

Ricerca di Sistema elettrico



Sviluppo di una scheda evaluation board ibrida per
l'interfacciamento di sensori e sorgenti di energia tradizionali
ed eco-sostenibili (LA3.6)

Sergio Pagano, Carlo Barone



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SALERNO



Dipartimento di
Fisica E.R. Caianiello

SVILUPPO DI UNA SCHEDA EVALUATION BOARD IBRIDA PER L'INTERFACCIAMENTO DI SENSORI E SORGENTI DI ENERGIA TRADIZIONALI ED ECO-SOSTENIBILI (LA3.6)

S. Pagano (Università di Salerno), C. Barone (Università di Salerno)

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: *Decarbonizzazione*

Progetto: *Edifici ad alta efficienza per la transizione energetica*

Linea di attività: 3.6

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work Package: Paolo Sdringola, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Università degli Studi di Salerno - Dipartimento di Fisica (UNISA_DF)

Mese inizio previsto: 13

Mese inizio effettivo: 13

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di Collaborazione "Sviluppo di una scheda evaluation board ibrida per l'interfacciamento di sensori e sorgenti di energia tradizionali ed eco-sostenibili".

Responsabile scientifico ENEA: Giovanni Landi

Responsabile scientifico Co-beneficiario: Sergio Pagano

Indice

1	Risultati attesi	4
2	Risultati ottenuti.....	5
3	Prodotti attesi	6
4	Prodotti sviluppati	7
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	8
6	Sintesi delle attività svolte	9
7	Dettaglio delle attività svolte.....	10
7.1	Sviluppo e caratterizzazione di una scheda evaluation board ibrida	10
7.1.1	Selezione dei dispositivi di energy harvesting per applicazioni indoor	10
7.1.2	Selezione e integrazione del circuito di gestione dell'energia per l'energy harvesting 10	
7.1.3	Dispositivi di Accumulo di Energia.....	11
7.1.4	Sensori a basso consumo eco-sostenibili e commerciali	11
7.1.5	Microcontrollore e modulo RF	12
7.1.6	Analisi Energetica	15
7.2	Sviluppo di un sistema di raccolta e visualizzazione dati	17
7.3	Supporto per la completa integrazione dei dispositivi	19
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	21
9	Pubblicazioni scientifiche.....	22
10	Eventi di disseminazione	24

Indice delle figure

Figura 1 - Consumo energetico associato alla trasmissione di un pacchetto da 12 byte utilizzando diverse tecnologie di trasmissione.....	13
Figura 2 - La scheda evaluation board ibrida per energy harvesting sviluppata.....	14
Figura 3 - Foto del prototipo di energy harvesting evaluation board.....	15
Figura 4 - Consumo in corrente durante un ciclo di misura di sensori.....	16
Figura 5 - Il gateway sviluppato per ricevere il messaggio spedito con tecnologia LoRa e ritrasmetterlo via WiFi ad un server remoto.....	18
Figura 6 - Quattro serie temporali delle misurazioni dei sensori, registrate su un periodo di 14 giorni e archiviata sul repository dati di thingspeak.com.....	19
Figura 7 - Foto del Workshop di Salerno del 18 ottobre 2024.....	24

Indice delle tabelle

Tabella 1 - Dettaglio variazione costi del personale.	8
Tabella 2 - Produttori e modelli di chip di energy harvesting con le relative principali prestazioni.	10
Tabella 3 - Elenco dei sensori a basso consumo utilizzati per il monitoraggio indoor. Il sensore eco-sostenibile per la temperatura è stato sviluppato da ENEA.	12
Tabella 4 - Bilancio energetico del sistema considerando l'energia in entrata dai moduli PV e quella consumata dalla scheda.....	17

1 Risultati attesi

Lista dei risultati attesi come da capitolato vigente:

- Progettazione, in collaborazione con ENEA (LA3.2), sviluppo e quindi realizzazione di due prototipi di scheda evaluation board ibrida per la misura di parametri ambientali contenente diversi sensori ambientali, di cui almeno uno eco-sostenibile a basso consumo. La scheda si alimenterà attraverso una batteria al litio e/o un supercapacitore eco-sostenibile. I dispositivi eco-sostenibili saranno fabbricati da ENEA (LA3.1 e 3.2). Un pannello solare realizzato dal co-beneficiario UNIRM2_DIE_1 (LA3.3) a tecnologia emergente, ad esempio a base di perovskite oppure a dye-sensitizer provvederà alla ricarica della batteria e/o del supercapacitore, in presenza di luce. Verrà anche inclusa la possibilità di integrare una sorgente termoelettrica realizzata dal co-beneficiario UNIRM2_DIE_2 (LA3.4), se disponibile.
- I dati raccolti verranno trasmessi ad un sistema collettore centralizzato utilizzando un protocollo e tecnologia di trasmissione a basso consumo. Tale sistema, realizzato con elettronica tradizionale, consentirà la raccolta dei dati dalle schede, relativi ai sensori e alle sorgenti di energia ad esse collegati, e la pubblicazione su un server in rete per la loro visualizzazione.

2 Risultati ottenuti

Lista dei risultati ottenuti:

- In collaborazione con ENEA (LA3.2), sono stati progettati, sviluppati e realizzati due prototipi di scheda evaluation board ibrida per la misura di parametri ambientali contenente diversi sensori ambientali, di cui uno eco-sostenibile a basso consumo realizzato da ENEA LA3.1-3.2 per la misura della temperatura. La scheda si alimenta attraverso una batteria al litio ed un supercapacitore eco-sostenibile. Un pannello solare consistente in nove moduli realizzati dal co-beneficiario UNIRM2_DIE_1(LA3.3) a base di perovskite provvede, in presenza di luce, alla ricarica della batteria e del supercapacitore. Nella scheda è inclusa la possibilità di integrare una sorgente termoelettrica esterna.
- I dati raccolti sono trasmessi ad un sistema collettore centralizzato (gateway) utilizzando un protocollo ad hoc ed una tecnologia di trasmissione a basso consumo di tipo LoRa. Tale sistema, realizzato con elettronica tradizionale, consente la raccolta dei dati dalla scheda, relativi ai sensori e alle sorgenti di energia ad esse collegati, e la pubblicazione su un server remoto (thingspeak.com) per la loro memorizzazione e visualizzazione.

Tutti i risultati attesi previsti nel capitolato sono stati raggiunti pienamente.

3 Prodotti attesi

Lista dei prodotti attesi come da capitolato vigente:

- N. 2 prototipi di evaluation board ibrida.
- Configurazione e software utilizzati per il sistema di raccolta dati.
- Report tecnico, contenente la descrizione delle attività condotte, la progettazione della scheda evaluation board ibrida e la sua caratterizzazione operativa nei vari comparti.

