

**MISSION
INNOVATION**

accelerating the clean energy revolution

POA MATERIALI AVANZATI PER L'ENERGIA**PROGETTO IEMAP - Piattaforma Italiana Accelerata per i Materiali per
l'Energia**

D4.49 - Dati sperimentali generali

Stefano Rampino, Edmondo Gilioli, Francesco Pattini

Consiglio Nazionale
delle Ricerche

D4.49 - Dati sperimentali generali

Stefano Rampino (CNR), Edmondo Gilioli (CNR), Francesco Pattini (CNR)

Dicembre 2024

Report MISSION INNOVATION

Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA

Mission Innovation 2021-2024 - III annualità

Progetto: Piattaforma accelerata per i Materiali per l'Energia

Work package: 4

Linea di attività 4.18: Progettazione top-down dei dispositivi integrati e simulazioni elettro-ottiche: analisi multiscala dei risultati ottenuti nelle linee LA4.10 e LA4.15 e benchmarking

Responsabile del Progetto: Massimo Celino (ENEA)

Responsabile della LA: Stefano Rampino (CNR)

Indice

1	Risultati attesi	6
2	Risultati ottenuti.....	6
2.1	Avanzamento della ricerca rispetto allo stato dell'arte internazionale con riferimento ai risultati ottenuti.....	6
3	Prodotti attesi	6
4	Prodotti ottenuti	6
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati	6
6	Sintesi delle attività svolte	7
7	Dettaglio delle attività svolte	7
8	Pubblicazioni scientifiche	8
9	Eventi di disseminazione	8
10	Descrizione dei risultati ottenuti	8
10.1	Dispositivi di benchmark.....	8
10.1.1	<i>Celle solari</i>	8
10.1.2	<i>Batteria al Litio</i>	13
10.1.3	<i>Supercapacitori EDLC</i>	17
10.1.4	<i>Supercapacitori Ibridi</i>	20
10.2	Dispositivi sperimentali delle LA4.12 e 4.15	24
10.2.1	<i>Dispositivi 4.12</i>	24
10.2.2	<i>Dispositivi 4.15</i>	25

Indice delle figure

- Figura 1 - Schema delle due possibili configurazioni dei sistemi accoppiati Fotovoltaico+Accumulo.
- Figura 2 - Cella solare IBC senza incapsulamento.
- Figura 3 - Cella solare IBC incapsulata mediante laminazione roll-to-roll.
- Figura 4 - Caratteristiche IV sotto illuminazione della cella solare IBC utilizzata per i dispositivi di benchmark (laminata e non laminata).
- Figura 5 - Spettro di External Quantum Efficiency della cella solare utilizzata per i dispositivi di benchmark (laminata e non laminata).
- Figura 6 - Parametri elettrici della cella solare utilizzata per i dispositivi di benchmark (laminata e non laminata).
- Figura 7 – Cella solare usata per i dispositivi di benchmark: confronto tra curva sperimentale e curva calcolata mediante il modello a 5 parametri.
- Figura 8 - Caratteristiche IV sotto illuminazione a 0.9 sun di un modulo composto da 4 celle solari di benchmark collegate in serie.
- Figura 9 – Caratteristiche IV sotto illuminazione a 0.9 sun delle singole celle del modulo composto da 4 celle solari di benchmark collegate in serie.
- Figura 10 - Immagine di elettroluminescenza di un modulo PV composto da 4 celle solari di benchmark collegate in serie.
- Figura 11 – Immagine termografica di un modulo PV composto da 4 celle solari di benchmark collegate in serie.
- Figura 12 – Immagine termografica di un modulo composto da 4 celle solari di benchmark collegate in serie. L'immagine è presa in condizioni di corto-circuito (I_{sc}).
- Figura 13 - Immagine termografica di un modulo composto da 4 celle solari di benchmark collegate in serie. L'immagine è presa in condizioni di circuito aperto (V_{oc}).
- Figura 14 - Tipologia di batteria utilizzata per il benchmark: Samsung INR18650 – 3000mAh.
- Figura 15 - Curva di scarica della batteria utilizzata per il benchmark.
- Figura 16 - Tempo di scarica della batteria di benchmark in funzione di diverse correnti di scarica.
- Figura 17 - Curva di carica a 1C della batteria INR Samsung utilizzata per il benchmark.
- Figura 18 - Velocità di carica della batteria di benchmark a diverse correnti di carica.
- Figura 19 - Curva di scarica della batteria di benchmark a potenza costante di 10W.
- Figura 20 - Misura della resistenza interna della batteria di benchmark.
- Figura 21 - Test di carica della batteria di benchmark mediante un modulo solare da 7 celle.
- Figura 22 - Tipologia di supercap EDLC utilizzato come il benchmark.
- Figura 23 - Curva di carica di un supercap di benchmark (2.7V -500F) con corrente di carica di 0.9A.
- Figura 24 - Misura della resistenza interna di un supercapacitore di benchmark (2.7V -500F), che è ottenuta dal fit della curva della discontinuità di voltaggio (freccia) in funzione della resistenza variabile messa in serie al supercap.
- Figura 25 - Scarica di un Supercap EDLC di benchmark (2.7V – 500F) mediante un carico costante di 1W.
- Figura 26 - Curve di scarica dei supercapacitori ad alta capacità utilizzati come benchmark a differenti correnti di scarica.
- Figura 27 - Curva di carica dei supercapacitori ad alta capacità (3000F) utilizzati come benchmark ad una corrente costante di 1A.
- Figura 28 – Carica di un Supercap EDLC di 1F con una corrente di carica di 1 A.
- Figura 29 - Carica di un supercap ibrido di benchmark alimentato da una cella con correnti di 0.9A.
- Figura 30 - Scarica di un Supercap Ibrido di benchmark a corrente di scarica costante di 1A.

Figura 31 - Ciclo di scarica/carica di un supercap ibrido di benchmark (3.8V -220F) utilizzando correnti di 1A.

Figura 32 - Scarica profonda del supercap ibrido di benchmark utilizzando un carico a potenza costante di 15W.

Figura 33 - Scarica profonda a corrente costante = -1A di un supercapacitore ibrido di benchmark.

Figura 34 - Scarica lenta a corrente costante = -0.1A di un supercapacitore ibrido di benchmark.

Figura 35 - Stress test di scarica in corto circuito e carica a 10A di un supercapacitore ibrido di benchmark.

Figura 36 - Curva di carica sotto illuminazione di un dispositivo 4.12 basato su elettrodo di TiO_2 .

Figura 37 - Curva di carica sotto illuminazione di un dispositivo 4.12 basato su elettrodo di WO_3 .

Figura 38 – Test di cortocircuito sotto illuminazione di un dispositivo 4.12 basato su elettrodo di WO_3 .

Figura 39 - Carica di un dispositivo accoppiato cella 4.15 e supercap a bassa capacità (1F).

Figura 40 - Corrente di autoscarica del dispositivo accoppiato 4.15 PV+Batteria.

Figura 41 – Cella PV 4-15 + Batteria 4.15: andamento delle correnti rispettivamente della cella PV (arancione) e del carico da 50 μW (blu) durante un ciclo di carica sotto illuminazione in luce diffusa.

1 Risultati attesi

Ottimizzazione dei dispositivi di benchmark che, per come sono concepiti, costituiranno la soluzione a maggiore efficienza fra quelle studiate in questo progetto, anche se a discapito di altre proprietà fondamentali come la trasparenza, il costo e la flessibilità strutturale.

