

Ricerca di Sistema elettrico



Applicazione di soluzioni innovative per il recupero e l'accumulo di energia e per il monitoraggio degli edifici (LA3.2)

Giovanni Landi, Luca La Notte, Alessandro Lorenzo Palma, Paolo Sdringola

APPLICAZIONE DI SOLUZIONI INNOVATIVE PER IL RECUPERO E L'ACCUMULO DI ENERGIA E PER IL MONITORAGGIO DEGLI EDIFICI (LA3.2)

Giovanni Landi, Luca La Notte, Alessandro Lorenzo Palma, Paolo Sdringola (ENEA)

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: 3.2

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work Package: Paolo Sdringola, ENEA

Responsabile Linea di Attività: ENEA

Mese inizio previsto: 19

Mese inizio effettivo: 19

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

Indice

1	Risultati attesi	4
2	Risultati ottenuti	5
3	Prodotti attesi	8
4	Prodotti sviluppati	9
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	10
6	Sintesi delle attività svolte	11
7	Dettaglio delle attività svolte.....	12
7.1	Fotovoltaico e termoelettrico	12
7.2	Caratterizzazione dei dispositivi provenienti dai co-beneficiari	13
7.3	Sviluppo di un supercapacitore a 5V ad alte prestazioni eco-sostenibile	13
7.3.1	Prestazioni dei supercapacitori eco-sostenibili con elettrolita in idrogel in funzione della temperatura	15
7.4	Rigenerazione e stabilità a lungo termine del sensore di temperatura eco-sostenibile	16
7.5	Schede per il monitoraggio ambientale	20
7.5.1	Prototipo di scheda ibrida a recupero energetico	20
7.5.2	Scheda commerciale alimentata da rete elettrica	23
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	25
9	Pubblicazioni scientifiche.....	26
10	Eventi di disseminazione	28

Indice delle figure

Figura 1 - Caratterizzazione tensione-corrente dei moduli consegnati dal co-beneficiario UNIRM2_DIE_1(LA3.3).....	13
Figura 2 - (a) Curva di voltammetria ciclica dei supercapacitori simmetrici e (b) valori di capacità in funzione del scan rate.	14
Figura 3 - (a) Curve di ciclovoltammetria del supercapacitore a 5 V a diverse tensioni. (b) Fotografia e schema di interconnessione in serie di quattro dispositivi. (c) Confronto degli spettri di impedenza e (d) delle prestazioni energetiche in funzione del numero di dispositivi interconnessi.....	14
Figura 4 - (a) Andamento della capacità e (b) variazione degli spettri di impedenza in funzione della temperatura per il supercapacitore (1x) eco-sostenibile.....	15
Figura 5 - Confronto delle caratteristiche corrente-tensione dei sensori di temperatura nel suo stato iniziale ed invecchiato.	16
Figura 6 - Confronto della tensione V_{sat} del sensore al termine del periodo di sensing nei suoi stati iniziale e invecchiato, in funzione della temperatura, con relativi adattamenti lineari.....	17
Figura 7 - Confronto dei profili di tensione in temperatura del dispositivo (a) nuovo ed (b) invecchiato dopo 2 anni.	18
Figura 8 - (a) Foto del sensore ecosostenibile a 297 K prima dell'idratazione, effettuata con alcune gocce d'acqua sul bordo. (b)Variazione della resistenza durante l'idratazione del sensore di temperatura invecchiato. (c) Caratteristiche corrente-tensione del sensore nelle condizioni iniziale, invecchiata e rigenerata.	19
Figura 9 - Schema dei principali componenti del prototipo di scheda ibrida a recupero energetico sviluppata.	21
Figura 10 - Andamento temporale dei parametri misurati dalla scheda a recupero energetico in un ufficio nel mese di dicembre 2024..	22
Figura 11 - Andamento temporale di alcuni parametri misurati dalla scheda commerciale in un appartamento nel mese di dicembre 2024.....	23
Figura 12 - Andamento temporale dell'assorbimento di potenza della scheda commerciale per un ciclo di misura.	24
Figura 13 - Fotografie delle tre riunioni di progetto con i co-beneficiari sia sulla parte tecnica delle linee di attività che su quella gestionale.	30

1 Risultati attesi

Lista dei risultati attesi come da capitolato vigente:

- Dimensionamento dei moduli fotovoltaici DSSC e PSC utile per l'integrazione indoor, anche in conformità ai requisiti minimi in input alle schede elettroniche afferenti al sistema di recupero e accumulo energetico, in collaborazione con il co-beneficiario UNIRM2_DIE_1 (LA3.3), che realizzerà l'ottimizzazione e lo scaling-up delle tecnologie DSSC e PSC e fornirà i relativi moduli fotovoltaici.
- Dimensionamento dei moduli termoelettrici utile per l'integrazione nel comparto di recupero energetico in collaborazione con il co-beneficiario UNIRM2_DIE_2 (LA3.4), che realizzerà lo scaling-up della tecnologia e fornirà i moduli termoelettrici.
- Ottimizzazione del prototipo di accumulo eco-sostenibile ad alte prestazioni energetiche: miglioramento layout di interconnessione ed impiego di materiali più performanti.
- Fabbricazione di almeno un prototipo di sensore autonomo o a basso consumo eco-sostenibile per il monitoraggio ambientale, studio e modellizzazione della dipendenza dai parametri ambientali delle proprietà elettrochimiche ed elettriche e valutazione ed ottimizzazione delle prestazioni (sensibilità, tempo di risposta, linearità e consumi energetici).
- Progettazione dei circuiti di pilotaggio dei sensori a basso consumo energetico, dei circuiti di carica/scarica dei supercapacitori ad alte prestazioni e dei circuiti di interfaccia dei dispositivi a recupero energetico in collaborazione con il co-beneficiario UNISA_DF (LA3.6).
- Progettazione di un prototipo di scheda ibrida a recupero energetico che integra almeno un sensore tra quelli fabbricati, almeno una tecnologia di harvesting ed un elemento di accumulo eco-sostenibile in collaborazione con il co-beneficiario UNISA_DF (LA3.6), che fornirà la scheda ibrida.
- Caratterizzazione dei dispositivi provenienti dai co-beneficiari e prime prove di funzionamento.
- Completamento del sistema di misura custom per la caratterizzazione del sistema integrato per il recupero e l'accumulo di energia e per il monitoraggio degli edifici, progettato nella precedente LA3.1.
- Analisi sperimentale con l'intero sistema per il recupero e l'accumulo di energia e per il monitoraggio degli edifici. Alcuni dei dispositivi finali, principalmente i sensori, potranno essere caratterizzati sia in ambiente controllato all'interno della camera climatica predisposta nella precedente LA3.1, sia per misurare le grandezze sensibili presenti in un ambiente operativo. Le condizioni ambientali standard dei dispositivi di harvesting saranno garantite dal sistema di misura integrato.
- Analisi comparativa tra le prestazioni del sistema integrato sviluppato e di una soluzione che comprenda eventuali dispositivi commerciali disponibili.

2 Risultati ottenuti

Lista dei risultati ottenuti:

- **Dimensionamento dei moduli fotovoltaici**

Dalla collaborazione con il co-beneficiario UNIRM2_DIE_1 (LA3.3), è emerso che la tecnologia PSC fosse la più promettente per gli scopi della presente LA, avendo dimostrato prestazioni effettive in condizioni di illuminazione indoor, su piccola area (0.5 cm^2), nettamente superiori rispetto alla tecnologia DSSC. Pertanto, in conformità ai requisiti minimi in input alle schede elettroniche sviluppate in collaborazione con il co-beneficiario UNISA_DF (LA3.6), afferenti al sistema di recupero e accumulo energetico, è stata stabilita la necessità di avere un comparto fotovoltaico PSC dotato di una superficie pari a circa 450 cm^2 , ottimizzate per l'illuminazione indoor ($10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ di densità di potenza a 200 lux di illuminazione). Sulla base di tale dimensionamento, il co-beneficiario UNIRM2_DIE_1 (LA3.3) ha realizzato l'ottimizzazione e lo scaling-up della tecnologia PSC selezionata e ha fornito i relativi moduli fotovoltaici.

- **Dimensionamento dei moduli termoelettrici**

In collaborazione con il co-beneficiario UNIRM2_DIE_2 (LA3.4), si sono individuati i layout del prototipo di modulo termoelettrico (TEG). Si è optato per dimostrare la fattibilità di un modulo i) in configurazione planare p-n, utilizzando i polimeri p-type (Poly[Kx(Cu(I)ett)]) e n-type (Poly[Kx(Niett)]) forniti da UNITO_CHIMICA (LA3.5), ii) in configurazione 3D (pellet) col solo polimero n-type, iii) in configurazione 3D (pellet) col composito grafene-P3HT. Nei primi due casi, si è ottenuto un corretto funzionamento generando parametri vicini alla somma algebrica di quelli del singolo dispositivo. Sono stati considerati anche moduli termoelettrogalvanici (TEGG), per cui si è selezionata un'architettura monotipo, di tipo W, con interconnessione serie di 3 elementi TEGG. Il coefficiente Seebeck del modulo presenta valori nel range 1800-2000 $\mu\text{V}/\text{K}$, pari ad una tensione di circa 8 mV, per un salto termico pari a 5°C . Per tutte le tipologie, non si è ancora implementato il numero di elementi sufficienti per raggiungere le tensioni compatibili con le caratteristiche d'ingresso del circuito integrato AEM20940 della e-peas, individuato per interfacciare i moduli termoelettrici con la scheda evaluation board ibrida sviluppata da UNISA_DF (LA3.6).

- **Supercapacitori eco-sostenibili ad alte prestazioni**

Sono stati sviluppati supercapacitori eco-sostenibili ad alte prestazioni in configurazione singola (1x), utilizzando acetato di sodio, idrogel e chitosano. Per ottenere un dispositivo operante a 5 V, quattro unità (4x) sono state collegate in serie, garantendo un funzionamento sicuro con una tensione massima di 1.25 V per unità, al di sotto della soglia di decomposizione dell'acqua. Il prototipo risultante presenta una capacità di $\sim 0.3 \text{ F}$, una resistenza serie di 6.2Ω , una densità di energia di $18.4 \text{ Wh}/\text{kg}$ e una densità di potenza di $2040 \text{ W}/\text{kg}$. Inoltre, è stata valutata la stabilità in temperatura dei supercapacitori nell'intervallo $277 \text{ K} - 313 \text{ K}$.

- **Sensore eco-sostenibile a basso consumo energetico**

È stato affrontato lo studio e la modellazione della dipendenza dai parametri ambientali delle proprietà elettrochimiche ed elettriche, nonché la valutazione e l'ottimizzazione delle prestazioni (sensibilità, tempo di risposta, linearità e consumi energetici) del sensore di temperatura sviluppato nella LA3.1. Nel dettaglio, è stata studiata la stabilità a lungo termine del sensore di temperatura eco-sostenibile sviluppato basato su un nanocomposito di gelatina,

grafene e glicerolo, caratterizzato da basso consumo energetico e capacità di rigenerazione. Dopo due anni di utilizzo, il dispositivo mantiene una sensibilità in temperatura stabile e la capacità di rilevare la formazione di ghiaccio a 260 K, sebbene l'invecchiamento provochi un aumento della resistenza elettrica a causa della disidratazione del gel. L'assorbimento controllato di acqua consente di rigenerare il sensore, ripristinandone la conducibilità elettrica e migliorandone le prestazioni elettriche. Dopo il processo di rigenerazione, il sensore recupera parzialmente le sue prestazioni, confermando il potenziale di questa tecnologia per applicazioni sostenibili nel monitoraggio ambientale.