4 Prodotti sviluppati

Lista dei prodotti sviluppati:

- N. 2 prototipi di evaluation board ibrida.
- Configurazione e software utilizzati per il sistema di raccolta dati (lista del software implementato nel microcontrollore presente sulla scheda, lista del software implementato nel gateway).
- Report tecnico, contenente la descrizione delle attività condotte in aderenza agli obiettivi dichiarati, le linee guida di progettazione della scheda evaluation board ibrida e del gateway e la caratterizzazione dei comparti formanti la scheda nelle varie fasi operative.

Prodotti sviluppati non previsti nel capitolato:

- In riferimento alla scheda evaluation board ibrida sono resi disponibili, allegati al report tecnico: schemi elettrici della scheda, file gerber del PCB, elenco dei componenti utilizzati.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non si sono verificati scostamenti tecnici rispetto al preventivo e non sono state riscontrate criticità.

Si rileva un lieve scostamento sui costi di personale (A), dovuto agli aggiornamenti del costo orario effettivo del personale coinvolto nel corso del progetto, come mostrato in Tabella 1. Lo scostamento della voce di spesa per costi di esercizio (C) si lega ad un impegno economico leggermente inferiore rispetto a quello inizialmente preventivato. Gli scostamenti evidenziati non hanno influenzato il raggiungimento degli obiettivi e dei risultati attesi dalla LA3.6.

Tabella 1 – Dettaglio variazione costi del personale.

Cognome - Nome del personale rendicontato	Categoria di appartenenza del personale/qualifica	Sub- categoria (A1/A2)	Costo effettivo annuo lordo	Periodo	Ore lavorative dedicate alla LA	Costo orario	Costo imputato al progetto
Pagano Sergio	Professore Ordinario	A1	109.409,50	Gennaio- maggio 2023	139,00	72,94	10.138,66
Pagano Sergio	Professore Ordinario	A1	116.181,12	Giugno- dicembre 2023	170,00	77,45	13.166,50
Pagano Sergio	Professore Ordinario	A1	121.757,81	Gennaio- dicembre 2024	195,00	81,17	15.828,15
Barone Carlo	Professore Associato	A1	69.712,31	Gennaio- dicembre 2023	293,00	46,47	13.615,71
Barone Carlo	Professore Associato	A1	73.058,50	Gennaio- dicembre 2024	250,00	48,71	12.177,50

6 Sintesi delle attività svolte

L'attività svolta consiste nello sviluppo e caratterizzazione di una scheda evaluation board ibrida per la misura di parametri ambientali, nell'implementazione di un sistema per la raccolta e trasmissione dei dati ad un server remoto e nello sviluppo di circuiti specifici di interfaccia ai dispositivi biocompatibili utilizzati. La scheda contiene sensori ambientali tradizionali di luce, temperatura, umidità e CO₂, un sensore di temperatura eco-sostenibile a basso consumo sviluppato da LA3.1, si alimenta unicamente da sorgenti di energia di tipo PSC, sviluppati da LA3.3, e TEG, sviluppati da LA3.4, ed utilizza un dispositivo di accumulo di energia eco-compatibile sviluppato da LA3.2. La scheda è basata su un SoC ed un transceiver LoRA a basso consumo, oltre che da chip dedicati per l'energy harvesting. I dati acquisiti sono trasmessi ad un gateway LoRA-WiFi che li manda ad un server remoto per il loro immagazzinamento e visualizzazione.

7 Dettaglio delle attività svolte

7.1 Sviluppo e caratterizzazione di una scheda evaluation board ibrida

La progettazione e la realizzazione dei prototipi di scheda evaluation board ibrida per la misura di parametri ambientali contenente diversi sensori ambientali, di cui almeno uno eco-sostenibile a basso consumo, ha riguardato differenti attività di seguito riportate e descritte.

7.1.1 Selezione dei dispositivi di energy harvesting per applicazioni indoor

I dispositivi considerati per la loro elevata affidabilità energetica e la facilità di integrazione sono stati le celle fotovoltaiche (PV) e i generatori termoelettrici (TEG). Più nel dettaglio, sono state utilizzate moduli fotovoltaici costituiti da celle solari a perovskite (PSC), sviluppati dal cobeneficiario della LA3.3. Per quanto riguarda i TEG sviluppati dal cobeneficiario della LA3.4, le caratteristiche elettriche di tensione generata, e resistenza interna non sono risultati tali da essere integrabili con l'elettronica disponibile.

7.1.2 Selezione e integrazione del circuito di gestione dell'energia per l'energy harvesting

Sono stati considerati i migliori circuiti commerciali disponibili per la gestione dell'energia fornita dalle sorgenti di harvesting. Parametri chiave da considerare nella progettazione e nelle prestazioni dei circuiti di gestione dell'energia per l'energy harvesting includono la i requisiti di tensione e la potenza per la partenza, l'efficienza e la corrente di dispersione (Tabella 2)^{1,2}. Dopo la valutazione delle caratteristiche di diversi circuiti integrati per l'energy harvesting, è stato scelto l'AEM 10330, per i moduli PSC, e l'AEM20940, per il modulo TEG, di e-peas per l'integrazione nella scheda elettronica di test per l'energy harvesting.

Tabella 2 - Produttori e modelli di chip di energy harvesting con le relative principali prestazioni.

Produttore	Sigla	Requisiti di partenza	Efficienza	Sorgente di energia
EM Microelectronic	EM8500	300 mV – 3 μ W	> 80% $V_{in} > 1V$	Solare e Termica
e-peas S.A.	AEM10330	275 mV – 3-6 μ W	> 70% $V_{in} > 0.5V$	Solare
e-peas S.A.	AEM20940	60 μ V – 150 μ W	> 90% $V_{in} > 0.7V$	Termica
Analog Devices	LTC3108	20 mV – 3 mA	< 40%	Termica
Maxim Integrated	MAX17220	880 mV	> 90%	RF, Solare e Termica
STMicroelectronics	SPV1050	550 mV – 30 μ A	> 80%	Solare e Termica
Texas Instrument	Bq25505	600 mV	> 80% $V_{in} > 0.7V$	Solare e Termica

¹ È importante notare che minimizzare la corrente di quiescenza o dispersione è fondamentale per raccogliere energia da fonti a bassa densità di potenza, come l'energia termica. Al contrario, la regolazione della tensione e della corrente rappresenta un fattore critico per gestire le fonti di energia ad alta tensione o corrente, come quelle solari

² Kim, S.; Vyas, R.; Bito, J.; Niotaki, K.; Collado, A.; Georgiadis, A.; Tentzeris, M.M. Ambient RF Energy-Harvesting Technologies for Self-Sustainable Standalone Wireless Sensor Platforms. Proc. IEEE 2014, 102, 1649-1666, doi:10.1109/JPROC.2014.2357031.