2 Risultati ottenuti

Sono state ottenute tre diverse tipologie di dispositivi discreti di Fotovoltaico+Accumulo a tre terminali. Questi dispositivi sono stati testati per comprendere il funzionamento, i vantaggi ed i limiti dei dispositivi integrati sperimentali realizzati nel corso di questo progetto.

2.1 Avanzamento della ricerca rispetto allo stato dell'arte internazionale con riferimento ai risultati ottenuti

I dispositivi integrati monoliticamente fotovoltaico + accumulo sono sistemi che combinano la generazione di energia solare e lo stoccaggio di energia in un'unica unità compatta e integrata. Questi sistemi sono progettati per essere installati in modo semplice e per ottimizzare l'uso dell'energia prodotta dalle celle fotovoltaiche, immagazzinando l'energia in eccesso per un utilizzo successivo. In letteratura è presente un numero molto limitato di esempi di questi sistemi. Questo progetto è servito per chiarire i criteri di modelling e di caratterizzazione di questi sistemi, in modo da ottimizzarne l'efficienza energetica.

3 Prodotti attesi

Dispositivi ibridi di benchmark, dispositivi sperimentali realizzati nelle LA4.12 e LA4.15

4 Prodotti ottenuti

Sono stati prodotti una serie di prototipi di benchmark differenti nei quali, al modulo di Si cristallino, è stato accoppiato un dispositivo di accumulo differente: batteria agli ioni di Litio, supercapacitore e supercapacitore ibrido. Sono stati prodotti una serie di dispositivi sperimentali nelle LA4.12 e LA4.15 che sono stati poi testati nei laboratori IMEM applicando gli stessi criteri dei dispositivi di benchmark.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

I risultati ottenuti corrispondono pienamente a quanto previsto, sia sul piano tecnico che finanziario. Non si sono verificate deviazioni rispetto agli obiettivi stabiliti in partenza.

6 Sintesi delle attività svolte

Sono state misurate sperimentalmente le performance dei dispositivi prototipali di benchmark fotovoltaico+accumulo e dei dispositivi sperimentali delle LA4.12 e LA4.15, variando le condizioni operative (irradianza, corrente di carica, carico alimentato, etc.).

7 Dettaglio delle attività svolte

I dispositivi realizzati e testati durante tutto il progetto ricadono nella categoria dei sistemi accoppiati fotovoltaico+accumulo. Questi sistemi possono essere realizzati in due configurazioni:

- 1- **Configurazione a tre terminali.** Cella solare e dispositivo di accumulo condividono un elettrodo. La cella solare carica la batteria fino a raggiungere il voltaggio massimo, pari alla V_{oc} della cella. Il carico viene collegato al sistema connettendolo in parallelo con cella e accumulo.
- 2- **Configurazione a due terminali.** La cella solare e il dispositivo di accumulo sono fondamentalmente lo stesso dispositivo. Un elettrodo del dispositivo è realizzato in modo da accumulare le cariche fotogenerate. Sotto illuminazione viene immagazzinata carica sull'elettrodo foto-ricaricabile, raggiungendo un voltaggio massimo che dipende dai potenziali di reazione che avvengono all'interfaccia. Il carico viene collegato poi al sistema connettendolo ai due elettrodi.

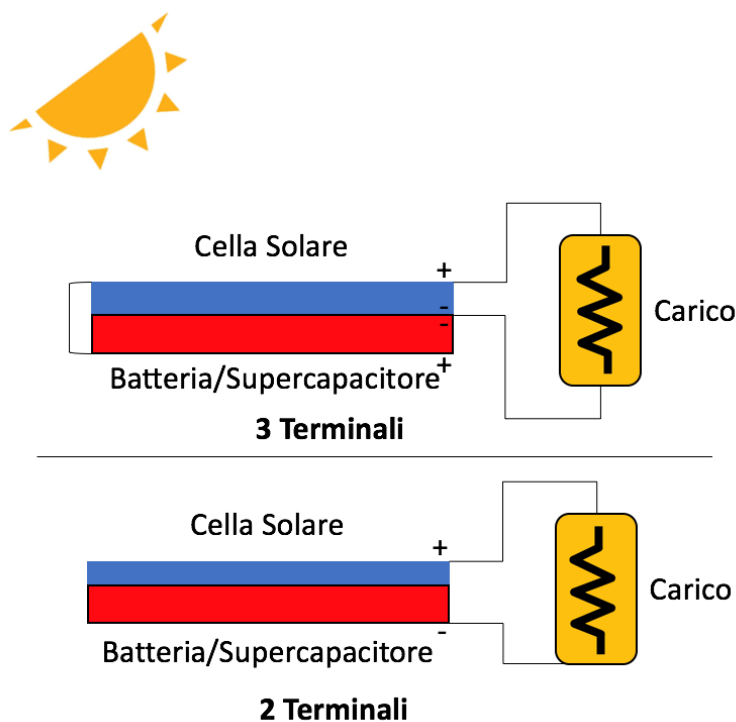


Figura 1 - Schema delle due possibili configurazioni dei sistemi accoppiati Fotovoltaico+Accumulo.

Sono stati realizzati e testati molteplici dispositivi di benchmark, disaccoppiati ed accoppiati tra di loro. Infine, sono stati testati i dispositivi sperimentali realizzati nelle LA4.12 e LA4.15. I test sono stati ottenuti in condizioni variabili di:

- Irradianza: compresa tra 0.05 sun e 1 sun
- Carico: potenze variabili tra 0.1 W e 5W

8 Pubblicazioni scientifiche

«*Dynamic Analysis of a Supercapacitor DC-Link in Photovoltaic Conversion Applications*», Energies 2023, 16(16), 5864

9 Eventi di disseminazione

- IEMAP Training Course: *Technologies for the Accelerated Design of Materials for Energy*
- Seminario: «*Numerical Modeling of PV-based Energy Systems from Devices to Renewable Energy Communities*» c/o IMEM, 23/09/24
- «Laboratorio di Sostenibilità» c/o IMEM – CNR, Edizioni 2023 e 2024
- Contributo Orale 3^a Conferenza ICECCME: «*Simulation of Supercapacitor Charge and Discharge in Photovoltaic Applications*»

10 Descrizione dei risultati ottenuti

10.1 Dispositivi di benchmark

10.1.1 Celle solari

La scelta delle celle solari è ricaduta verso il silicio monocristallino, che è ampiamente disponibile in diverse varianti tecnologiche come PERC, TOPCon, IBC e HJT. Per via della necessità di creare dispositivi personalizzati, con la possibilità di collegare più celle in serie in base alle diverse configurazioni, la scelta è ricaduta sulle celle IBC (Interdigitated Back Contact). Queste celle hanno entrambi i contatti elettrici sul retro, il che rende più semplice saldare (e dissaldare) i nastri metallici per collegare le celle in serie. Inoltre, l'assenza di contatti sulla superficie esposta all'irraggiamento permette di produrre più corrente elettrica a parità di superficie, poiché non ci sono elementi metallici a bloccare la luce solare.

I risultati sperimentali delle caratterizzazioni delle celle di benchmark sono riportati qui sotto.

