEMS - Micro Electro Mechanical Systems  
MCU - Micro Controller Unit  
MPU - Micro Processor Unit  
I2C - deriva da IIC - Inter Integrated Circuit (nota: I quadro C)  
UART - Universal Asynchronous Receiver-Transmitter  
RH - Relative Humidity  
CO2 - Anidride Carbonica o Diossido di Carbonio  
VOC - Volatile Organic Compounds  
ppm - Parti per Milione  
ppb - parts per billion (parti per miliardo)  
IR - Infra Red  
DC - Direct Current - Corrente Continua  
MPPT - Maximum Power Point Tracking  
RF - Radio Frequency , Radio Frequenza  
AC - Alternated Current , Corrente Alternata  
CMOS - Complementary Metal-Oxide Semiconductor  
MOSFET - Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor  
PCE - Power Conversion Efficiency  
MOS - Metal-Oxide Semiconductor  
MPP - Maximum Power Point  
ERP - Effective Radiated Power  
MAC - Medium access control o Media Access Control  
USB - Universal Serial Bus  
IDE - Integrated Development Environment  
PCB - Printed Circuit Board

## Appendice

**Gianluca Gatto** è Professore Ordinario di Convertitori, Macchine Elettriche e Azionamenti presso il Dipartimento di Ingegneria Elettrica ed Elettronica (DIEE) dell'Università degli Studi di Cagliari. La sua attività di ricerca è focalizzata su convertitori elettronici di potenza, azionamenti elettrici, compatibilità elettromagnetica in ambito industriale e civile, pianificazione delle risorse energetiche con riferimento all'utilizzo di sistemi di accumulo per reti di distribuzione e integrazione di edifici con sensori per la misurazione di parametri di funzionamento, come il consumo di energia e le condizioni ambientali. Ricopre inoltre il ruolo di Direttore Scientifico del Laboratorio di Compatibilità Elettromagnetica, sovrintendendo al coordinamento dell'attività di ricerca teorica e sperimentale e fornendo servizi accessibili al territorio. È attualmente direttore del laboratorio interdipartimentale (dipartimenti della facoltà di Ingegneria -UNICA) "POLILAB".

Da diversi anni è coinvolto nello sviluppo di modelli matematici di convertitori elettronici di potenza, che vengono utilizzati per l'alimentazione di apparecchiature elettromedicali, al fine di minimizzare il livello di emissioni elettromagnetiche.

Negli ultimi anni ha implementato attività di ricerca e sviluppo relative alla caratterizzazione funzionale di dispositivi medici impiantabili, in particolare pacemaker e defibrillatori, anche in presenza di rumore elettromagnetico. In questo contesto, detiene due brevetti come co-inventore. Attualmente è a capo delle attività di ricerca relative ai dispositivi wide band gap (MOSFET SiC e GaN) per convertitori di elettronica di potenza ad alte prestazioni. In questo contesto, ha sviluppato diversi prototipi di convertitore di potenza bidirezionali ad alta efficienza, da utilizzarsi per la gestione dei sistemi di accumulo in ambito automotive. È stato Principal Investigator di diversi progetti di ricerca in ambito nazionale e regionali. È autore di più di 110 articoli di ricerca peer-reviewed su riviste internazionali presentati in varie conferenze nazionali e internazionali. È membro attivo della IEEE Society, con affiliazioni alla Industrial Electronic Society, alla Electromagnetic Compatibility Society e alla Power Electronic Society.

**Amit Kumar** ha conseguito il B.Sc. e M.Sc. in Fisica presso lo Sri Sathya Sai Institute of Higher Learning, Prashanti Nilayam, India rispettivamente nel 2002 e nel 2004. Ha conseguito il dottorato di ricerca in Scienze e Tecnologie della Fisica e dell'Innovazione all'Università degli Studi di Cagliari, rispettivamente nel 2010 e nel 2018. I suoi principali interessi di ricerca includono la progettazione di nuovi materiali per applicazioni optoelettroniche, dispositivi wide band gap e sistemi di accumulo di energia a batteria.

Il Dr. Kumar sta attualmente lavorando come Ricercatore presso il Dipartimento di Ingegneria Elettrica ed Elettronica (DIEE), Università degli Studi di Cagliari.

**Michele Losito** si è laureato in Ingegneria Elettronica presso l'Università degli Studi di Cagliari, ha svolto numerose collaborazioni con Università sia sotto forma di collaborazioni professionali che come borsista di ricerca per diverse tematiche: progettazione di dispositivi elettronici per il rilevamento di dati ambientali, progettazione di sensori wireless per il rilevamento di dati ambientali, dispositivi smart per illuminazione stradale, sistemi di controllo in ambiente industriale, dispositivi elettronici di potenza per la conversione statica di energia elettrica. È stato autore di pubblicazioni scientifiche nel settore dei sensori e dei dispositivi per la conversione statica di energia elettrica. Svolge attività professionale nei settori dell'impiantistica elettrica, civile, terziaria e industriale, progettazione di impianti per la produzione di energia da fonti rinnovabili, progettazione di dispositivi elettronici e consulenze ingegneristiche. Attualmente è borsista di ricerca presso l'Università degli studi di Cagliari nell'ambito della progettazione di convertitori statici per l'energia in ambiente aerospaziale.

**Andrea Vincis** si è laureato con lode presso la Facoltà di Economia dell'Università degli Studi di Cagliari. Dal 2014 al 2019 è stato titolare di diverse borse di ricerca dapprima presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Chimica e dei Materiali e successivamente presso il Dipartimento di Ingegneria Elettrica ed

Elettronica dell'Università degli Studi di Cagliari, nell'ambito di progetti di ricerca su tematiche quali la supply chain di biomasse forestali, la sensoristica e l'Energy Harvesting, la gestione di processi di depurazione delle acque reflue, lo studio di volani elettromagnetici, l'analisi di sistemi per realtà aumentata. Su tali tematiche ha svolto attività di analisi e realizzazione di modelli economici legati agli aspetti di Life Cycle Costing (LCC), Life Cycle Assessment (LCA), Analisi costi/benefici (CBA), Scouting tecnologico. Attualmente riveste il ruolo di tecnologo che svolge supporto alle attività di ricerca presso l'Università degli Studi di Cagliari.