- **Progettazione dei circuiti di interfaccia dei dispositivi eco-sostenibili**

È stata effettuata, in collaborazione con il co-beneficiario UNISA_DF (LA3.6), la progettazione dei circuiti di pilotaggio dei sensori a basso consumo energetico, dei circuiti di carica/scarica dei supercapacitori ad alte prestazioni e dei circuiti di interfaccia dei dispositivi a recupero energetico.

- **Progettazione di un prototipo di scheda ibrida (in collaborazione con UNISA_DF, LA3.6)**

È stata sviluppata una piattaforma per il monitoraggio ambientale che integra sensori eco-sostenibili, dispositivi di recupero energetico ed elementi di accumulo. Il sistema utilizza biomateriali come gelatina e chitosano per ottimizzare il consumo energetico e migliorare la sostenibilità. Il prototipo include circuiti di pilotaggio dei sensori, gestione della carica/scarica dei supercapacitori e interfaccia per il recupero energetico, progettati ad hoc. Il supercapacitore funge da primo stadio di accumulo, lavorando in sinergia con moduli fotovoltaici e batteria Li-ion. L'energia raccolta alimenta prioritariamente il supercapacitore, che supporta l'elettronica e la trasmissione dati LoRa, preservando la batteria e garantendo autonomia operativa.

- **Caratterizzazione dei dispositivi provenienti dai co-beneficiari e prime prove di funzionamento**

I dispositivi prodotti dal co-beneficiario UNIRM2_DIE_1 (LA3.3) sono stati caratterizzati confermando i dati rilevati nelle prove di accettazione condotte su tali dispositivi dal co-beneficiario.

- **Sistema di misura custom**

Il sistema di misura custom, previsto per la caratterizzazione del sistema integrato per il recupero e l'accumulo di energia e per il monitoraggio ambientale negli edifici (progettato nell'ambito della precedente LA3.1), non è stato completato. Tuttavia, gli obiettivi della LA3.2 sono stati pienamente raggiunti: la caratterizzazione del sensore di temperatura è stata effettuata in ambiente controllato mediante piatto termico a controllo Peltier (modulo TEC) integrato nel sistema Arkeo (Cicci Research) presente al C.R. ENEA di Portici, operante in un intervallo compreso tra 0 e 90°C. Il sistema integrato, invece, è stato testato in condizioni reali. Per ulteriori dettagli si rimanda all'*analisi sperimentale e comparativa del sistema di monitoraggio a recupero energetico*.

- **Analisi sperimentale e comparativa del sistema di monitoraggio a recupero energetico**

È stata condotta un'analisi sperimentale sulle prestazioni del sistema integrato di recupero e accumulo energetico per il monitoraggio ambientale. I dispositivi sono stati caratterizzati sia in ambiente controllato sia in un ambiente operativo reale. In particolare, i pannelli solari sono stati testati a diversi livelli di illuminamento (lux) utilizzando una lampada LED a spettro noto

per stimare la densità di potenza generata. I sensori di temperatura sono stati caratterizzati in ambiente controllato per valutare le dipendenze termiche e l'impatto delle variazioni di temperatura sulle prestazioni.

Parallelamente, è stata eseguita un'analisi comparativa tra la scheda ibrida a recupero energetico, sviluppata in collaborazione con UNISA_DF (LA3.6), e una soluzione commerciale alimentata dalla rete elettrica. Il sistema a recupero energetico, progettato per operare autonomamente con fonti rinnovabili e dispositivi eco-sostenibili, ha mostrato un consumo di energia inferiore di circa 1/400 rispetto alla scheda commerciale, a parità di grandezze monitorate (temperatura, umidità e CO₂). L'analisi, condotta in due ambienti distinti (ufficio per il sistema a recupero energetico e appartamento per la scheda commerciale), ha evidenziato l'influenza di fattori esterni, come presenza umana, ventilazione e riscaldamento, sulle misure ambientali. Sebbene la soluzione sviluppata garantisca autonomia e sostenibilità, ulteriori ottimizzazioni sono necessarie per ampliare la gamma di parametri misurabili e migliorare l'efficienza complessiva.

Risultati ottenuti *non previsti nel capitolato*:

- **Andamento in temperatura dei supercapacitori eco-sostenibili**

È stata valutata la dipendenza delle prestazioni del supercapacitore eco-sostenibile in funzione della temperatura tra 277 K e 313 K. L'aumento della temperatura migliora la capacità di accumulo e riduce la resistenza serie, con un significativo incremento della densità di energia e potenza a 305 K, oltre il punto di gelificazione dell'idrogel. Le misure di ciclovoltammetria, carica/scarica galvanostatica e spettroscopia condotte per questa valutazione rientrano nella caratterizzazione elettrochimica prevista dal capitolato, con l'aggiunta della variabile temperatura per verificare la robustezza del dispositivo.

3 Prodotti attesi

Lista dei prodotti attesi come da capitolato vigente:

- Rapporto tecnico contenente:
 - caratterizzazione dei dispositivi fotovoltaici e termoelettrici acquisiti;
 - fabbricazione e caratterizzazione dei sensori a basso consumo energetico;
 - ottimizzazione dei supercapacitori ad alte prestazioni;
 - scheda ibrida a recupero energetico per il monitoraggio degli edifici, di elettronica di interfaccia e di pilotaggio per i dispositivi integrati;
 - sistema integrato per il recupero e l'accumulo di energia e per il monitoraggio degli edifici.
- Almeno un prototipo di sensore autonomo o a basso consumo eco-sostenibile per il monitoraggio ambientale (ad esempio temperatura, umidità, ossigeno, CO₂ ed alcol).
- Sistema per il recupero e l'accumulo di energia e per il monitoraggio degli edifici, che comprenda la scheda ibrida, un supercapacitore eco-sostenibile, almeno una delle tecnologie di harvesting e almeno una tipologia di sensore a basso consumo eco-sostenibile: caratterizzazione del sistema prodotto e analisi comparativa delle prestazioni con soluzioni commerciali.

4 Prodotti sviluppati

Lista dei prodotti sviluppati:

- Rapporto tecnico, in aderenza agli obiettivi dichiarati, comprendente la valutazione dei dispositivi fotovoltaici e termoelettrici acquisiti, lo sviluppo e l'ottimizzazione di un supercapacitore eco-sostenibile a 5V ad alte prestazioni, la valutazione della rigenerazione e della stabilità a lungo termine del sensore di temperatura eco-sostenibile, la progettazione delle schede per il monitoraggio ambientale e dei relativi circuiti di interfaccia, e l'analisi sperimentale e comparativa del sistema di monitoraggio a recupero energetico e della scheda commerciale.
- Sensore di temperatura eco-sostenibile a basso consumo, sviluppato nella LA3.1 e ulteriormente valutato (vedi paragrafo 5). È stata studiata la stabilità a lungo termine, evidenziando una buona sensibilità anche dopo due anni. La rigenerazione tramite reidratazione consente il parziale recupero delle prestazioni. Il sensore è stato integrato nel sistema di monitoraggio.
- Sistema per il recupero e l'accumulo di energia e per il monitoraggio degli edifici, che comprende la scheda ibrida, un supercapacitore eco-sostenibile a 5V, almeno una delle tecnologie di harvesting e almeno una tipologia di sensore a basso consumo eco-sostenibile (sensore di temperatura): caratterizzazione del sistema prodotto e analisi comparativa delle prestazioni con soluzioni commerciali.

Prodotti sviluppati *non previsti nel capitolato*:

- Supercapacitore eco-sostenibile a 5V ad alte prestazioni con attività di misura e verifica delle performances previste.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Nell'ambito della presente attività, in accordo con il capitolato, è prevista la fabbricazione e caratterizzazione di almeno un prototipo di sensore autonomo o a basso consumo, eco-sostenibile, per il monitoraggio ambientale (ad esempio, temperatura, umidità, ossigeno, CO₂ e alcol). Come descritto all'interno del rapporto tecnico RdS_PTR 22-24_PR 1.5_LA3.1_081, (Giugno 2023), un prototipo funzionante è stato sviluppato nella precedente LA3.1. In particolare, è stato progettato, fabbricato e caratterizzato un sensore di temperatura eco-sostenibile a basso consumo energetico, dotato di un circuito di pilotaggio dedicato per l'alimentazione in corrente, la riduzione dell'offset e la compensazione della deriva del segnale di uscita. Il sensore di temperatura eco-sostenibile realizzato in gelatina e grafene, operante tra 260 e 310 K, è in grado di rilevare la formazione di ghiaccio ed ha una sensibilità di -19 mV/K, una risposta rapida (compresa tra 10,4 s a 260 K e 40 s a 310 K), basso consumo energetico (< 15 µWh) e presenta una buona stabilità ai cicli di funzionamento. Nella LA3.2 è stata studiata la stabilità a lungo termine del sensore di temperatura eco-sostenibile, caratterizzato da basso consumo energetico e capacità di rigenerazione. Questo sensore è stato integrato con successo nel sistema di monitoraggio.

Per quanto riguarda l'accumulo energetico, lo sviluppo di un prototipo basato su un supercapacitore eco-sostenibile ad alte prestazioni con elettrolita gel-polimerico a 5V era inizialmente previsto nella LA3.1. Come descritto nel rapporto tecnico RdS_PTR 22-24_PR 1.5_LA3.1_081 (Giugno 2023), si è resa necessaria una valutazione approfondita e l'ottimizzazione delle prestazioni del supercapacitore con elettrolita a base di acetato di sodio in configurazione singola. L'ottimizzazione dell'interconnessione è stata posticipata alla presente LA3.2. Il prototipo, composto da quattro dispositivi in serie, ha una capacità di ~0.3 F, una resistenza serie di 6.2 Ω, un'energia di 18.4 Wh/kg e una potenza di 2040 W/kg. Attualmente, il supercapacitore a 5V è stato fabbricato, integrato nel sistema di monitoraggio e risulta pienamente operativo.

In riferimento alla parte economica, lo scostamento sui costi di personale (A) è dovuto al passaggio di livello, da medio ad alto, di parte del personale coinvolto. Lo scostamento della voce di spesa per strumenti e attrezzature (B) si lega alla definizione dei giorni di ammortamento rispetto alle previsioni iniziali. Analogamente, lo scostamento nei costi di esercizio (C) deriva dalla quantificazione finale delle spese per consumabili e per viaggi e missioni, inferiori rispetto a quanto inizialmente preventivato. Tali scostamenti non hanno influenzato il raggiungimento degli obiettivi e dei risultati attesi dalla LA3.2.