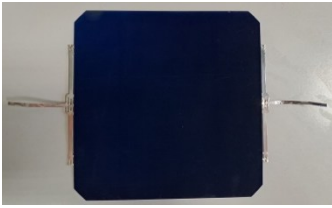


Figura 2 - Cella solare IBC senza incapsulamento

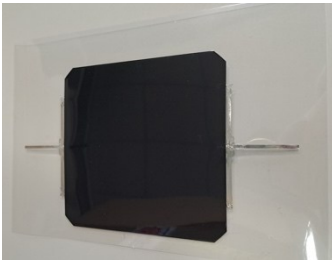


Figura 3 - Cella solare IBC incapsulata mediante laminazione roll-to-roll

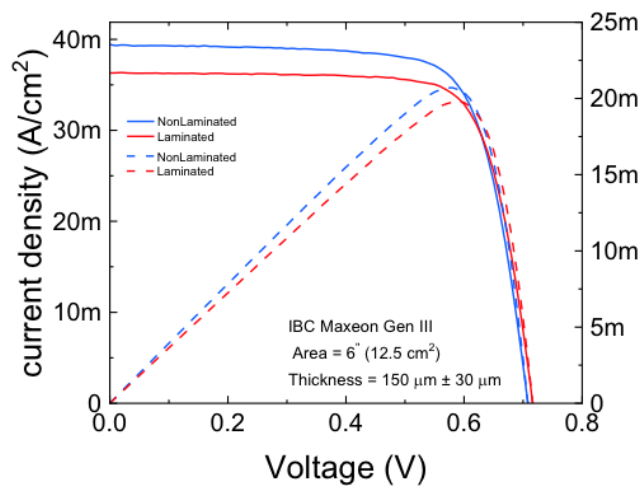


Figura 4 - Caratteristiche IV sotto illuminazione della cella solare IBC utilizzata per i dispositivi di benchmark (laminata e non laminata).

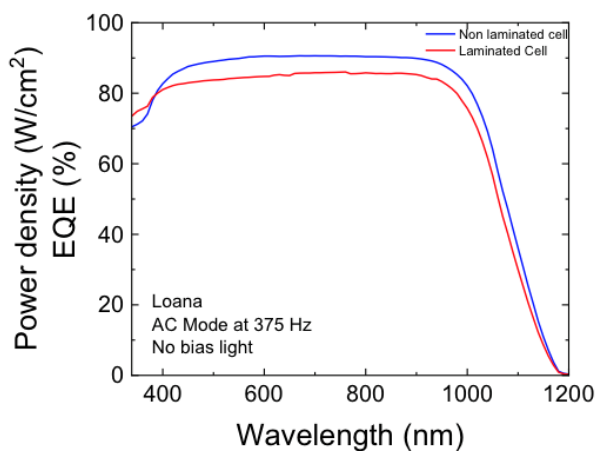
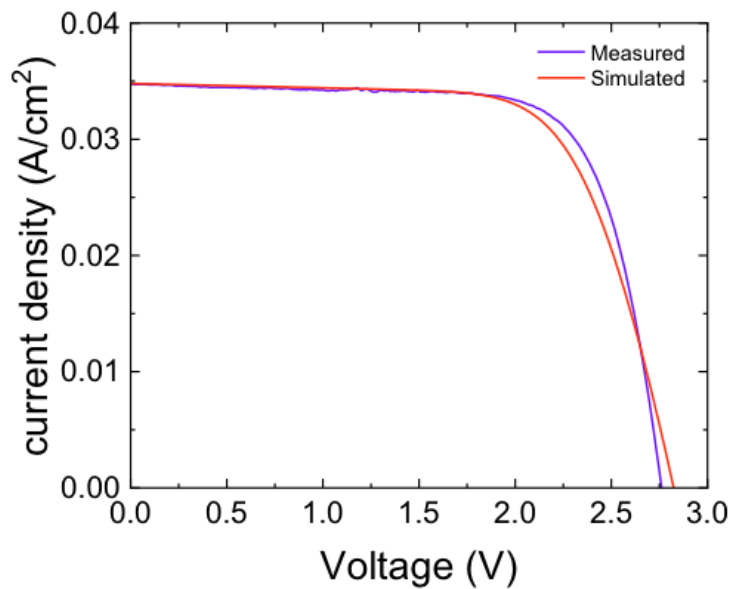


Figura 5 - Spettro di External Quantum Efficiency della cella solare utilizzata per i dispositivi di benchmark (laminata e non laminata).

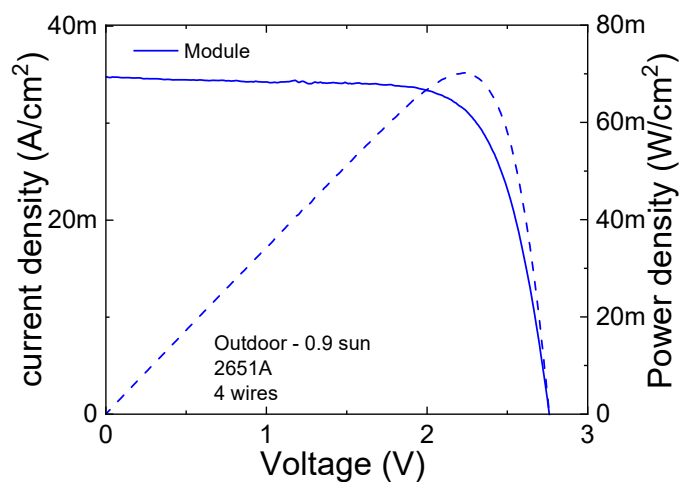
Cell Type	Voc (mV)	Jsc (mA/cm^2)	Isc (A)	FF (%)	Eff (%)
Non laminated	708.17	39.42	6.16	74.16	20.71
Laminated	716.32	36.30	5.67	76.12	19.79

Figura 6 - Parametri elettrici della cella solare utilizzata per i dispositivi di benchmark (laminata e non laminata).



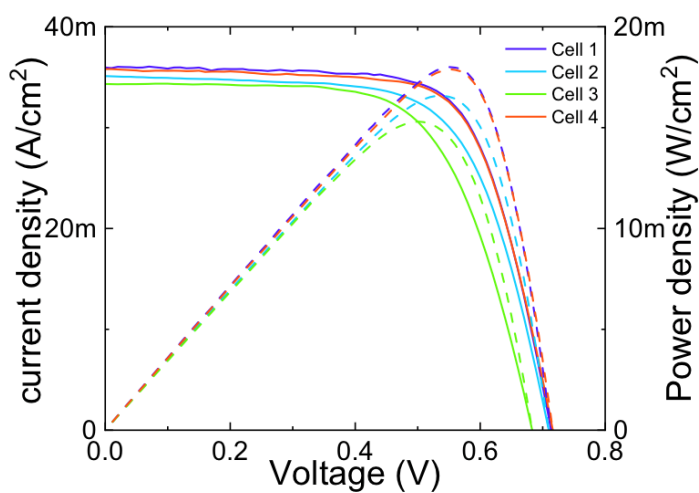
$J_0(\text{Acm}^{-2})$	n	$R_s(\Omega\text{cm}^2)$	$R_{sh}(\Omega\text{cm}^2)$	$J_{ph}(\text{Acm}^{-2})$
8.39E-11	1.39	2.01	594.69	36.01

Figura 7 – Cella solare usata per i dispositivi di benchmark: confronto tra curva sperimentale e curva calcolata mediante il modello a 5 parametri.



Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	Pmp (W)	FF (%)	Eff (%)
2.76	34.78	10.739	73.09	19.49

Figura 8 - Caratteristiche IV sotto illuminazione a 0.9 sun di un modulo composto da 4 celle solari di benchmark collegate in serie.



	Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	Eff (%)
1	0.713	36.01	70.09	18.01
2	0.709	35.04	66.67	16.58
3	0.683	34.36	65.17	15.30
4	0.716	35.77	69.89	17.90

Figura 9 – Caratteristiche IV sotto illuminazione a 0.9 sun delle singole celle del modulo composto da 4 celle solari di benchmark collegate in serie.

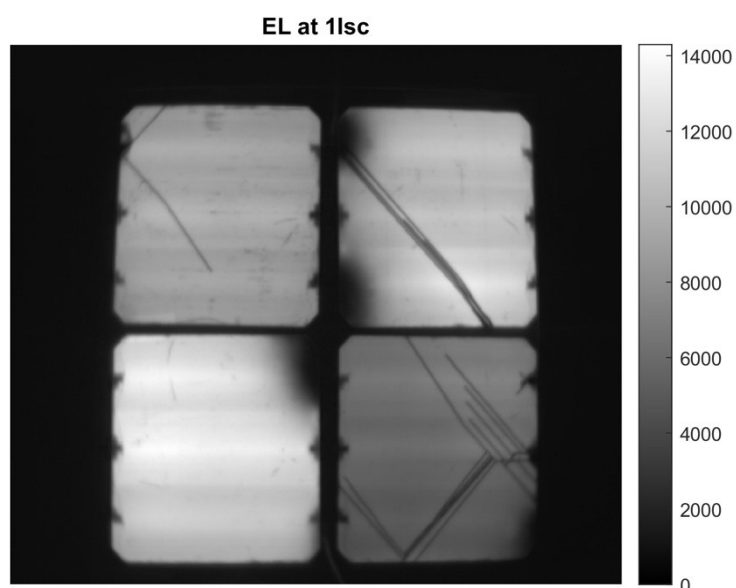


Figura 10 - Immagine di elettroluminescenza di un modulo PV composto da 4 celle solari di benchmark collegate in serie.

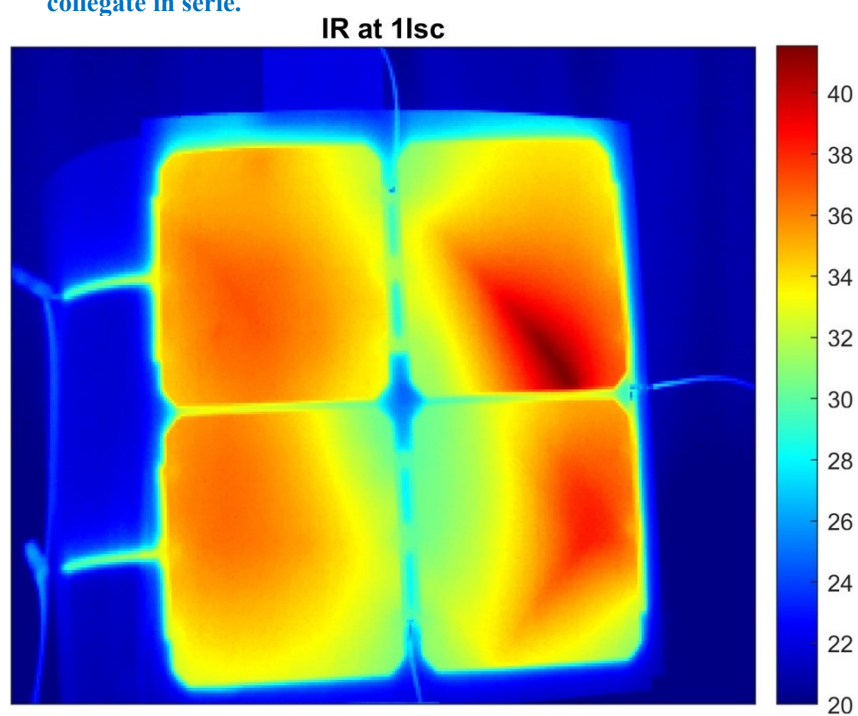


Figura 11 – Immagine termografica di un modulo PV composto da 4 celle solari di benchmark collegate in serie.

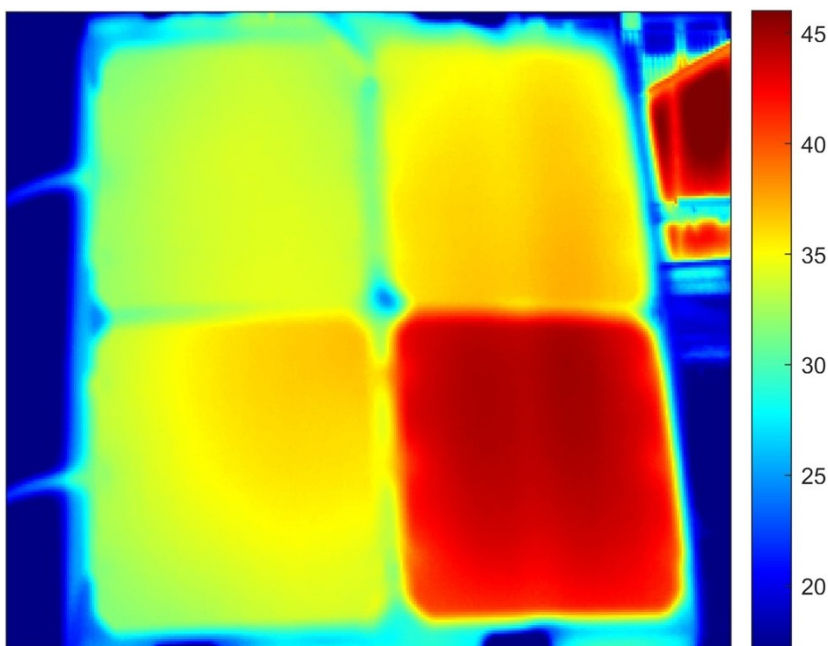


Figura 12 – Immagine termografica di un modulo composto da 4 celle solari di benchmark collegate in serie. L'immagine è presa in condizioni di corto-circuito (Isc).

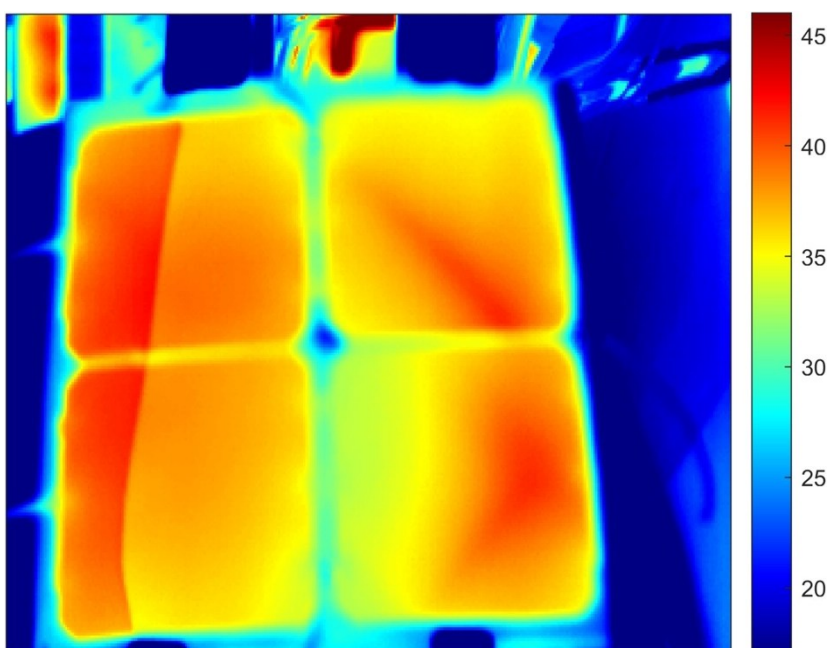


Figura 13 - Immagine termografica di un modulo composto da 4 celle solari di benchmark collegate in serie. L'immagine è presa in condizioni di circuito aperto (Voc).