7.1.3 Dispositivi di Accumulo di Energia

I dispositivi di accumulo di energia svolgono un ruolo cruciale nei moderni sistemi di energy harvesting, consentendo lo stoccaggio e il rilascio efficiente dell'energia raccolta per il funzionamento del prototipo di scheda elettronica sviluppata per il monitoraggio indoor. Essi supportano il funzionamento dei sensori, dell'elettronica di front-end, dell'elaborazione dei dati e della comunicazione con una stazione base. Esistono diverse tecnologie di accumulo, ciascuna con caratteristiche e vantaggi distinti. In particolare, l'attenzione può essere focalizzata su supercapacitori e batterie³.

Per ridurre l'impatto ambientale, il prototipo proposto utilizza una batteria tradizionale a ioni litio ed un supercapacitore basato su materiali provenienti da fonti rinnovabili⁴, realizzato da ENEA nella LA3.2⁵. Nella soluzione di energy harvesting sviluppata la limitata capacità di accumulo energetico dei supercapacitori a base di gel polimerico ne rende necessaria l'associazione con una piccola batteria Li-ion polimerica (3,7 V, 40 mAh, corrispondenti a 530 J di energia immagazzinabile). La batteria si attiva quando la fonte di energia da raccogliere non è disponibile o il supercapacitore è scarico, garantendo così l'energia necessaria ai circuiti di sensori, elaborazione e comunicazione.

7.1.4 Sensori a basso consumo eco-sostenibili e commerciali

Per le applicazioni di energy harvesting nel monitoraggio degli edifici indoor, la selezione dei sensori è cruciale per una raccolta efficiente dei dati e una gestione efficace dell'energia. Diversi fattori devono essere considerati quando si implementano sensori per misurare parametri come CO₂, umidità, temperatura e luce ambientale. Poiché questi sistemi sono alimentati da energia raccolta, è fondamentale scegliere sensori a basso consumo, preferibilmente dotati di modalità ultra-low-power o funzioni di sleep, per estendere la durata operativa tra un ciclo di raccolta energetica e l'altro⁶. In Tabella 3 sono riportati i sensori scelti.

³ I supercapacitori (SC) immagazzinano energia attraverso la carica elettrostatica piuttosto che mediante reazioni chimiche. Essi offrono una rapida capacità di carica e scarica, un'elevata densità di potenza e una lunga durata di ciclo, risultando ideali per applicazioni che richiedono erogazioni di energia rapide (e.g., << 1 s), tipiche dei nodi IoT. Le batterie elettrochimiche, come quelle agli ioni di litio (Li-ion), al piombo-acido e le batterie a stato solido, rappresentano i dispositivi di accumulo di energia più diffusi. Esse offrono un'elevata densità energetica, efficienza e versatilità, rendendole adatte sia per applicazioni portatili che stazionarie. I recenti progressi nel settore delle batterie mirano a migliorare la densità energetica, la durata del ciclo e la sicurezza, riducendo al contempo i costi. Tuttavia, le batterie agli ioni di litio dipendono da materiali tossici e rari, come litio, cobalto, nichel e manganese, la cui estrazione ha conseguenze ambientali significative.

⁴ Landi, G.; La Notte, L.; Palma, A.L.; Sorrentino, A.; Maglione, M.G.; Puglisi, G. A Comparative Evaluation of Sustainable Binders for Environmentally Friendly Carbon-Based Supercapacitors. *Nanomaterials* 2022, 12, 46. Landi, G.; La Notte, L.; Granata, V.; Avallone, G.; Barone, C.; Carapella, G.; Pagano, S.; Palma, A.L.; Sdringola, P.; Puglisi, G. Impact of Acetate-Based Hydrogel Electrolyte on Electrical Performance and Stability of Eco-Friendly Supercapacitors. *ChemElectroChem* 2023, 10, e202300443, doi:10.1002/celec.202300443.

⁵ Per la realizzazione del SC, sono stati considerati supercapacitori simmetrici a base di carbonio, con polimeri biodegradabili utilizzati come leganti per l'elettrodo (chitosano derivato da gusci di gamberetti) e come sistema idrogel (gelatina derivata dalla pelle bovina). Sono stati inoltre impiegati diversi tipi di elettroliti a base di gel polimerico (GPE), contenenti acetato di sodio (CH₃COONa) o NaCl come riferimento.

⁶ I sensori devono fornire dati precisi e affidabili. Ad esempio, i sensori di CO₂ devono avere un'elevata sensibilità e tempi di risposta rapidi per rilevare accuratamente le variazioni nei livelli di anidride carbonica, indicatori della qualità dell'aria e dell'efficienza della ventilazione. Analogamente, i sensori di umidità e temperatura devono offrire letture accurate delle condizioni ambientali, fondamentali per i sistemi di riscaldamento e raffrescamento degli edifici che ottimizzano il consumo energetico e garantiscono il comfort. I sensori di luce ambientale, oltre a monitorare le condizioni luminose per scopi di energy harvesting, contribuiscono anche all'ottimizzazione

Tabella 3 - Elenco dei sensori a basso consumo utilizzati per il monitoraggio indoor. Il sensore eco-sostenibile per la temperatura è stato sviluppato da ENEA.

Produttore	Sigla	Grandezza misurata	Intervallo operativo	Energia per misurazione
Gas Sensing Solutions	CozIR-Blink	CO ₂	1 – 5000 ppm	25 mJ
TE Connectivity's Measurement Specialties	HTU21D	Umidità e temperatura	0 – 100 %RH -40 – 100 °C	< 1 µJ
Texas Instruments	OPT3001	Illuminazione ambientale	0.01 – 83 klux	4.5 µJ
ENEA LA3.1	BIO-Therm	Temperatura	-10 – 40 °C	12 mJ

Per migliorare ulteriormente la sostenibilità della soluzione sviluppata, un sensore di temperatura, denominato Bio-Therm nella Tabella 3, è stato sviluppato da ENEA nella LA3.1 utilizzando un materiale idrogel composto da gelatina (derivata da pelle di suino) e grafene⁷.