6 Sintesi delle attività svolte

È stata sviluppata una piattaforma di monitoraggio ambientale per edifici che integra supercapacitori da 5V, sensori eco-sostenibili e un sistema di recupero energetico basato su fotovoltaico PSC (mentre i sistemi TEG/TEGG non sono risultati pronti per l'integrazione). Il supercapacitore con elettrolita a base di idrogel con acetato di sodio ed elettrodi con chitosano e carbone attivo, presenta elevata capacità specifica (100 F/g), stabilità operativa e in temperatura. Per garantire un funzionamento a 5V, quattro supercapacitori sono collegati in serie, mantenendo una capacità di ~0.3 F, una resistenza serie di 6.2 Ω , una densità di energia di 18.4 Wh/kg e di potenza di 2040 W/kg. È stato inoltre ottimizzato il sensore di temperatura eco-sostenibile basato su gelatina e grafene, che mantiene la funzionalità dopo due anni e può rigenerarsi con l'assorbimento di poche gocce d'acqua. La piattaforma sviluppata consuma 62,4 J/giorno, risultando più efficiente delle soluzioni commerciali.

7 Dettaglio delle attività svolte

L'energy harvesting¹ è il processo di raccolta dell'energia ambientale (solare, termica, meccanica) per alimentare dispositivi a basso consumo, come sensori e sistemi di monitoraggio. Un'architettura harvest-store-use permette di gestire l'energia raccolta in modo efficiente, accumulandola in supercapacitori o batterie per garantire un funzionamento continuo. Le principali tecnologie a recupero energetico per applicazioni indoor includono generatori termoelettrici (TEG), piezoelettrici (PEG) e triboelettrici (TENG), oltre ai sistemi fotovoltaici (PV) e ai raccoglitori di energia RF.

7.1 Fotovoltaico e termoelettrico

Tra le varie tecnologie a recupero energetico, i sistemi fotovoltaici e i generatori termoelettrici sono i più adatti per edifici, offrendo un buon compromesso tra efficienza, affidabilità energetica e costo. In particolare, nella LA3.1 sono stati selezionati sistemi fotovoltaici che presentino elevati valori di efficienza indoor, come le celle fotovoltaiche in perovskite (PSC) che in tali condizioni raggiungono addirittura efficienze del 25,5%² e i TEG basati su materiali compatibili con i gradienti termici individuabili negli edifici.

Dalla collaborazione con il co-beneficiario UNIRM2_DIE_1 (LA3.3), è emerso che la tecnologia PSC fosse la più promettente per gli scopi della presente LA, avendo dimostrato prestazioni effettive in condizioni di illuminazione indoor nettamente superiori rispetto alla tecnologia DSSC. Infatti, su area di 0.5 cm² le PSC prodotte hanno mostrato un'efficienza massima del 28.4% sotto 1000 lux. Pertanto, in conformità ai requisiti minimi in input alle schede elettroniche sviluppate in collaborazione con il co-beneficiario UNISA_DF (LA3.6) (cfr. par. 7.5), è stata stabilita la necessità di avere un comparto fotovoltaico PSC dotato di una superficie pari a circa 450 cm², ottimizzate per l'illuminazione indoor (10 μW/cm² di densità di potenza a 220 lux di illuminazione per produrre 130 J in 8 ore di funzionamento giornaliero). Sulla base di tale dimensionamento, il co-beneficiario UNIRM2_DIE_1 (LA3.3) ha realizzato l'ottimizzazione e lo scaling-up della tecnologia PSC selezionata e ha fornito i relativi moduli fotovoltaici. In collaborazione con il co-beneficiario UNIRM2_DIE_2 (LA3.4), si è co-progettato il modulo termoelettrico in termini di materiali, layout e tecniche di fabbricazione. In particolare, si è dimostrata la fattibilità e il funzionamento di un modulo i) TEG in configurazione planare p-n, utilizzando i polimeri p-type (Poly[Kx(Cu(I)ett)]) e n-type (Poly[Kx(Niett)]) forniti da UNITO_CHIMICA (LA3.5), ii) TEG in configurazione 3D (pellet) col solo polimero n-type, e iii) TEGG con architettura monotipo di tipo W a base di sistema redox Co(II)/Co(III). Le prestazioni ottenute per i moduli sopracitati non sono risultati ancora compatibili per l'integrazione con la piattaforma di monitoraggio ambientale.

¹ L'energy harvesting sfrutta generatori ambientali (fotovoltaici, termoelettrici, piezoelettrici) per convertire l'energia in elettricità, regolata da circuiti di gestione della potenza. L'architettura harvest-store-use disaccoppia i consumi dai flussi energetici ambientali, migliorando l'affidabilità del sistema. Un microcontrollore a basso consumo coordina i sensori e la trasmissione dati, ottimizzando l'uso dell'energia disponibile.

² Efficienza di conversione calcolata con un LED bianco freddo a 1000 lux.

7.2 Caratterizzazione dei dispositivi provenienti dai co-beneficiari

I dispositivi fotovoltaici prodotti dal co-beneficiario UNIRM2_DIE_1 (LA3.3) sono stati caratterizzati confermando i dati rilevati nelle prove di accettazione condotte su tali dispositivi dal co-beneficiario (Figura 1).

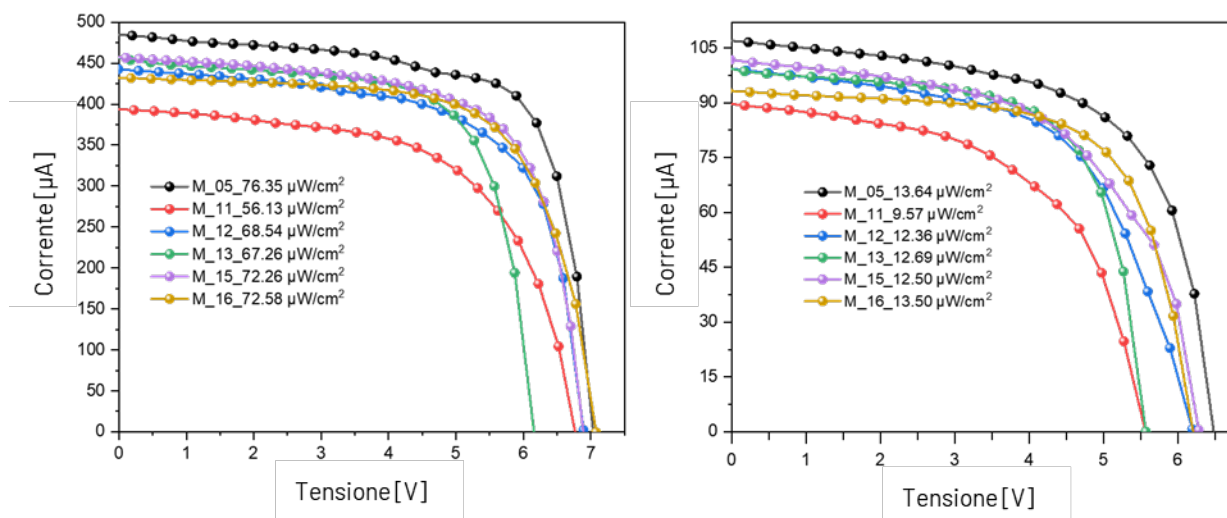


Figura 1 - Caratterizzazione tensione-corrente dei moduli consegnati dal co-beneficiario UNIRM2_DIE_1(LA3.3).

7.3 Sviluppo di un supercapacitore a 5V ad alte prestazioni eco-sostenibile³

I supercapacitori eco-sostenibili sviluppati nella LA3.1 a singolo dispositivo (1x) con acetato di sodio (CH_3COONa), idrogel e chitosano mostrano una capacità di ~ 100 F/g, resistenza di 0.8Ω e stabilità fino a 50000 cicli (vs 12000 per NaCl). Il miglior dispositivo raggiunge 10.6 Wh/kg di energia e 3940 W/kg di potenza (Figura 2)⁴. Per ottenere un supercapacitore operante a 5 V, quattro dispositivi (4x) sono stati collegati in serie. Questa configurazione è stata scelta per aumentare la tensione operativa mantenendo un equilibrio ottimale tra prestazioni ed efficienza⁵. In questa configurazione, la tensione massima su ogni singolo dispositivo ($1,25$ V) rimane al di sotto della soglia di decomposizione dell'acqua nell'elettrolita idrogel, prevenendo reazioni chimiche indesiderate⁶.

La Figura 3 mostra le prestazioni elettrochimiche del supercapacitore eco-sostenibile a 5 V in diverse condizioni operative. Il prototipo, costituito da quattro dispositivi in serie, presenta una capacità di ~ 0.3 F, una resistenza serie di 6.2Ω , una densità di energia di 18.4 Wh/kg e una densità di potenza di 2040 W/kg⁷.

³ Le misure di ciclovoltammetria, carica/scarica galvanostatica e spettroscopia condotte per questa valutazione rientrano nella caratterizzazione elettrochimica prevista dal capitolato.

⁴ G. Landi, L. La Notte, V. Granata, G. Avallone, C. Barone, G. Carapella, S. Pagano, A. L. Palma, P. Sdringola, and G. Puglisi, ChemElectroChem 10, (2023).

⁵ L'uso di un numero maggiore di dispositivi avrebbe comportato un incremento significativo della resistenza serie e una riduzione della capacità complessiva, penalizzando le prestazioni energetiche complessive.

⁶ Zang, X.; Shen, C.; Sanghadasa, M.; Lin, L. High-Voltage Supercapacitors Based on Aqueous Electrolytes. ChemElectroChem 2019, 6, 976-988.

⁷ Inoltre, le misure di carica e scarica galvanostatica confermano la stabilità del dispositivo, con valori di capacità simili pari a 0.23 F a 20 mA.

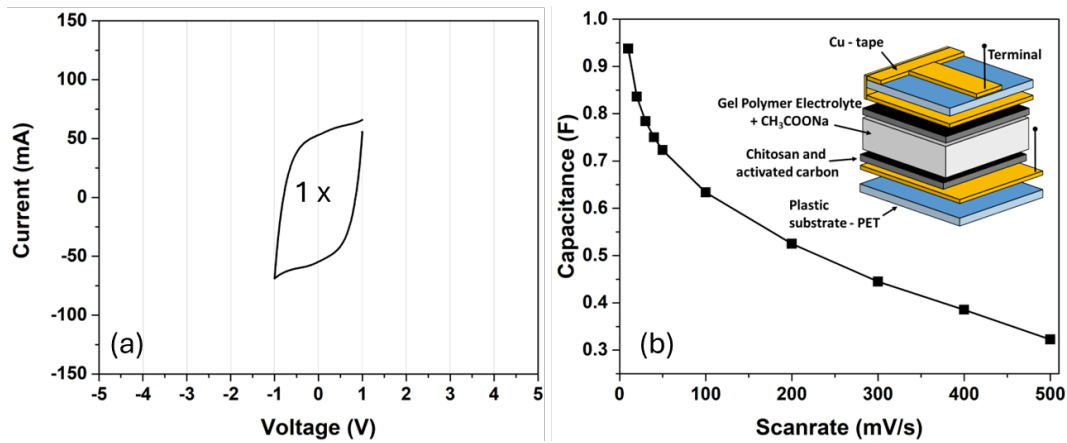


Figura 2 - (a) Curva di voltammetria ciclica dei supercapacitori simmetrici e (b) valori di capacit  in funzione del scan rate⁸.