10.1.2 Batteria al Litio

Sono state utilizzate batterie al Litio commerciali con tecnologia INR (Catodo basato su Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide), una delle tecnologie più sicure, più stabili in varie condizioni di temperatura e con le più alte velocità di scarica senza effetti collaterali in termini di sicurezza elettrica e chimica.

I risultati sperimentali delle caratterizzazioni delle batterie di benchmark sono riportati qui sotto.



Figura 14 - Tipologia di batteria utilizzata per il benchmark: Samsung INR18650 – 3000mAh.

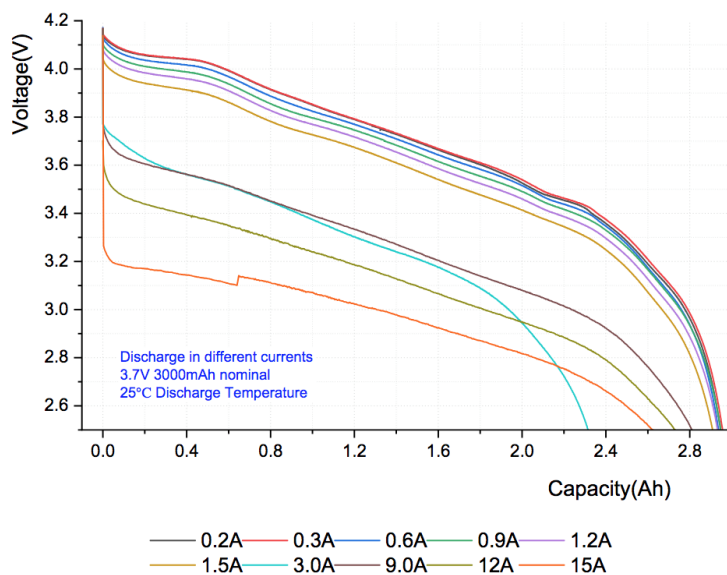


Figura 15 - Curva di scarica della batteria utilizzata per il benchmark.

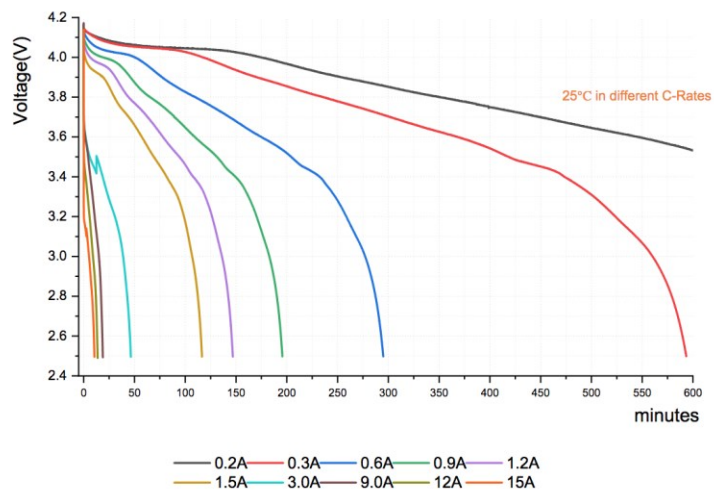


Figura 16 - Tempo di scarica della batteria di benchmark in funzione di diverse correnti di scarica.

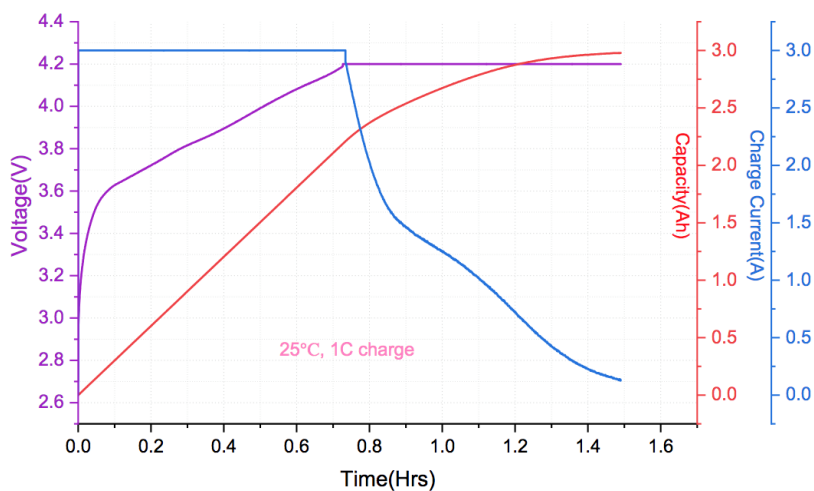


Figura 17 - Curva di carica a 1C della batteria INR Samsung utilizzata per il benchmark.

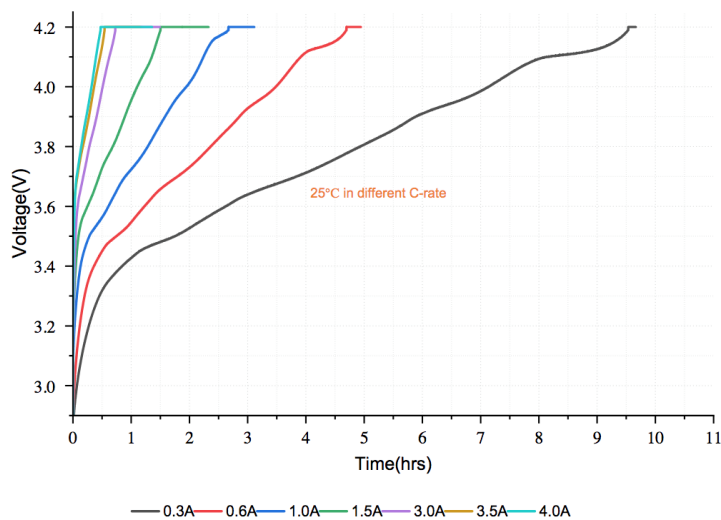


Figura 18 - Velocità di carica della batteria di benchmark a diverse correnti di carica.

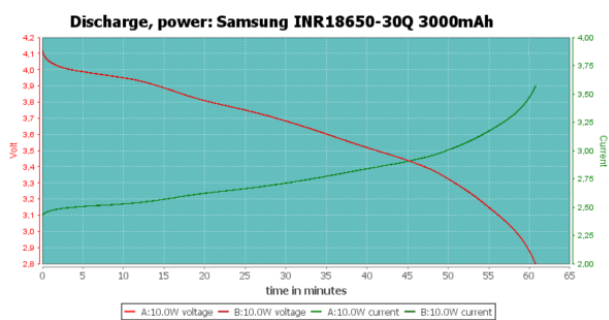


Figura 19 - Curva di scarica della batteria di benchmark a potenza costante di 10W.