7.1.5 Microcontrollore e modulo RF

Per l'applicazione prevista è stato scelto un microcontrollore a basso consumo che però garantisca la capacità di elaborazione necessaria e la disponibilità di librerie software per interfacciare i sensori utilizzati. È stato scelto il modello ESP32-S3, prodotto da Espressif Systems, per la sua ampia memoria, il supporto integrato per Wi-Fi e BLE, il grande numero di pin GPIO che possono svolgere una vasta gamma di funzioni (SPI, I2S, I2C, PWM, ADC, UART, ecc.), e la facilità di programmazione.

Per il sistema di monitoraggio indoor proposto, è stata posta particolare attenzione alla selezione di transceiver a basso consumo energetico e compatibili con protocolli di comunicazione efficienti⁸. I principali protocolli considerati per la comunicazione wireless includono Wi-Fi, Bluetooth Low Energy (BLE), LoRaWAN e Zigbee. Ogni protocollo presenta vantaggi e svantaggi in termini di consumo energetico, portata, velocità di trasmissione e complessità di implementazione (Figura 1).

In considerazione dei consumi energetici e della portata di trasmissione, è stato selezionato la tecnologia LoRa per l'implementazione del progetto. Pertanto, è stato utilizzato un modulo

dell'illuminazione artificiale, favorendo il risparmio energetico. Questi sensori formano collettivamente un sistema di monitoraggio ambientale efficiente che supporta una gestione energetica sostenibile, consentendo regolazioni in tempo reale in base alle condizioni ambientali e migliorando l'efficienza energetica, riducendo l'impronta di carbonio negli edifici intelligenti e in altre applicazioni.

⁷ Landi, G.; Granata, V.; Germano, R.; Pagano, S.; Barone, C. Low-Power and Eco-Friendly Temperature Sensor Based on Gelatin Nanocomposite. *Nanomaterials* 2022, 12, 2227, doi:10.3390/nano12132227.

⁸ La trasmissione di dati rappresenta una delle operazioni più dispendiose in termini di energia in un nodo wireless; pertanto, l'ottimizzazione delle comunicazioni è fondamentale per garantire la sostenibilità energetica complessiva del sistema.

integrato prodotto da Heltec automation composto da un chip Espressif ESP32-S3 e da un transceiver Semtech LoRa SX1262⁹.

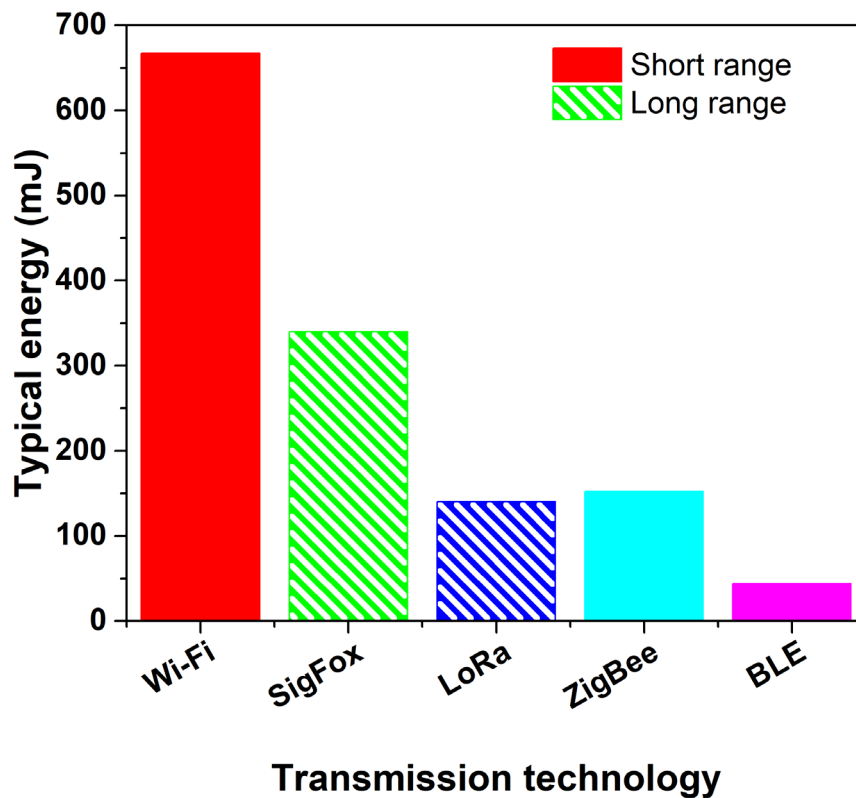


Figura 1 - Consumo energetico associato alla trasmissione di un pacchetto da 12 byte utilizzando diverse tecnologie di trasmissione.

⁹ Per ridurre il consumo energetico associato alla trasmissione dei dati, il sistema implementa una strategia di comunicazione intermittente, in cui il transceiver radio è attivato solo durante le finestre di trasmissione predefinite. Durante i periodi di inattività, il transceiver entra in modalità deep-sleep, riducendo significativamente il consumo di potenza. La configurazione del transceiver prevede inoltre la regolazione dinamica della potenza di trasmissione in base alla qualità del segnale ricevuto, garantendo una comunicazione affidabile con il minimo consumo energetico necessario. Questa strategia è particolarmente utile in ambienti indoor, dove le condizioni di propagazione del segnale possono variare notevolmente.

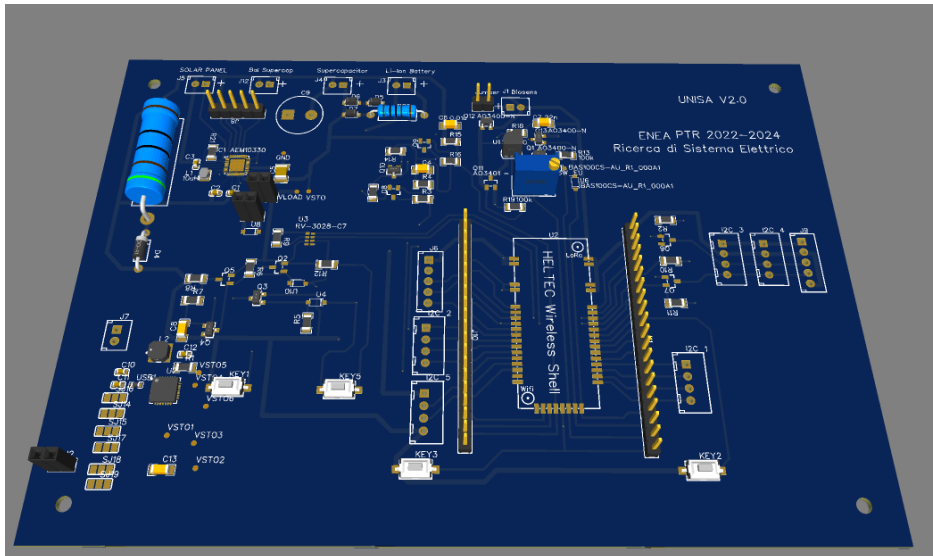


Figura 2 - La scheda evaluation board ibrida per energy harvesting sviluppata.