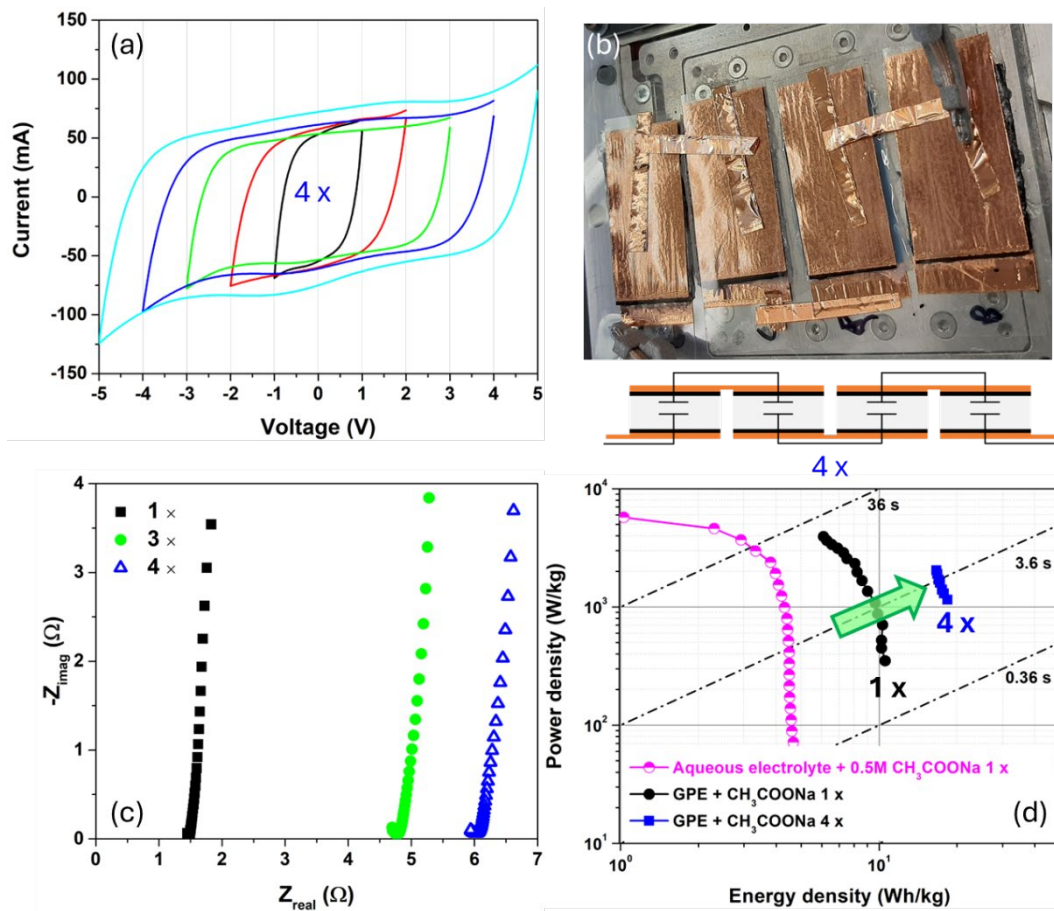


Figura 3 - (a) Curve di ciclovoltammetria del supercapacitore a 5 V a diverse tensioni. (b) Fotografia e schema di interconnessione in serie di quattro dispositivi. (c) Confronto degli spettri di impedenza e (d) delle prestazioni energetiche in funzione del numero di dispositivi interconnessi.

Tale dispositivo   quindi pronto ad essere collegato alla scheda a recupero energetico per il monitoraggio ambientale sviluppata in collaborazione con il co-beneficiario UNISA_DF (LA3.6).

⁸ Nell'inserto   riportata l'illustrazione in sezione dei supercapacitori simmetrici a base di carbonio realizzati con materiali eco-sostenibili.

7.3.1 Prestazioni dei supercapacitori eco-sostenibili con elettrolita in idrogel in funzione della temperatura

Per valutare l'impatto della temperatura sulle proprietà elettrochimiche e le prestazioni complessive, sono state condotte misure sperimentali di ciclovoltammetria, carica/scarica galvanostatica e spettroscopia di impedenza tra 277 K e 313 K su un supercapacitore (1x)⁹. Come si osserva dalla Figura 4 (a), l'aumento della temperatura migliora la capacità di accumulo di carica e riduce la resistenza serie, con un coefficiente di temperatura positivo della capacità tra 0.6%/K (10 mV/s) e 1.3%/K (500 mV/s)¹⁰. A 305 K, vicino al punto di gelificazione dell'idrogel, l'aumento della conducibilità ionica migliora significativamente le prestazioni: la densità di energia cresce del 50%, la densità di potenza del 7%, mentre la resistenza serie si riduce del 90% (da 2.8 Ω a 0.3 Ω)(Figura 4 (b))¹¹.

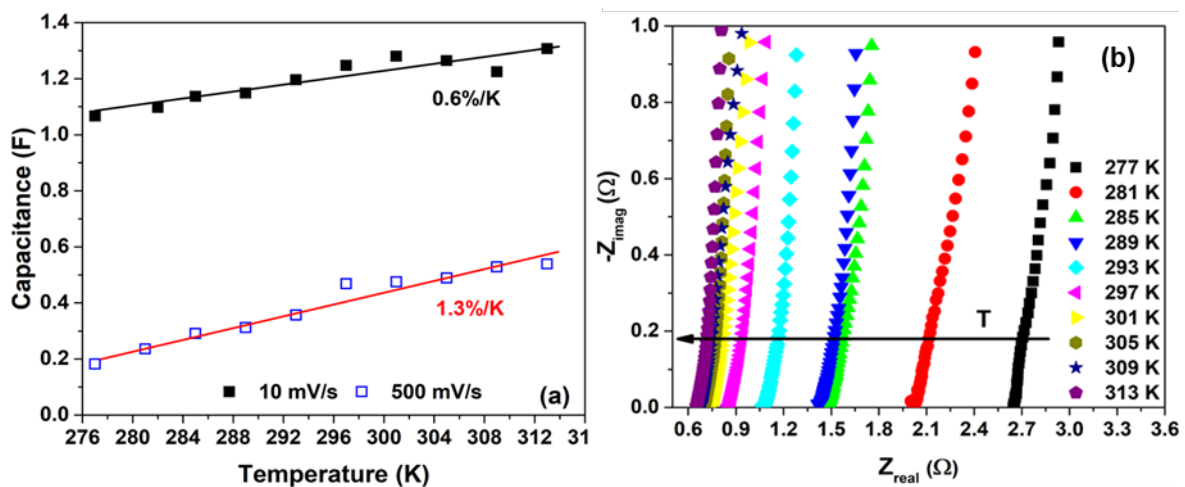


Figura 4 - (a) Andamento della capacità e (b) variazione degli spettri di impedenza in funzione della temperatura per il supercapacitore (1x) eco-sostenibile.

⁹ È stato studiato il comportamento elettrico in funzione della temperatura di un supercapacitore simmetrico ed eco-sostenibile, basato su carbonio attivo da gusci di cocco ed elettrolita in idrogel di gelatina con acetato di sodio. Gli elettrodi includono il chitosano come legante. Per maggiori dettagli si confronti:

G. Landi, C. Barone, L. La Notte, G. Avallone, V. Granata, G. Carapella, A.L. Palma, P. Sdringola, G. Puglisi, and S. Pagano, "Temperature-dependent performance of sustainable supercapacitors with hydrogel electrolyte," Nano Express 6(1), 015023 (2025). Redazione Ottobre 2024, sottomissione gennaio 2025.

¹⁰ Questi andamenti sono coerenti con quanto riscontrato in letteratura:

Park T H, Park S, Yu S, Park S, Lee J, Kim S, Jung Y and Yi H 2021 Highly Sensitive On-Skin Temperature Sensors Based on Biocompatible Hydrogels with Thermoresponsive Transparency and Resistivity Adv. Healthc. Mater. 10 2100469.

Landi G, Granata V, Germano R, Pagano S and Barone C 2022 Low-Power and Eco-Friendly Temperature Sensor Based on Gelatin Nanocomposite Nanomaterials 12 2227.

¹¹ Al di sopra del punto di gelazione, l'idrogel diventa più fluido, migliorando la conducibilità ionica e riducendo l'ESR, con un conseguente aumento della capacità di immagazzinamento. L'effetto stabilizzante del glicerolo preserva flessibilità e conducibilità anche a temperature inferiori a 273 K, evitando la degradazione. Questi risultati evidenziano l'importanza del punto di gelazione e dell'interazione temperatura-stabilità nelle prestazioni elettrochimiche.

7.4 Rigenerazione e stabilità a lungo termine del sensore di temperatura eco-sostenibile

Nella precedente LA3.1 è stato sviluppato un sensore di temperatura eco-sostenibile¹². La Figura 5 riporta un confronto delle caratteristiche elettriche del sensore di temperatura eco-sostenibile nello stato iniziale e in quello invecchiato dopo due anni¹³. Come nel suo stato iniziale, anche il dispositivo invecchiato presenta fenomeni di corrente-limite nell'elettrolita idrogel di gelatina, attribuiti a reazioni di dissociazione¹⁴. Le molecole di acqua-glicerolo nel nanocomposito idrogel partecipano attivamente ai processi di dissociazione quando la corrente di polarizzazione (I_{bias}) supera il valore della corrente-limite (I_{lim}).

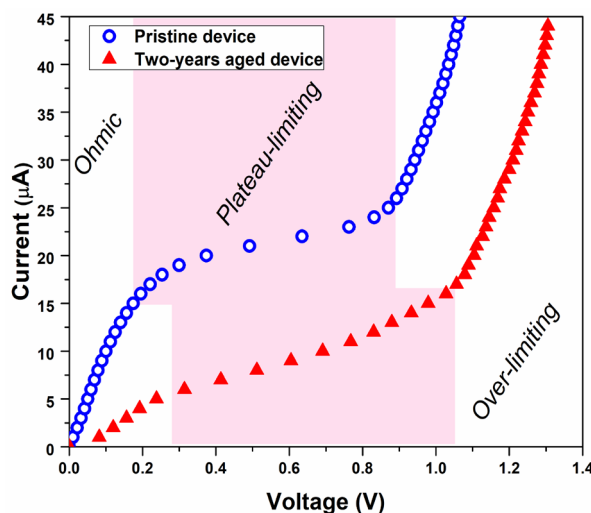


Figura 5 – Confronto delle caratteristiche corrente-tensione dei sensori di temperatura nel suo stato iniziale ed invecchiato.

Il processo di disidratazione del dispositivo, avvenuto nel corso dei due anni, ha ridotto significativamente il percorso di conduzione ionica, aumentando la resistività e riducendo di conseguenza il valore di I_{lim} ¹⁵.