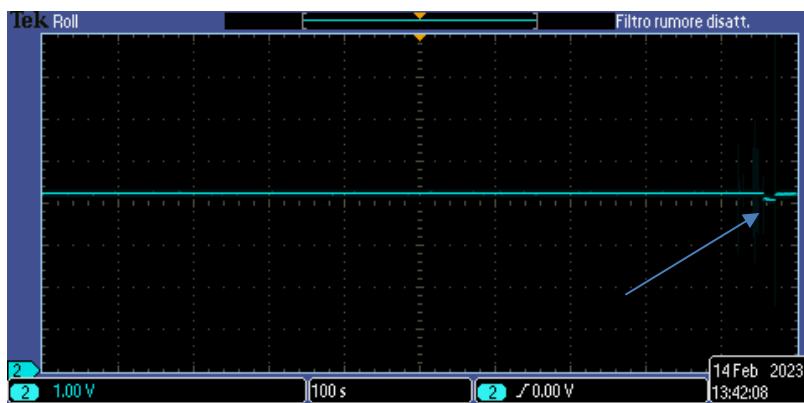


Figura 20 - Misura della resistenza interna della batteria di benchmark.

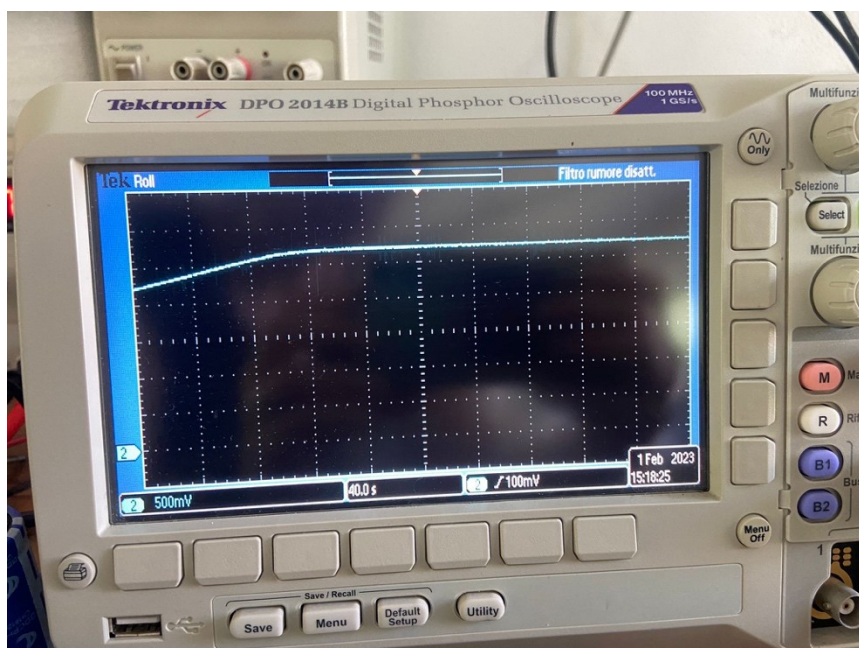


Figura 21 - Test di carica della batteria di benchmark mediante un modulo solare da 7 celle.

10.1.3 Supercapacitori EDLC

Tra le decine di tipologie diverse di supercapacitori, ci siamo concentrati sui cosiddetti “Electric Double Layer Capacitors” (EDLC), supercapacitori in grado di immagazzinare una grande quantità di carica (fino a 3000 Farad), ma con voltaggi di carica ridotti e compatibili con l’output dei minimoduli solari (tra 1 e 6 V).

I risultati sperimentali delle caratterizzazioni dei supercap di benchmark sono riportati qui sotto.



Figura 22 - Tipologia di supercap EDLC utilizzato come il benchmark.



Figura 23 - Curva di carica di un supercap di benchmark (2.7V -500F) con corrente di carica di 0.9A .

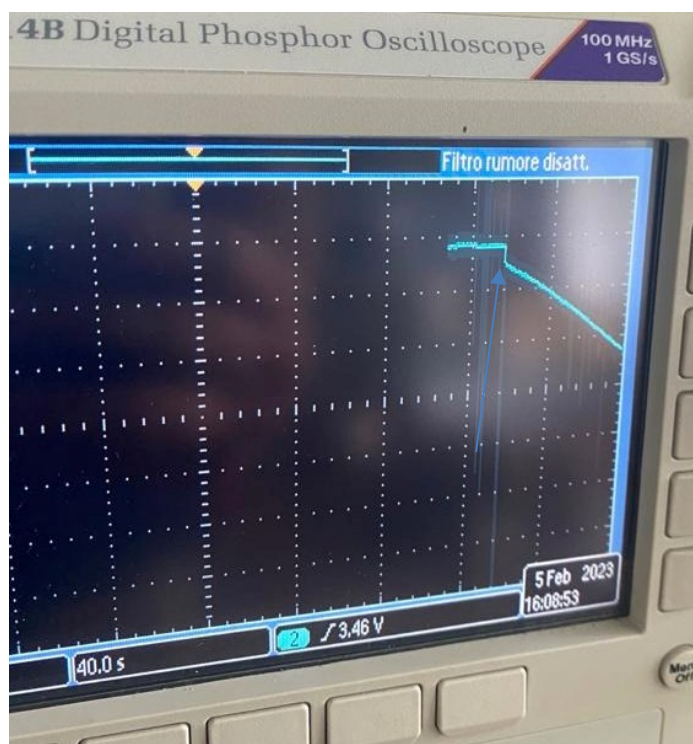


Figura 24 - Misura della resistenza interna di un supercapacitore di benchmark (2.7V -500F), che è ottenuta dal fit della curva della discontinuità di voltaggio (freccia) in funzione della resistenza variabile messa in serie al supercap.

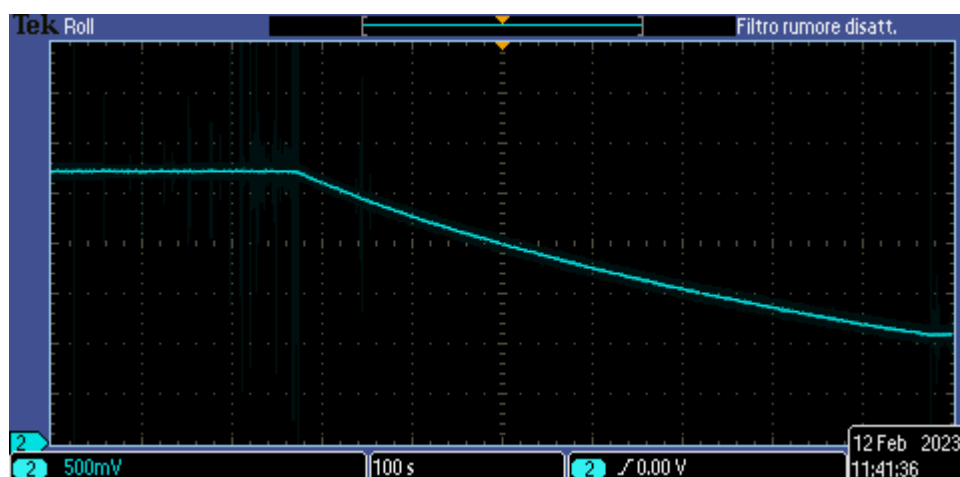


Figura 25 - Scarica di un Supercap EDLC di benchmark (2.7V – 500F) mediante un carico costante di 1W.