La scheda elettronica di test sviluppata è mostrata in Figura 2. La scheda impiega un'unità di elaborazione basata sul System on a Chip (SoC) ESP32-S3FN8 di Espressif¹⁰.

Il SoC è collegato, tramite l'interfaccia SPI, a un transceiver SX1262 di Semtech¹¹. Il SoC è inoltre collegato, tramite l'interfaccia I2C, ai sensori ambientali per la misurazione dell'illuminazione (il sensore OPT3001), della temperatura e dell'umidità (il sensore HTU21D) e del livello di CO₂ (modulo Cozir Blink). Per la lettura del sensore Bio-Therm è stato sviluppato un circuito di polarizzazione specifico¹².

La tensione di alimentazione per il funzionamento del SoC, del transceiver e dei sensori è fornita dal chip di energy harvesting (E-peas AEM30110), che raccoglie energia dalle celle fotovoltaiche (in questo caso nove PSC), la accumula in un supercondensatore supportato da una batteria Li-Ion e genera una tensione stabile di 3,3 V in uscita¹³. Un ulteriore chip di energy harvesting (E-peas AEM20940), specializzato per sorgenti TEG è presente nel circuito e, se è

¹⁰ L'ESP32-S3 è dotato di 512 KB di SRAM, 384 kB di ROM, 16 KB di RTC SRAM e 8 MB di Flash RAM, funzionante a una tensione di 3,3 V e con una frequenza di clock fino a 240 MHz. Per ridurre il consumo energetico e il picco di corrente, il SoC è stato configurato per operare a una frequenza di 20 MHz.

¹¹ L'SX1262 è capace di trasmettere potenza fino a 22 dBm nella banda libera di 868 MHz consentita in Europa e con una sensibilità del ricevitore di -117 dBm (utilizzando una larghezza di banda di 500 KHz e un fattore di spreading di 7). Il budget di potenza complessivo del transceiver, pari a circa 140 dB, lo rende ideale per la trasmissione di dati a bassa potenza con numerosi ostacoli alla propagazione delle onde elettromagnetiche.

¹² Il circuito è in grado di alternare tra un cortocircuito dei terminali del sensore e una polarizzazione a corrente costante. Il circuito è controllato da due pin GPIO del SoC e la tensione ai capi del sensore Bio-Therm è misurata da un altro pin GPIO, utilizzando l'ADC interno del SoC.

¹³ Il chip di energy harvesting è impostato per operare al 90% della tensione a circuito aperto delle celle e la tensione sull'elemento di accumulo (supercondensatore) può variare tra 2 e 4,5 V, mantenendo una tensione di uscita stabile di 3,3 V per alimentare la scheda. Se la tensione sul supercondensatore scende al di sotto di 2 V, la scheda viene spenta. Al di sotto di 1,45 V, il chip di energy harvesting entra in stato di shutdown, interrompendo l'assorbimento di corrente. La batteria Li-Ion aggiuntiva è collegata al supercondensatore tramite un semplice circuito che ricarica la batteria quando la tensione del supercondensatore è superiore a quella della batteria di 0,6 V e, invece, trasferisce carica dalla batteria al supercondensatore quando la tensione del supercondensatore è inferiore a quella della batteria di 1,2 V.

i sensori e i dati inviati al gateway¹⁵. La potenza di uscita è impostata al valore minimo (-9 dBm), che nel nostro caso consente una portata di trasmissione di circa 10 metri in aria libera¹⁶.

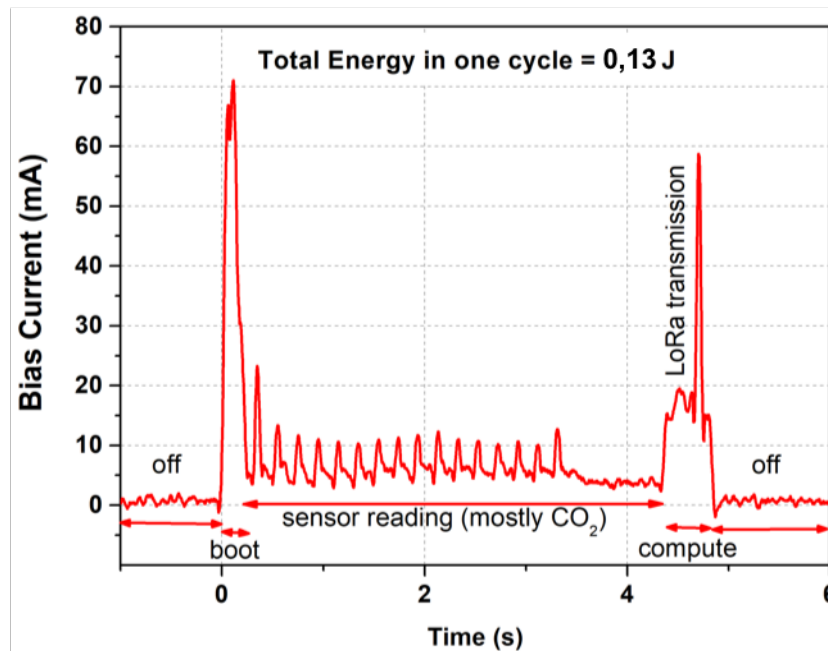


Figura 4 - Consumo in corrente durante un ciclo di misura di sensori

Dopo tutte le fasi discusse, il chip timer viene programmato per il successivo risveglio e la scheda viene spenta, portando il consumo di corrente a un valore trascurabile.

Considerando il profilo complessivo del consumo di corrente, è possibile stimare il costo energetico di una misurazione periodica, pari a 0,20 J in assenza di luce e a 0,76 J in presenza di luce, la differenza è dovuta al consumo per attivare il display e-paper. Per valutare se tale costo sia sostenibile per il sistema, è necessario considerare il flusso energetico complessivo giornaliero atteso.