¹² LA3.1(RdS_PTR 22-24_PR 1.5_LA3.1_081, Giugno 2023). Studio e modellizzazione della dipendenza dai parametri ambientali delle proprietà elettrochimiche ed elettriche e valutazione ed ottimizzazione delle prestazioni (sensibilità, tempo di risposta, linearità e consumi energetici) del sensore di temperatura sviluppato nella LA3.1. Nel dettaglio, è stato fabbricato e caratterizzato un sensore di temperatura eco-sostenibile realizzato in gelatina e grafene. Il sensore, operante tra 260 e 310 K, è in grado di rilevare la formazione di ghiaccio ed ha una sensibilità di -19 mV/K, una risposta rapida (compresa tra 10,4 s a 260 K e 40 s a 310 K), basso consumo energetico (< 15 μ Wh) e presenta una buona stabilità ai cicli di funzionamento. Tali caratterizzazioni sono state effettuate utilizzando il sistema di misura in temperatura presente presso il C.R. ENEA di Portici predisposte nella LA3.1. Alcune caratterizzazioni a temperature inferiori allo zero sono state condotte in collaborazione con il co-beneficiario (LA3.6).

¹³ Un materiale nanocomposito economico e processabile in acqua, a base di gelatina e grafene, è stato utilizzato per la realizzazione di un sensore di temperatura ecocompatibile. Per la preparazione del materiale, la gelatina è stata sciolta in una miscela di acqua e glicerolo a 80 °C con una concentrazione del 10% in peso. Successivamente, è stato aggiunto grafene con un contenuto di riempitivo dello 0,25% in peso. La miscela è stata agitata meccanicamente per circa 30 minuti alla stessa temperatura, fino a ottenere una dispersione omogenea. Il gel-nanocomposito ottenuto è stato quindi depositato mediante tecnica di blade coating e disposto simmetricamente tra due substrati plastici rivestiti con nastro di rame (Cu), utilizzato come elettrodo. Si osserva che nelle caratteristiche elettriche sono presenti tre regioni distinte: ohmica, a plateau e over-limiting.

¹⁴ G. Landi, S. Pagano, V. Granata, G. Avallone, L. La Notte, A. L. Palma, P. Sdringola, G. Puglisi, and C. Barone, *Nanomaterials* 14, 283 (2024).

¹⁵ G. Landi, V. Granata, R. Germano, S. Pagano, and C. Barone, *Nanomaterials* 12, 2227 (2022).

In Figura 6 è mostrata l'analisi comparativa della tensione di saturazione del dispositivo nel suo stato iniziale e invecchiato dopo due anni a diverse temperature. La sensibilità termica (m_V) stimata, valutata tra 297 K e 323 K, rimane costante nel tempo, in linea con la letteratura¹⁶. Il sensore invecchiato mantiene la capacità di rilevare la formazione di ghiaccio, con variazioni di tensione a 260 K, dovute al congelamento dell'acqua nel gel nanocomposito¹⁷. L'invecchiamento, dovuto alla perdita di molecole d'acqua dal gel nanocomposito, ha aumentato la resistenza complessiva, riducendo la corrente di polarizzazione da 20 μA a 7 μA e causando lo scostamento osservato nella sensibilità.

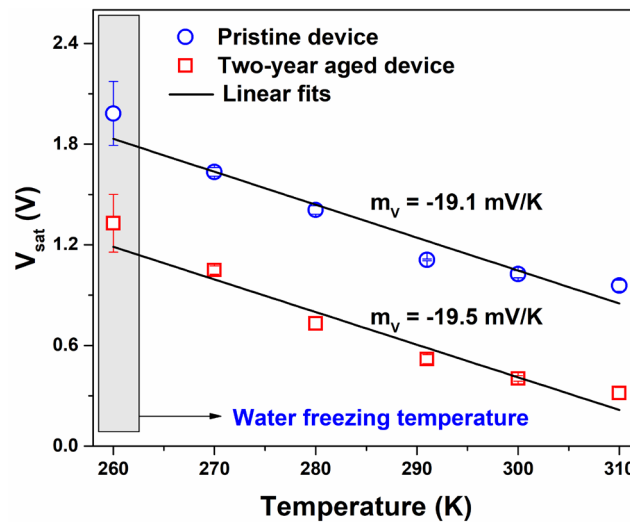


Figura 6 - Confronto della tensione V_{sat} del sensore al termine del periodo di sensing nei suoi stati iniziale e invecchiato, in funzione della temperatura, con relativi adattamenti lineari.

La Figura 7 mostra le risposte in tensione di sei cicli di misura consecutivi a 300 K con una corrente di polarizzazione di 20 μA per i dispositivi nuovi e invecchiati¹⁸. Cortocircuitando i terminali attraverso il circuito di pilotaggio, si ripristina la tensione a circuito aperto, migliorando la stabilità in modalità di sensing. La cella galvanica all'interfaccia metallo/gel-nanocomposito riduce il consumo energetico sfruttando il potenziale agli elettrodi, consentendo al sensore una parziale autoalimentazione, pari a circa il 30% dell'energia operativa¹⁴. Il tempo di risposta è di 41,8 s per il dispositivo nuovo e 28,9 s per quello invecchiato. In modalità di sensing, il consumo energetico è di 8,1 μWh e 8,5 μWh a 300 K per i due stati, con una potenza media di circa 20 μW ¹⁵.

M. La Cerva, L. Gurreri, M. Tedesco, A. Cipollina, M. Ciofalo, A. Tamburini, and G. Micale, *Desalination* 445, 138 (2018).

¹⁶ M. Shiran Chaharsoughi, J. Edberg, P. Andersson Ersman, X. Crispin, D. Zhao, and M. P. Jonsson, *Npj Flex. Electron.* 4, 23(2020).

¹⁷ X. P. Morelle, W. R. Illeperuma, K. Tian, R. Bai, Z. Suo, and J. J. Vlassak, *Adv. Mater.* 30, 1801541(2018).

¹⁸ È stato sviluppato nella precedente LA3.1 (RdS_PTR 22-24_PR 1.5_LA3.1_081, Giugno 2023) un circuito di pilotaggio per l'alimentazione e condizionamento del segnale misurato dal sensore di temperatura a basso consumo ed eco-sostenibile. Il circuito consente di eseguire una misura ogni 10 minuti con un tempo di inattività di 6 minuti e un periodo di misura di 4 minuti. In aggiunta, il circuito è in grado di ridurre la deriva e l'offset in tensione del segnale di uscita dal sensore.

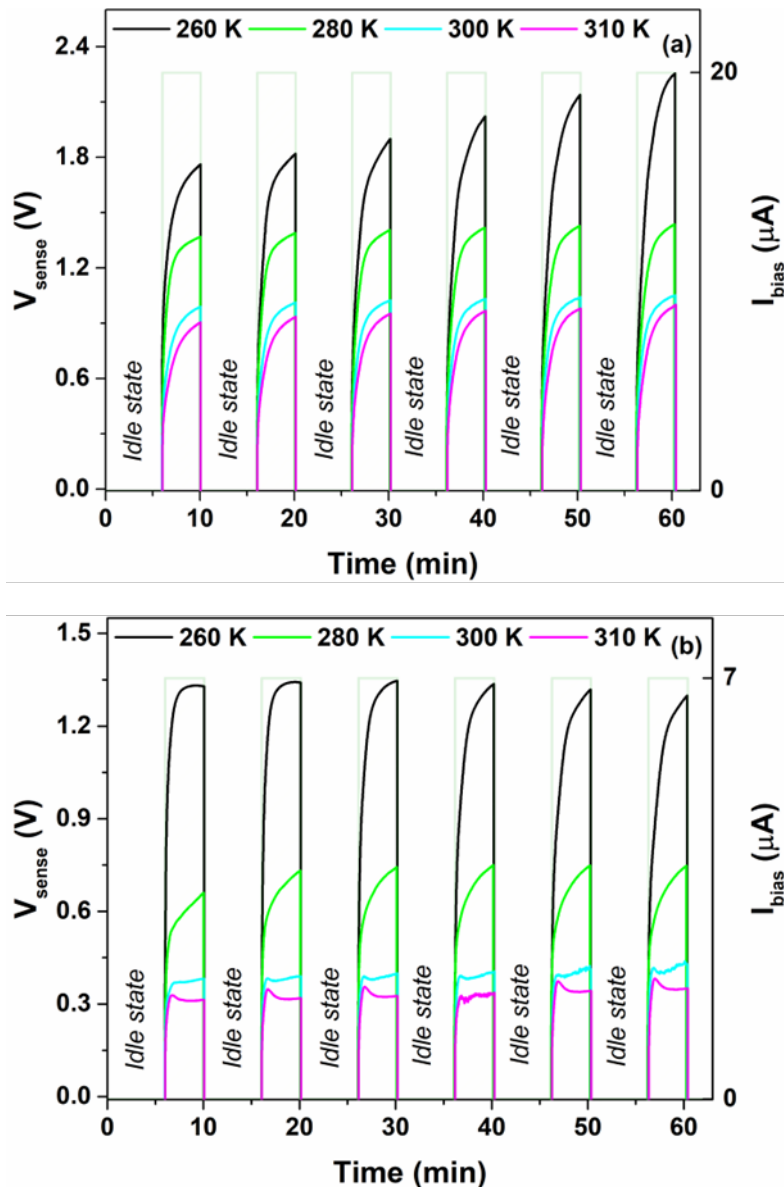


Figura 7 - Confronto dei profili di tensione in temperatura del dispositivo (a) nuovo ed (b) invecchiato dopo 2 anni.

L'evidenza sperimentale conferma la rigenerazione efficace dei sensori di temperatura invecchiati attraverso l'assorbimento di acqua a una temperatura superiore al punto di gelificazione del nanocomposito (Figura 8(a)). In Figura 8(b) è mostrata la variazione della resistenza con la temperatura durante l'idratazione del sensore invecchiato, evidenziando l'inizio del processo di rigenerazione intorno a 306 K e un conseguente aumento della conduttività. Dopo l'idratazione, il sensore rigenerato presenta uno spostamento della caratteristica corrente-tensione verso un intervallo di corrente più elevato, associato a un aumento del valore della corrente limitante (I_{lim}). Questo incremento, insieme alla variazione delle caratteristiche elettriche (Figura 8 (c)), dimostra il ruolo positivo dell'assorbimento delle molecole d'acqua nel nanocomposito durante il processo di idratazione. La rigenerazione migliora significativamente la sostenibilità e la riutilizzabilità del sensore, contribuendo allo sviluppo di tecnologie più eco-sostenibili.