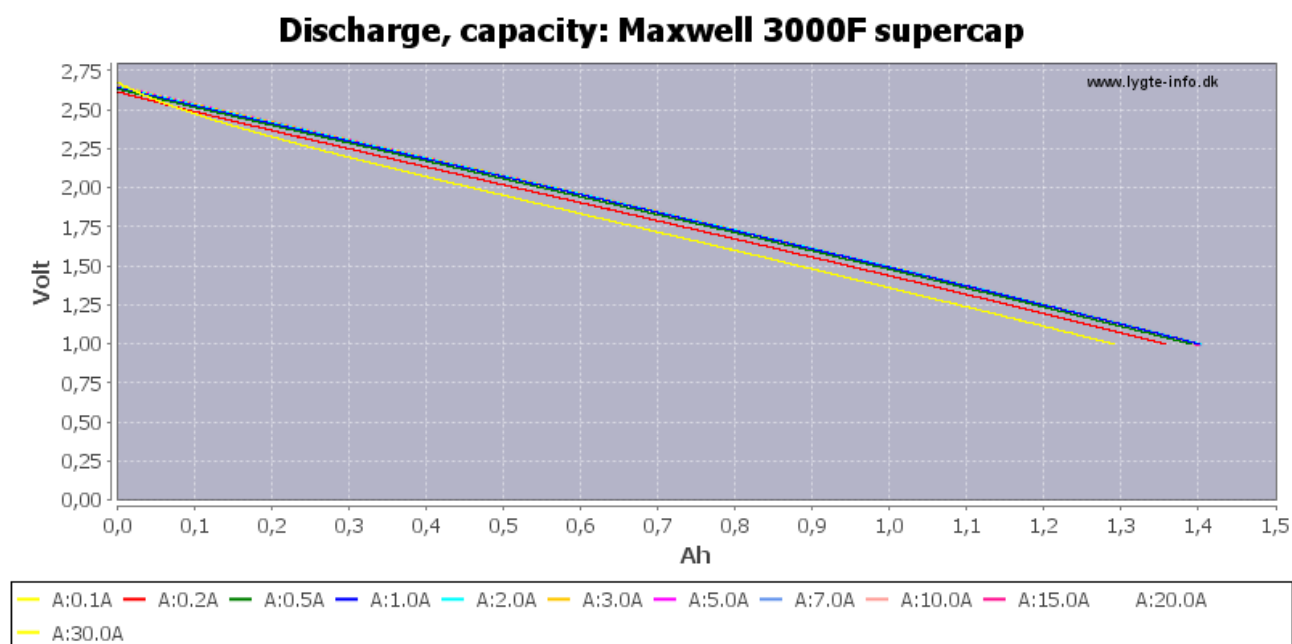


Figura 26 - Curve di scarica dei supercapacitori ad alta capacità utilizzati come benchmark a differenti correnti di scarica.

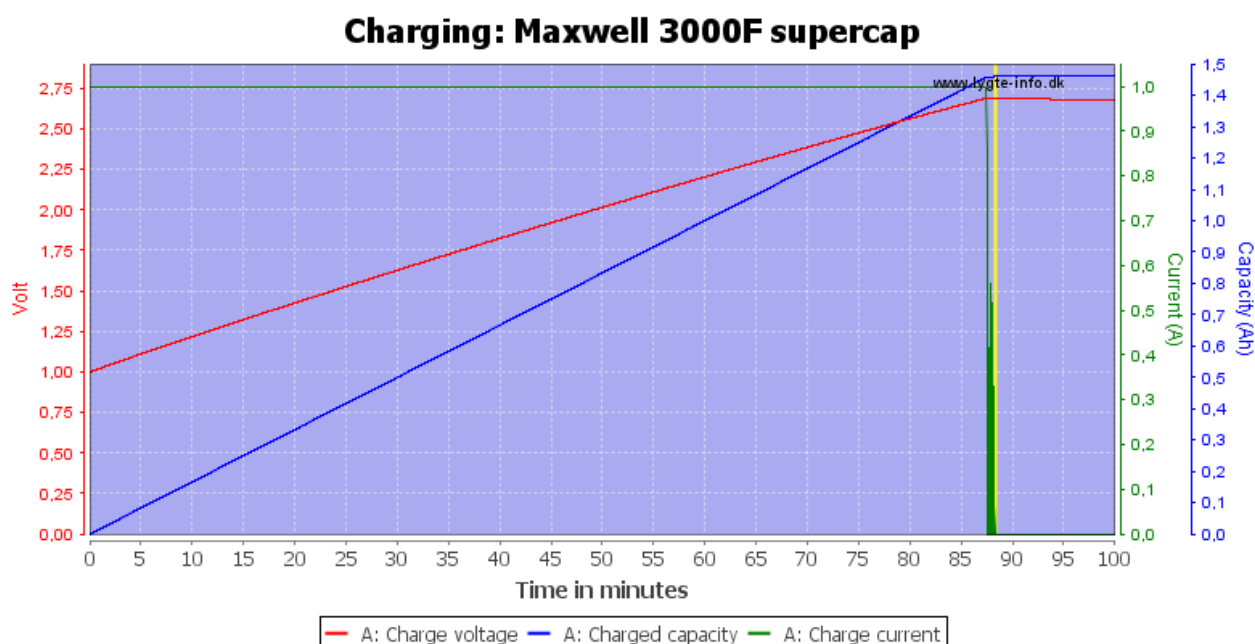


Figura 27 - Curva di carica dei supercapacitori ad alta capacità (3000F) utilizzati come benchmark ad una corrente costante di 1A.