La Tabella 4 riporta il flusso energetico, permettendo una valutazione della generazione e del consumo di energia, fornendo informazioni sull'affidabilità della scheda elettronica di test come soluzione per applicazioni di monitoraggio indoor sostenibili. Considerando celle solari perovskite (450 cm² di area), ottimizzate per l'illuminazione indoor (10 μW/cm² di densità di potenza a circa 200 lux di illuminazione), funzionanti per almeno 8 ore al giorno, l'energia prodotta dai PV è pari a 130 J/giorno che si riducono a 83 J/giorno, tenendo conto

¹⁵ È possibile distinguere diverse fasi, evidenziate dalle doppie frecce nella figura. La fase "off" corrisponde allo stato spento della scheda, con un consumo complessivo inferiore a 100 nA. La fase "boot" rappresenta la sequenza di avvio del SoC con una durata di circa 150 ms e un elevato consumo di corrente. La fase di "lettura dei sensori" ha una durata di circa 4 secondi (determinata dal sensore Cozir Blink) durante la quale il SoC è in modalità sleep e consuma pochi mA. Alla fine di questo periodo, si verifica la fase di "computazione" in cui vengono letti gli altri sensori, così come le tensioni del supercondensatore e della batteria. Inoltre, in questa fase tutti i dati vengono preparati e inviati al chip transceiver che li trasmette al gateway. Il tempo di trasmissione è visibile come un piccolo pronunciato nel consumo di corrente, con una durata inferiore a 100 ms.

¹⁶ Il chip può fornire fino a 31 dB in più di potenza, consentendo, in linea di principio e se necessario, di raggiungere distanze molto maggiori a scapito di un consumo energetico più elevato. Dato il tempo di trasmissione riportato, la differenza tra potenza minima e massima comporta circa 27 mJ in più di consumo energetico medio per ciclo di misura.

dell'efficienza di accumulo dell'80% e dell'efficienza di conversione dell'80%. L'energia accumulata è poi resa disponibile alla porta di carico con una tensione di 3,3 V per il funzionamento della scheda.

Considerando il consumo energetico discusso sopra, assumendo una durata del ciclo di 10 minuti e una durata media di illuminazione giornaliera di 10 ore, si ha un consumo energetico complessivo giornaliero di circa 62,4 J. Questo fornisce un bilancio positivo di 20,8 J/giorno. Tale eccedenza viene utilizzata per ricaricare i dispositivi di accumulo, identificati in 4 supercondensatori eco-sostenibili a 5 V (2,5 J di energia disponibile) e in una batteria Li-ion polimerica a 3,7 V (530 J di energia disponibile). In questo modo la scheda elettronica può operare a lungo termine in modo continuo e affidabile, anche durante la notte o in periodi prolungati senza illuminazione indoor (ad esempio, durante i fine settimana).

Tabella 4 - Bilancio energetico del sistema considerando l'energia in entrata dai moduli PV e quella consumata dalla scheda.

PV energia in entrata			Energia in uscita		
Illuminazione ambiente	220	lux	Consumo per ciclo in presenza di luce	0.76	J
Densità di potenza generata	10	$\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Consumo totale di giorno	45,6	J
Area totale 9 moduli	450	cm^2	Consumo per ciclo in assenza di luce	0.20	J
Potenza totale generata	4,5	mW	Consumo totale di notte	16.8	J
Ore luce	8	hours	Consumo totale giornaliero	62,4	J
Energia totale generata	130	J	Bilancio energetico entrata uscita	20,8	J
Efficienza immagazzinamento	80	%			
Efficienza di conversione	80	%			
Energia totale disponibile	83,2	J			

7.2 Sviluppo di un sistema di raccolta e visualizzazione dati

La raccolta, immagazzinamento e visualizzazione dati si basa sulla seguente metodologia. I dati acquisiti dalla scheda evaluation board sono trasmessi con tecnologia LoRa ad un

gateway, mostrato in Figura 5, che li raccoglie in modo asincrono e li ritrasmette, attraverso la rete WiFi, ad un server remoto che li immagazzina e ne permette la visualizzazione¹⁷.



Figura 5 - Il gateway sviluppato per ricevere il messaggio spedito con tecnologia LoRa e ritrasmetterlo via WiFi ad un server remoto

Al fine di mantenere il payload il più corto possibile, è stato utilizzato un protocollo LoRa semplificato, che consiste in un ID univoco del nodo trasmittente seguito dai dati dei sensori e dallo stato del sistema. Il gateway verifica che il messaggio provenga effettivamente dal nodo controllando il numero ID, rifiuta i messaggi indesiderati, analizza i dati e li invia a un server di repository tramite la connessione Wi-Fi. Sebbene esistano modi per migliorare l'affidabilità e la sicurezza della trasmissione, è stato scelto il protocollo più semplice per dimostrare la fattibilità del concetto.

Come server remoto per l'immagazzinamento e la visualizzazione dei dati è stato utilizzato il portale thingspeak.com¹⁸, che mette a disposizione in modo gratuito tali servizi. La Figura 6 mostra un esempio di serie temporale dei dati dei sensori per una durata di 14 giorni. I dati sono stati acquisiti e trasferiti dal transceiver LoRa a un gateway Wi-Fi e da qui a un repository server¹⁸.

¹⁷ Il sistema LoRa, con il suo elevato budget di trasmissione, permette di posizionare il gateway a distanze di qualche decina di metri dalla scheda, in modo da essere compatibili con l'utilizzo ipotizzato negli ambienti interni.