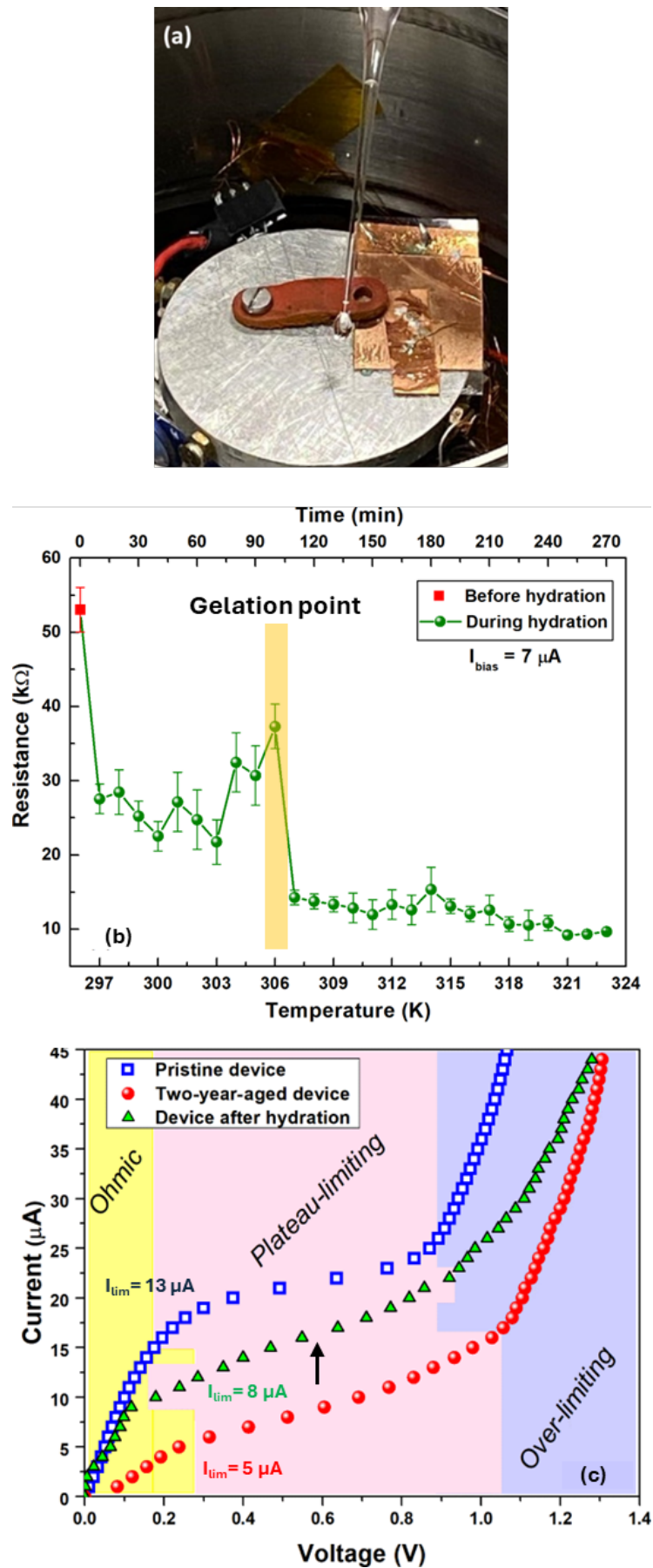


Figura 8 - (a) Foto del sensore ecosostenibile a 297 K prima dell'idratazione, effettuata con alcune gocce d'acqua sul bordo. (b) Variazione della resistenza durante l'idratazione del sensore di temperatura invecchiato. (c) Caratteristiche corrente-tensione del sensore nelle condizioni iniziale, invecchiata e rigenerata.

7.5 Schede per il monitoraggio ambientale

Sono state analizzate le prestazioni di due schede per il monitoraggio ambientale con approcci energetici differenti. La prima è la scheda ibrida a recupero energetico progettata e sviluppata, in collaborazione con il co-beneficiario UNISA_DF (LA3.6), per operare in modo autonomo sfruttando fonti di energy harvesting e con dispositivi eco-sostenibili. La seconda è una scheda commerciale alimentata dalla rete elettrica, destinata alla misurazione di parametri ambientali come il particolato (PM), i cui sensori risultano particolarmente energivori. Nei paragrafi seguenti vengono descritte nel dettaglio entrambe le soluzioni.

7.5.1 Prototipo di scheda ibrida a recupero energetico

È stata progettata una piattaforma per il monitoraggio ambientale negli edifici, che integra dispositivi convenzionali ed eco-sostenibili con fonti di energy harvesting. Per la realizzazione di idrogel e strati attivi di sensori e supercapacitori sono stati impiegati biomateriali come gelatina e chitosano, ottenuti da risorse rinnovabili. L'uso di materiali sostenibili e l'ottimizzazione dei consumi energetici migliorano il profilo ambientale della soluzione proposta¹⁹. Il prototipo di scheda elettronica sviluppato offre una piattaforma versatile per testare diverse configurazioni di sensori e fonti di energy harvesting (Figura 9).

I circuiti di pilotaggio per i sensori a basso consumo, i circuiti di carica/scarica per i supercapacitori ad alte prestazioni e i circuiti di interfaccia per dispositivi a recupero energetico sono stati progettati ad hoc in collaborazione con il co-beneficiario UNISA_DF (LA3.6)¹⁹.

Il supercapacitore ad alte prestazioni sviluppato funge da primo stadio di accumulo e alimentazione nella scheda, lavorando in sinergia con il modulo di recupero energetico e la batteria Li-ion. In condizioni di luce (>200 lux), l'energia raccolta dai moduli fotovoltaici ricarica prioritariamente il supercapacitore, che alimenta l'elettronica e la trasmissione dati tramite tecnologia LoRa²⁰, preservando la batteria. In assenza di luce, il supercapacitore fornisce energia fino a scendere sotto i 2,6 V, momento in cui interviene la batteria per garantire il funzionamento continuo della scheda. Questo sistema ottimizza l'uso dell'energia raccolta, assicurando autonomia e affidabilità a lungo termine. Dal punto di vista energetico, ogni ciclo di misura consuma 0,76 J in presenza di luce e 0,20 J in sua assenza, a causa dell'attivazione del display e-paper, la cui funzione è mostrare in loco i valori acquisiti dai sensori. Con un ciclo ogni 10 minuti, il consumo giornaliero è di 62,4 J, lasciando un surplus di 20,8 J/giorno²¹. Questa energia in eccesso ricarica i dispositivi di accumulo: quattro supercapacitori eco-sostenibili a

¹⁹ Il prototipo di scheda ibrida a recupero energetico integra almeno un sensore tra quelli fabbricati, almeno una tecnologia di harvesting ed un elemento di accumulo eco-sostenibile in collaborazione con il co-beneficiario UNISA_DF (LA3.6), che fornirà la scheda ibrida. Per maggiori dettagli si confronti:

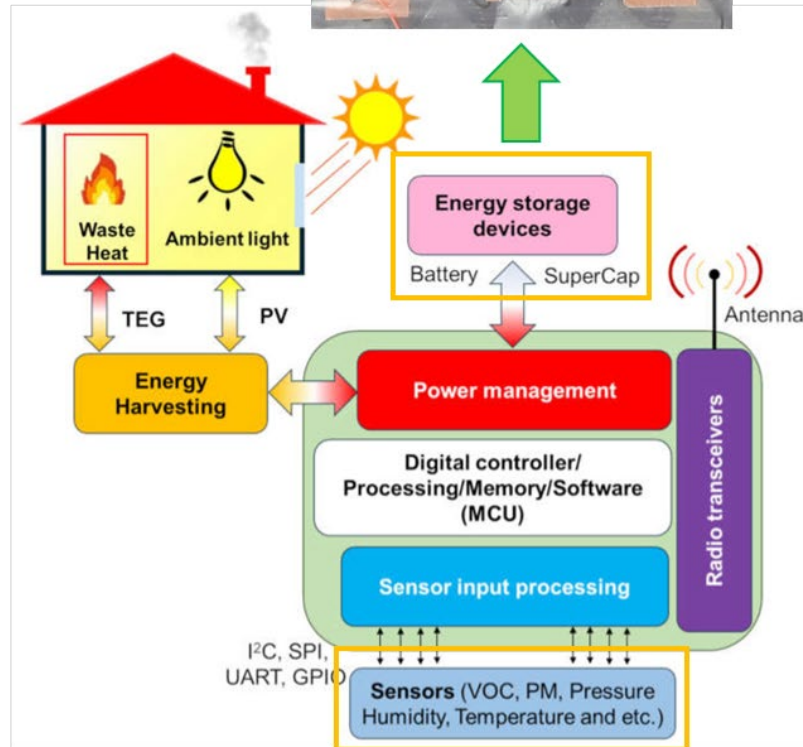
G. Landi, G. Avallone, C. Barone, and S. Pagano, "Design of Environmental Sensor Board for Energy Harvesting: Integration of Conventional and Eco-Friendly Sensors with Power Generation Sources," *Electronics* 13(19), 3801 (2024).

²⁰ In base ai requisiti di consumo energetico e portata di trasmissione, è stata selezionata la tecnologia LoRa per l'implementazione del progetto. Grazie al suo elevato link budget, LoRa consente di posizionare il gateway a decine di metri di distanza dalla scheda, garantendo una comunicazione affidabile e rendendola adatta all'utilizzo in ambienti interni

²¹ Nel sistema sviluppato sono utilizzate celle fotovoltaiche a perovskite con un'area attiva di 450 cm², ottimizzate per l'illuminazione indoor (densità di potenza di 10 μ W/cm² a circa 200 lux). Operando per almeno 8 ore al giorno, queste celle generano circa 130 J/giorno. Considerando un'efficienza di accumulo dell'80% e un'efficienza di conversione dell'80%, l'energia effettivamente disponibile si riduce a circa 83 J/giorno.

5 V (capacità totale 2,5 J) e una batteria Li-ion polymer a 3,7 V (530 J disponibili)²². Grazie a questa gestione, la scheda opera in modo continuo e affidabile anche in periodi prolungati senza illuminazione indoor, come durante la notte o nei fine settimana (Figura 10).

Low-cost, eco-friendly 5V supercapacitor prototype (0.3 F).



Eco-friendly electrochemical temperature sensor prototype based on a gelatin-graphene nanocomposite.



Figura 9 - Schema dei principali componenti del prototipo di scheda ibrida a recupero energetico sviluppata.

²² Per maggiori informazioni al riguardo si confronti il rapporto tecnico del co-beneficiario UNISA_DF (LA3.6), RdS_PTR 22-24_PR1.5_LA3.6_233.

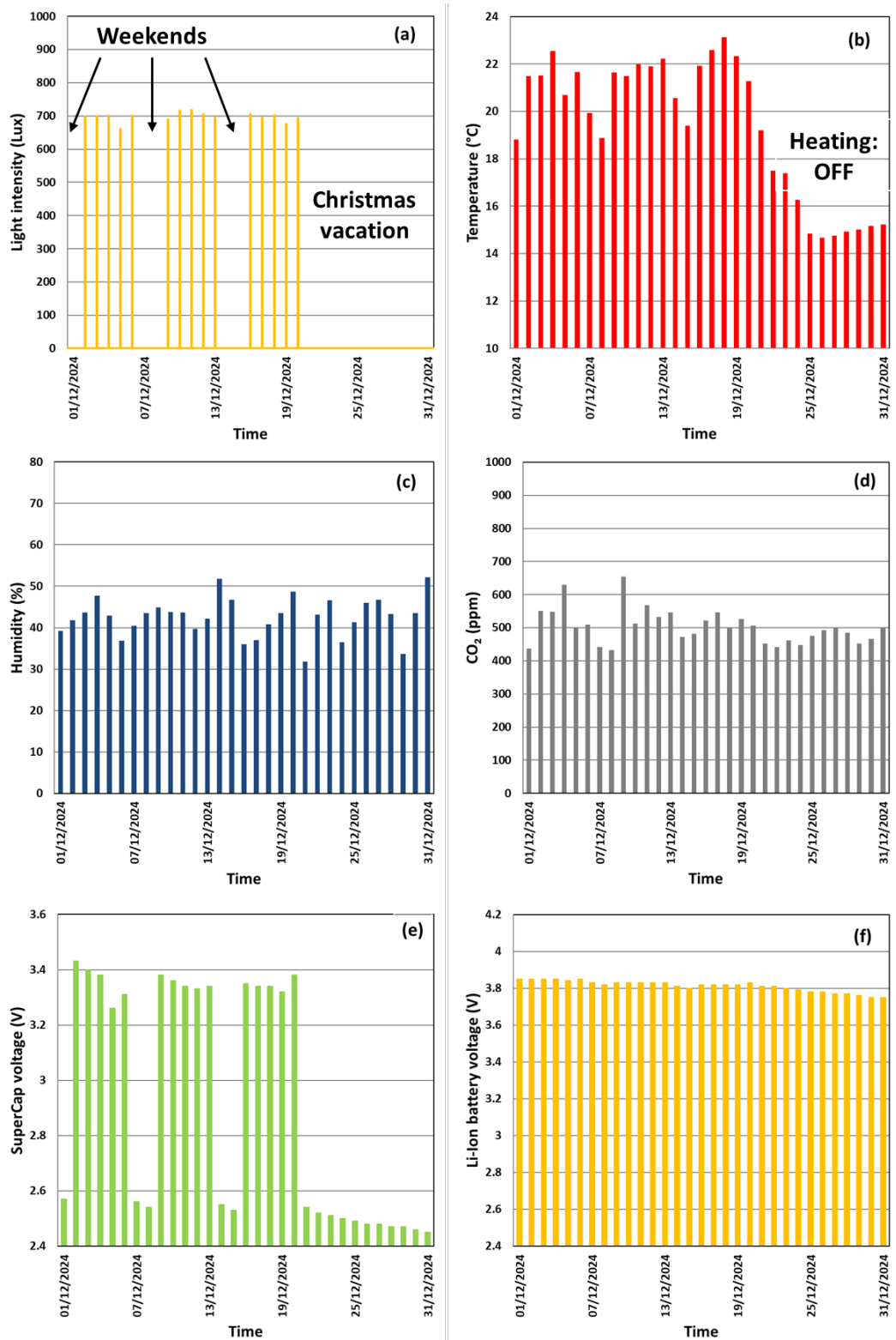


Figura 10 - Andamento temporale dei parametri misurati dalla scheda a recupero energetico in un ufficio nel mese di dicembre 2024²³.

²³ Dati ad accesso pubblico su <https://thingspeak.mathworks.com/channels/2571201>

Si noti che la temperatura misurata dal sensore eco-sostenibile è stata validata confrontandola con quella rilevata da un sensore commerciale montato sulla stessa scheda, operante nello stesso ambiente. I valori risultano coerenti, confermando l'affidabilità del sensore sviluppato.

7.5.2 Scheda commerciale alimentata da rete elettrica

La seconda tipologia di sistema di monitoraggio considerata è stata una scheda commerciale alimentata direttamente dalla rete elettrica²⁴. Questa scheda è equipaggiata con un microcontrollore ESP32 e utilizza la tecnologia Wi-Fi per la trasmissione dati²⁵.

Il sistema consente di monitorare diversi parametri ambientali, tra cui PM 1, PM 2.5, PM 10, composti organici volatili (VOC), CO₂, temperatura e umidità (Figura 11).

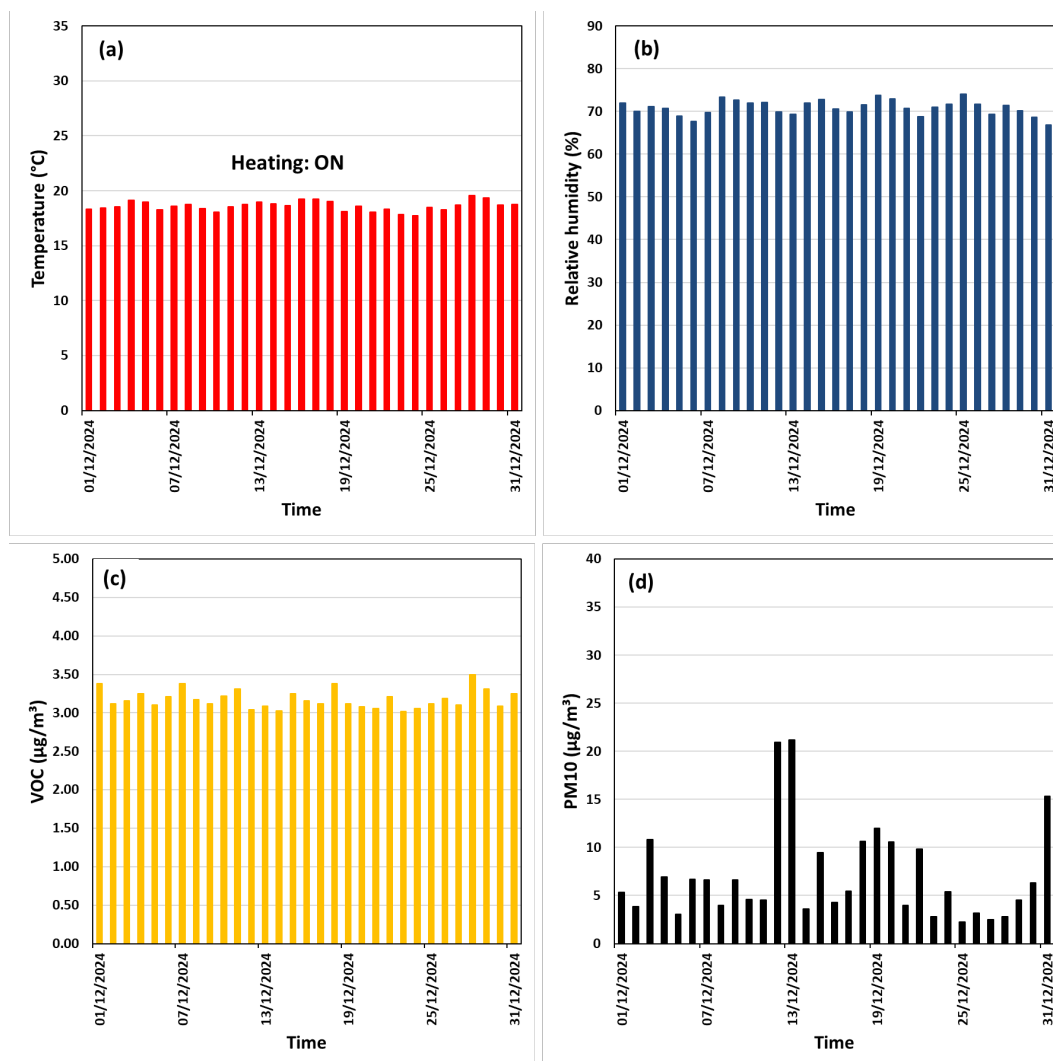


Figura 11 - Andamento temporale di alcuni parametri misurati dalla scheda commerciale in un appartamento nel mese di dicembre 2024.

Tuttavia, i sensori di particolato risultano particolarmente energivori, determinando un consumo di circa 126 J per ciclo di misura²⁶ (Figura 12).

²⁴ Le schede commerciali sono state customizzate in base ai requisiti specifici forniti da ENEA, adattandone le funzionalità alle esigenze del progetto.

²⁵ L'ESP32-WROOM-32 è un modulo Wi-Fi + Bluetooth basato sul microcontrollore ESP32 di Espressif Systems. È ampiamente utilizzato in applicazioni IoT grazie alle sue elevate prestazioni, basso consumo energetico e capacità di connessione wireless.

²⁶ Ogni scheda è stata sottoposta a un rigoroso processo di test di durata pari a 72 ore, durante il quale sono stati utilizzati due sensori avanzati della Sensirion: il SEN55, progettato per rilevare le polveri sottili (PM1.0, PM2.5, e PM10), e il SCD41, capace di misurare livelli di CO₂, temperatura e umidità.

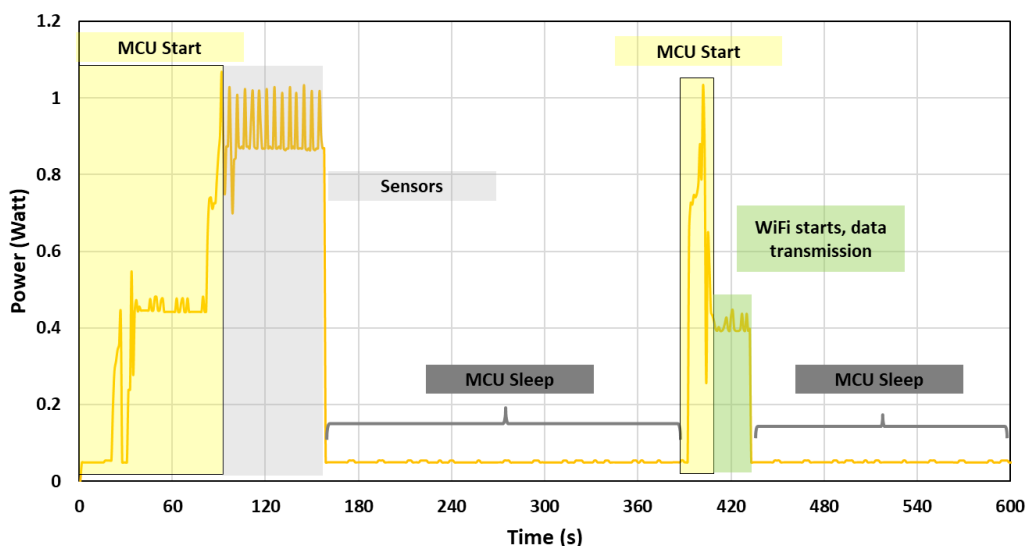


Figura 12 – Andamento temporale dell’assorbimento di potenza della scheda commerciale per un ciclo di misura.

In questa analisi comparativa sono state valutate le prestazioni di un sistema integrato a recupero energetico e di una soluzione basata su dispositivi commerciali alimentati dalla rete elettrica. I risultati mostrano che la scheda sviluppata con il recupero energetico consuma circa 1/400 dell’energia richiesta dalla controparte commerciale, sebbene le misure attualmente disponibili siano limitate a temperatura, umidità e CO₂. Per le stesse grandezze, la scheda commerciale consuma circa 80 J ogni 10 minuti, che salgono a 134 J includendo il particolato. Parametri come VOC e particolato, monitorabili con la soluzione commerciale, non sono attualmente rilevabili con la scheda a recupero energetico a causa dell’elevato consumo dei sensori dedicati.