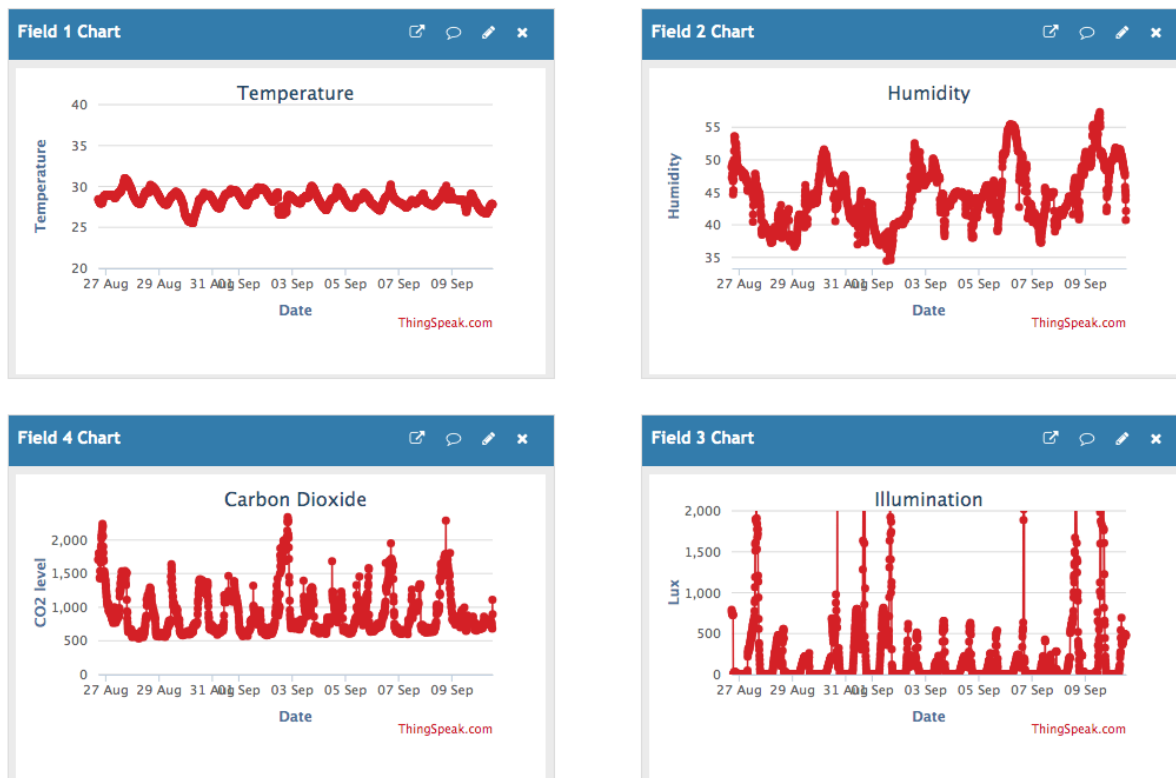


Figura 6 - Quattro serie temporali delle misurazioni dei sensori, registrate su un periodo di 14 giorni e archiviate sul repository dati di thingspeak.com¹⁸.

7.3 Supporto per la completa integrazione dei dispositivi

Nel corso dello sviluppo della scheda sono stati ottimizzati l'interfacciamento dei dispositivi eco-compatibili sviluppati da ENEA nelle LA3.1 e LA3.2.

Sono stati sviluppati circuiti di interfaccia tra il supercondensatore eco-sostenibile, i chip di energy harvesting e la batteria a ioni litio. La logica di gestione del comparto di energia consente, durante il funzionamento ed in presenza di un'illuminazione indoor maggiore di 200 lux, al supercondensatore carico a 4,5 V di alimentare tutta l'elettronica e consente la trasmissione dei dati. La batteria ed il supercondensatore sono connessi attraverso un circuito che garantisce la ricarica prioritaria del supercondensatore e l'utilizzo dell'energia in eccesso per ricaricare la batteria. In assenza di luce l'energia viene prelevata dal supercondensatore, il quale ad ogni ciclo di misura tenderà a scaricarsi. Quando viene raggiunto il valore limite di circa 2,6 V, interviene la batteria a mantenere la tensione a questo valore. In questa fase, la scheda viene alimentata dalla batteria a ioni di litio che fornisce tutta l'energia necessaria per continuare i cicli di misura fino al ritorno dell'illuminazione. È bene precisare che, con illuminazione sotto i 200 lux, la logica di controllo mette il sistema in modalità a basso consumo energetico, disabilitando la scrittura su e-paper.

Per il sensore di temperatura elettrochimico sviluppato, è necessario un circuito di pilotaggio speciale per ridurre la deriva di tensione e compensare il segnale di uscita in tensione. Il circuito progettato consente una misura ogni 10 minuti, che consiste in un periodo di inattività di 6 minuti durante il quale il dispositivo è cortocircuitato elettricamente e un periodo di rilevamento di 4 minuti durante il quale il dispositivo è polarizzato con una corrente costante

¹⁸ Dati ad accesso pubblico su <https://thingspeak.mathworks.com/channels/2571201>

di 15 μA . Questo approccio contribuisce a mantenere l'accuratezza e l'affidabilità delle letture del sensore, minimizzando al contempo il consumo energetico⁷.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

All'interno della LA3.6 il capitolato di progetto non prevede consulenze, né sono state utilizzate nel corso dello svolgimento della LA.

9 Pubblicazioni scientifiche

Elenco delle pubblicazioni scientifiche risultanti dall'attività svolta nella LA3.6:

- G. Landi, G. Avallone, C. Barone, and S. Pagano, "Design of Environmental Sensor Board for Energy Harvesting: Integration of Conventional and Eco-Friendly Sensors with Power Generation Sources," *Electronics* 13(19), 3801 (2024). DOI: 10.3390/electronics13193801
- G. Avallone, G. Landi, V. Granata, L. La Notte, A.L. Palma, P. Sdringola, G. Puglisi, S. Pagano, and C. Barone, "A comparative evaluation of IoT electronic solutions for energy harvesting," *Nano Express* 5(3), 032001(2024). DOI: 10.1088/2632-959X/ad7a90.
- G. Avallone, G. Landi, V. Granata, L. La Notte, A.L. Palma, P. Sdringola, G. Carapella, G. Puglisi, S. Pagano, and C. Barone, "Electrochemical Properties of Sustainable Nanomaterial-Based Supercapacitors," in *2023 IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference (NMDC)*, (IEEE, 2023), pp. 872–876. DOI: 10.1109/NMDC57951.2023.10343957.
- Granata V., Landi G., Barone C., Avallone G., La Notte L., Palma A.L., Sdringola P., Carapella G., Puglisi G., Pagano S., "Eco-friendly carbon-based supercapacitors: Electrochemical properties and charge storage mechanisms", *Il Nuovo Cimento*, 47, 2024. DOI: 10.1393/ncc/i2024-24294-5.

Elenco delle pubblicazioni scientifiche risultanti dall'attività svolta in collaborazione con ENEA nella LA3.2:

- G. Landi, C. Barone, L. La Notte, G. Avallone, V. Granata, G. Carapella, A. L. Palma, P. Sdringola, G. Puglisi, S. Pagano, "Temperature-dependent performance of sustainable supercapacitors with hydrogel electrolyte", *Nano Express*. Redazione Ottobre 2024, sottomissione gennaio 2025, under review.
- G. Landi, C. Barone, S. Pagano, V. Granata, G. Avallone, L. La Notte, A.L. Palma, P. Sdringola, and G. Puglisi, "Evaluation of Long-Term Stability and Performances of Eco-Friendly and Low-Power Temperature Sensor Based on Hydrogel Nanocomposite", In: Conoci, S., Di Natale, C., Prodi, L., Valenti, G. (eds) *Sensors and Microsystems. AISEM 2024. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 1334. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-82076-2_17.
- G. Landi, S. Pagano, V. Granata, G. Avallone, L. La Notte, A.L. Palma, P. Sdringola, G. Puglisi, and C. Barone, "Regeneration and Long-Term Stability of a Low-Power Eco-Friendly Temperature Sensor Based on a Hydrogel Nanocomposite," *Nanomaterials* 14(3), 283 (2024). DOI: 10.3390/nano14030283.
- L. La Notte, G. Landi, A.L. Palma, P. Sdringola, G. Avallone, C. Barone, and S. Pagano, "Designing a Platform for Energy Recovery and Monitoring in Building Applications," in *2024 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2024 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, (IEEE, 2024), pp. 1–4. DOI: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope61470.2024.10751426.