L’analisi preliminare, condotta in due ambienti distinti—un appartamento per la soluzione commerciale e un ufficio per la scheda a recupero energetico—ha evidenziato l’influenza degli occupanti sulle misure ambientali²⁷. Fattori come la presenza di persone, l’accensione del riscaldamento e l’aerazione degli ambienti hanno generato variazioni significative nei parametri monitorati.

Sebbene il sistema a recupero energetico abbia dimostrato un buon livello di autonomia e sostenibilità, ulteriori ottimizzazioni sono necessarie per migliorarne le prestazioni, ridurre i consumi e ampliare la gamma di parametri misurabili. In particolare, l’integrazione di strategie di gestione energetica avanzate e l’adozione di sensori a basso consumo potrebbero permettere il monitoraggio di parametri aggiuntivi, avvicinando la soluzione a un’applicabilità più ampia e scalabile in contesti reali.

²⁷ In questo studio, l’attenzione è rivolta esclusivamente alla valutazione delle prestazioni energetiche dei due sistemi, con l’obiettivo di quantificare e confrontare i consumi energetici per ciclo di misura a parità di grandezze monitorate. I test sono stati quindi condotti in ambienti differenti, scelti in funzione della configurazione specifica di ciascun sistema per analizzare il fabbisogno energetico necessario a svolgere compiti equivalenti di monitoraggio.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

All'interno della LA3.2 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 LA3.2:

- 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 6(1), 015023 (2025). Redazione Ottobre 2024, sottomissione Dicembre 2025.
- G. Landi, C. Barone, S. Pagano, V. Granata, G. Avallone, L. La Notte, A.L. Palma, P. Sdringola, 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.
- G. Landi, S. Pagano, V. Granata, G. Avallone, L. La Notte, A.L. Palma, P. Sdringola, G. Puglisi, 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).
- L. La Notte, G. Landi, A.L. Palma, P. Sdringola, G. Avallone, C. Barone, 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.
- G. Landi, L. La Notte, A.L. Palma, **"Towards Environmentally Friendly Solution-Processed Hybrid Photovoltaics"**, in Encyclopedia of Renewable Energy, Sustainability and the Environment, (Elsevier, 2024), pp. 479-494.
- G. Landi, C. Barone, V. Granata, G. Avallone, C. Mauro, S. Pagano, L. La Notte, A.L. Palma, P. Sdringola, 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.

Elenco delle pubblicazioni scientifiche risultanti dall'attività svolta in collaborazione con il co-beneficiario UNIRM2_DIE_2 nella LA3.4 e con il co-beneficiario UNITO_CHIMICA nella LA3.5:

- S. Muhammad, M. Franzini, S. Galliano, M. Bonomo, C. Barolo, L. La Notte, A. Reale, **"Graphene-Based Organic Polymer Composites for Improved Thermoelectric Properties Near Room Temperature"**, 2024 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2024 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe).

Elenco delle pubblicazioni scientifiche risultanti dall'attività svolta in collaborazione con il co-beneficiario UNISA_DF nella LA3.6:

- G. Landi, G. Avallone, C. Barone, 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).

- G. Avallone, G. Landi, V. Granata, L. La Notte, A.L. Palma, P. Sdringola, G. Puglisi, S. Pagano, C. Barone, **"A comparative evaluation of IoT electronic solutions for energy harvesting"**, Nano Express 5(3), 032001(2024).
- G. Avallone, G. Landi, V. Granata, L. La Notte, A.L. Palma, P. Sdringola, G. Carapella, G. Puglisi, S. Pagano, C. Barone, **"Electrochemical Properties of Sustainable Nanomaterial-Based Supercapacitors"**, in 2023 IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference (NMDC), (IEEE, 2023), pp. 872–876.
- V. Granata, G. Landi, C. Barone, G. Avallone, L. La Notte, A.L. Palma, P. Sdringola, G. Carapella, G. Puglisi, S. Pagano, **"Eco-friendly carbon-based supercapacitors: Electrochemical properties and charge storage mechanisms"**, Il Nuovo Cimento, 47, 2024.

10 Eventi di disseminazione

Elenco degli eventi di disseminazione risultanti dall'attività svolta nella 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, 27 novembre 2024, Roma. **"Studio e applicazione di soluzioni innovative per il recupero e l'accumulo di energia e per il monitoraggio degli edifici"**, presentazione orale (G. Landi, A.L. Palma, L. La Notte).

URL: <https://www.eventi.enea.it/eventi/eventi-in-primo-piano/dedicato-a/media/piano-triennale-di-realizzazione-della-rds-i-risultati-dei-progetti-1-5-e-1-6.html>

- Energia in Casa - Tecnologie per la produzione di energia da fonte rinnovabile, evento organizzato da EduAmbiente - Laboratorio di Citizen Science, Liceo Don Carlo La Mura, 21 novembre 2024, Angri (SA). **"Innovative solutions for sustainable energy storage and sensing technologies for indoor monitoring"**, presentazione orale (G. Landi).
- Workshop on technologies and innovative solutions for energy efficiency, Università degli Studi di Salerno, 18 ottobre 2024.

"Building-level solutions for energy efficiency", presentazione orale (A.L. Palma).

"Innovative solutions for sustainable energy storage and sensing technologies for indoor monitoring", presentazione orale (G. Landi).

URL: <https://conferences.phys.unisa.it/tisee24/>

- 24th International Conference on Environment and Electrical Engineering (IEEE-EEEIC), 17-20 giugno 2024, Roma. **"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).
- NIS Colloquium Innovative solutions for energy recovery and storage, and buildings monitoring, Università di Torino, 23 febbraio 2024.

"Project overview: motivation and objectives", presentazione orale (L. La Notte - A.L. Palma).

"Materials and devices for transient and sustainable electronics", presentazione orale (G. Landi).

URL: https://www.nis.unito.it/colloquia/NIS_2024_02_23/program.php

- XXII Conferenza Nazionale Sensori e Microsistemi (AISEM 2024), 7-9 febbraio 2024, Bologna. **"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, NOI Techpark/Eurac Research, 11 – 12 giugno 2024, Bolzano. **“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).
- PSMA International Energy Harvesting Workshop, 26-28 giugno 2024, Perugia.
 - “Challenges in Eco-friendly Sensor Integration in Energy Harvesting”**, presentazione orale (G. Landi - Invited).
 - “Supercapacitors Based on Sustainable Materials from Renewable Resources”**, presentazione orale (G. Landi - Invited).
- Nanotechnology Materials and Devices Conference (NMDC'24), 22-24 ottobre 2023, Paestum (SA). **“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, G. Puglisi, presentazione orale (G. Landi - Invited).
- **Riunioni di Progetto**. L'obiettivo di queste riunioni è il coordinamento tra ENEA (LA3.1-3.2) e i co-beneficiari (LA3.3-3.6) sia sulla parte tecnica che su quella gestionale, con un focus sul confronto e la sintesi dei risultati ottenuti (Figura 13). Inoltre, le riunioni contribuiscono alla disseminazione dei risultati, sia all'interno dell'ambiente accademico che verso un pubblico più ampio.
 - Partecipazione a meeting di LA3.1-3.6, Torino 22 febbraio 2024: coordinamento tecnico e gestionale con i co-beneficiari, con discussione sui risultati ottenuti e pianificazione delle fasi future, con particolare attenzione alla disseminazione accademica.
 - Partecipazione a meeting di LA3.1-3.6, Roma 16 luglio 2024: interazione con i co-beneficiari per fare sintesi dei progressi e pianificazione delle fasi successive.
 - Partecipazione a meeting di LA3.1-3.6, Salerno 17 ottobre 2024: incontro per il coordinamento dei lavori con i co-beneficiari, con focus sulla sintesi dei risultati ottenuti e disseminazione.



Figura 13 – Fotografie delle tre riunioni di progetto con i co-beneficiari sia sulla parte tecnica delle linee di attività che su quella gestionale.

Elenco degli eventi di disseminazione risultanti dall'attività svolta in collaborazione con il co-beneficiario UNIRM2_DIE_2 nella LA3.4:

- Presentazione orale **“Printable Thermoelectric Devices Based on Organic Semiconductor Composite for Low-Temperature Grade Energy Harvesting”**, S. Muhammad, F. Zarotti, A. Reale, M. Franzini, S. Galliano, M. Bonomo, C. Barolo, L. La Notte, 40th International Conference on Thermoelectrics - ICT/ECT2024, Krakow, Polonia, 4 luglio 2024.
- Presentazione orale **“Graphene-Based Organic Polymer Composites for Improved Thermoelectric Properties Near Room Temperature”**, S. Muhammad, M. Franzini, S. Galliano, M. Bonomo, C. Barolo, L. La Notte, A. Reale, 2024 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2024 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe), Roma, 17-20 Giugno 2024.

Elenco degli eventi di disseminazione risultanti dall'attività svolta in collaborazione con il co-beneficiario UNITO_CHIMICA nella LA3.5:

- **Simposio a carattere internazionale - NIS colloquium “Innovative solutions for energy recovery and storage, and buildings monitoring”** (23/02/2024), organizzato dal gruppo MOF del dipartimento di Chimica di UNITO in collaborazione con ENEA (URL: https://www.nis.unito.it/colloquia/NIS_2024_02_23/). Relatori invitati: Prof.ssa Marina Freitag (Università di Newcastle), Prof. Eugene Katz (Università di Ben-Gurion) e Prof. Andrea reale, Prof.ssa Marilena Carbone, Aldo di Carlo (Università di Roma Tor Vergata), Prof. Alberto Castellero (Università di Torino), Prof. Lorenzo Maschio (Università di Torino), Dr. Guerino Avallone (Università di Salerno), Dr. Giovanni Landi (ENEA), Dr. Luca

La Notte (ENEA), Dr. Alessandro Lorenzo Palma (ENEA) e Dr. Alessandro Piovano (Politecnico di Torino).

Elenco degli eventi di disseminazione risultanti dall'attività svolta in collaborazione con il co-beneficiario UNISA_DF nella LA3.6:

- 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. Presentazione orale (G. Landi).
- 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, 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"**, V. Granata, G. Landi, C. Barone, G. Avallone, L. La Notte, A.L. Palma, P. Sdringola, G. Carapella, G. Puglisi, S. Pagano, presentazione orale (Granata V.).
- **"Workshop on technologies and innovative solutions for energy efficiency"**, Università degli Studi di Salerno, 18 ottobre 2024, organizzato dal Dipartimento di Fisica di UNISA in collaborazione con ENEA (URL: <https://conferences.phys.unisa.it/tisee24/>). Relatori invitati: Dr. Marcello Franzini (Università di Torino), Prof. Luigi Vesce (Università di Roma Tor Vergata), Dr. Giovanni Landi (ENEA), Prof. Carmine Attanasio (Università degli Studi di Salerno), Prof. Andrea Reale (Università di Roma Tor Vergata), Dr. Alessandro Lorenzo Palma (ENEA), Prof. Antonio Di Bartolomeo (Università degli Studi di Salerno), Prof. Maria Sarno (Università degli Studi di Salerno).

Le altre attività di disseminazione che hanno coinvolto i co-beneficiari sono riportate nei relativi rapporti tecnici.