- G. Landi, L. La Notte, and A.L. Palma, "Towards Environmentally Friendly Solution-Processed Hybrid Photovoltaics," in *Encyclopedia of Renewable Energy, Sustainability and the Environment*, (Elsevier, 2024), pp. 479–494. DOI: 10.1016/b978-0-323-93940-9.00139-0.
- G. Landi, C. Barone, V. Granata, G. Avallone, C. Mauro, S. Pagano, L. La Notte, A.L. Palma, P. Sdringola, and G. Puglisi, "Development of Low-Power and Environmentally Friendly Temperature Sensor Based on Gelatin-Graphene Nanocomposite," in *2023 IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference (NMDC)*, (IEEE, 2023), pp. 545–549. DOI: 10.1109/NMDC57951.2023.10343998.

10 Eventi di disseminazione

Elenco degli eventi di disseminazione risultanti dall'attività svolta nella LA3.6:

- Convegno conclusivo del Progetto 1.5 del Piano Triennale di realizzazione 2022-2024 della Ricerca di Sistema elettrico nazionale (RdS) - Edifici ad alta efficienza per la transizione energetica - Risultanze dei WP3 e WP4, 27 novembre 2024, Roma. **Sviluppo di una scheda evaluation board ibrida per l'interfacciamento di sensori e sorgenti di energia tradizionali ed eco-sostenibili, presentazione orale** (S. Pagano).
- Partecipazione all'evento 38° edizione Futuro Remoto: Un viaggio tra scienza e fantascienza, "Sviluppo di una evaluation board ibrida per l'interfacciamento di sensori e sorgenti di energia tradizionali ed eco-sostenibili". Università di Salerno, 8 novembre 2024.
- Workshop on technologies and innovative solutions for energy efficiency. Università di Salerno, 18 ottobre 2024. Evento di disseminazione organizzato dal gruppo di Lavoro della LA3.6 (UNISA_DF). URL: <https://conferences.phys.unisa.it/tisee24/>



Figura 7 - Foto del Workshop di Salerno del 18 ottobre 2024.

- NIS Colloquium Innovative solutions for energy recovery and storage, and buildings monitoring, Università di Torino, 23 febbraio 2024, **Electronics for energy harvesting, presentazione orale** (G. Avallone).
- Nanotechnology Materials and Devices Conference (NMDC'24), 22-24 ottobre 2023 Paestum (SA). **Electrochemical Properties of Sustainable Nanomaterial-Based Supercapacitors**, G. Avallone, G. Landi, V. Granata, L. La Notte, A.L. Palma, P. Sdringola, G. Carapella, G. Puglisi, S. Pagano, and C. Barone. **Presentazione Orale** (G. Avallone).
- Congresso Nazionale SIF 2023, 11-15 settembre 2023, Fisciano (SA). **Eco-friendly carbon-based supercapacitors: Electrochemical properties and charge storage mechanisms**, Granata V., Landi G., Barone C., Avallone G., La Notte L., Palma A.L., Sdringola P., Carapella G., Puglisi G., Pagano S. **Presentazione Orale** (Granata V.).

In riferimento alle soluzioni innovative per il recupero e l'accumulo di energia e per il monitoraggio degli edifici, sono state inoltre organizzate le seguenti riunioni di coordinamento tra i gruppi di lavoro delle LA da 3.1 a 3.6:

- Kick-off meeting, Roma, sede ENEA, 4 aprile 2023
- Torino, sede UNITO_CHIMICA, 22 febbraio 2024
- Roma, sede UNIRM2_DIE_1 e UNIRM2_DIE_2, 16 luglio 2024
- Fisciano (SA), sede UNISA_DF, 17 ottobre 2024

Le suddette sono state organizzate congiuntamente ad alcuni degli eventi di disseminazione sopra descritti.

Elenco degli eventi di disseminazione risultanti dall'attività svolta in collaborazione con ENEA LA3.2:

- Convegno conclusivo del Progetto 1.5 del Piano Triennale di realizzazione 2022-2024 della Ricerca di Sistema elettrico nazionale (RdS) - Edifici ad alta efficienza per la transizione energetica - Risultanze dei WP3 e WP4, "Studio e applicazione di soluzioni innovative per il recupero e l'accumulo di energia e per il monitoraggio degli edifici" mercoledì 27 novembre 2024. **Presentazione orale** (G.Landi, A.L. Palma, L.La Notte).
- 24th International Conference on Environment and Electrical Engineering (IEEE-EEEIC), 17- 20 Giugno 2024, Roma Italia. **Designing a platform for energy recovery and monitoring in building applications**, L. La Notte, G. Landi, A.L. Palma, P. Sdringola, A. Reale, L. Vesce, C. Barolo, G. Avallone, C. Barone, S. Pagano. **Presentazione orale** (L. La Notte).
- XXII Conferenza Nazionale Sensori e Microsistemi (AISEM 2024),7-9 febbraio 2024, Bologna, Italia. Evaluation of long-term stability and performances of eco-friendly and low-power temperature sensor based on hydrogel nanocomposite. G. Landi, C. Barone, S. Pagano, V. Granata, G. Avallone, L. La Notte, A. L. Palma, P. Sdringola, G. Puglisi. **Presentazione Orale** (G. Landi).
- Seconda Conferenza della Rete Italiana Fotovoltaico per la Ricerca e l'Innovazione (11 - 12 giugno 2024 Bolzano - NOI Techpark / Eurac Research), **Solar-Powered IoT Solutions for Indoor Monitoring**, G. Landi, C Barone, S, Pagano, V. Granata, G. Avallone, L. La Notte, A. L. Palma, P. Sdringola, G. Puglisi. **Presentazione poster** (G. Landi).
- Nanotechnology Materials and Devices Conference (NMDC'24),22-24 ottobre 2023, Paestum, Italia. **Development of Low-Power and Environmentally Friendly Temperature Sensor Based on Gelatin-Graphene Nanocomposite**. G. Landi, C. Barone, V. Granata, G. Avallone, C. Mauro, S. Pagano, L. La Notte, A.L. Palma, P. Sdringola, and G. Puglisi. **Presentazione Orale** (G. Landi - Invited).