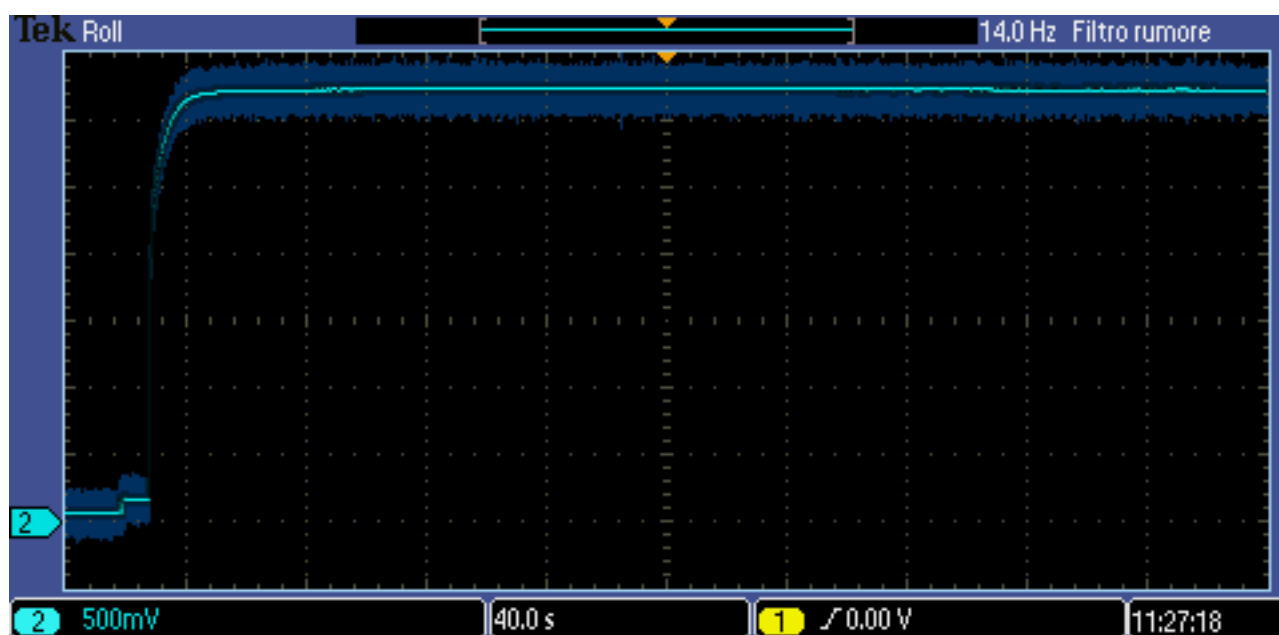


Figura 28 – Carica di un Supercap EDLC di 1F con una corrente di carica di 1 A.

10.1.4 Supercapacitori Ibridi

I supercapacitori ibridi sono dispositivi di accumulo di energia che combinano le caratteristiche dei supercondensatori tradizionali con quelle delle batterie elettrochimiche. Il loro obiettivo è migliorare il compromesso tra densità di energia (tipica delle batterie al Litio) e densità di potenza (tipica dei supercondensatori EDLC). Per ottenere questo compromesso, utilizzano

due elettrodi diversi, uno simile a quello di una batteria (materiali come ossidi di metallo o carboni modificati) e l'altro tipico di un supercondensatore (carbonio poroso).

I risultati sperimentali delle caratterizzazioni dei supercap ibridi di benchmark sono riportati di seguito.

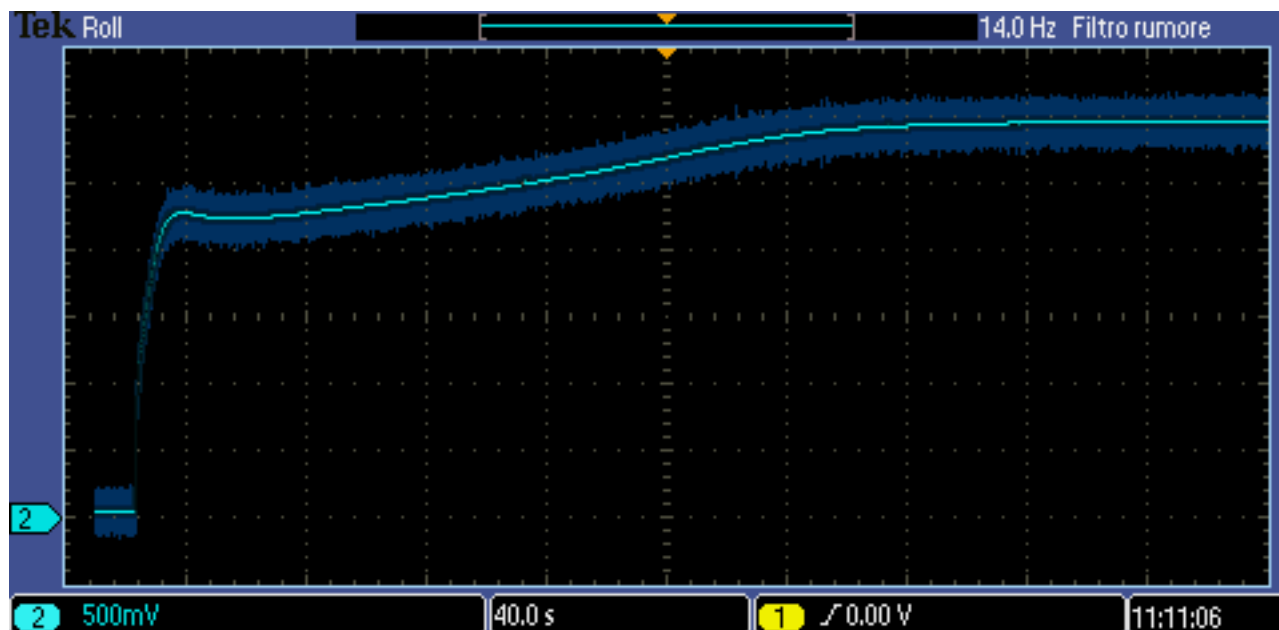


Figura 29 - Carica di un supercap ibrido di benchmark alimentato da una cella con correnti di 0.9A.

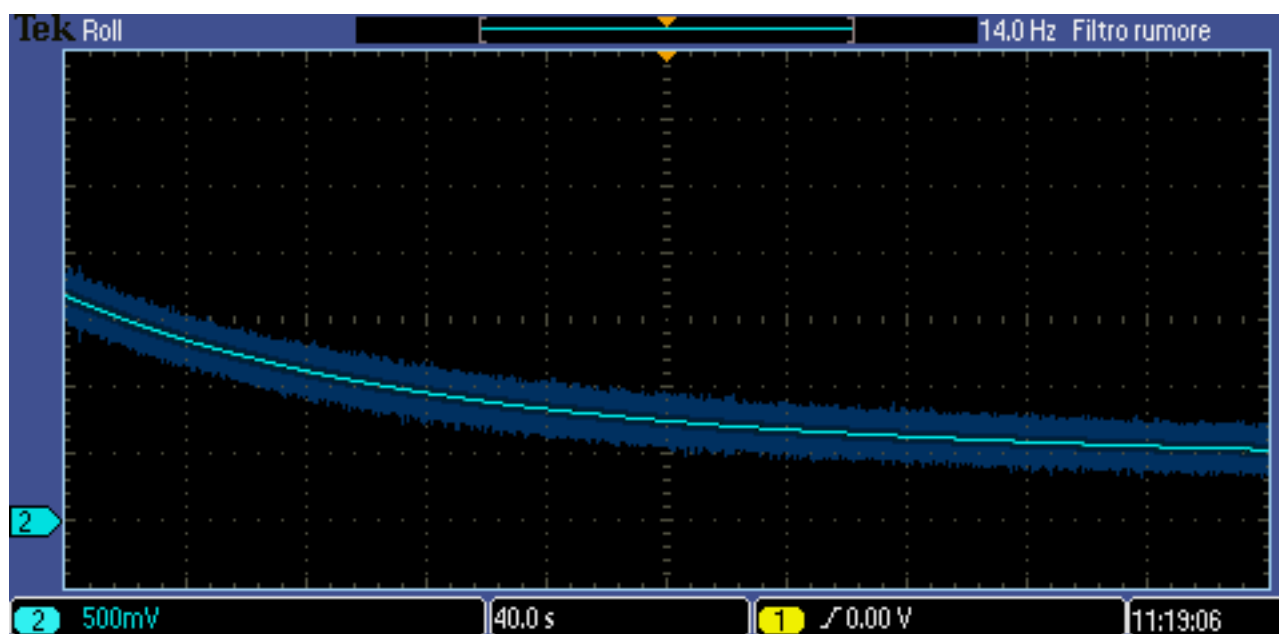


Figura 30 - Scarica di un Supercap Ibrido di benchmark a corrente di scarica costante di 1A.

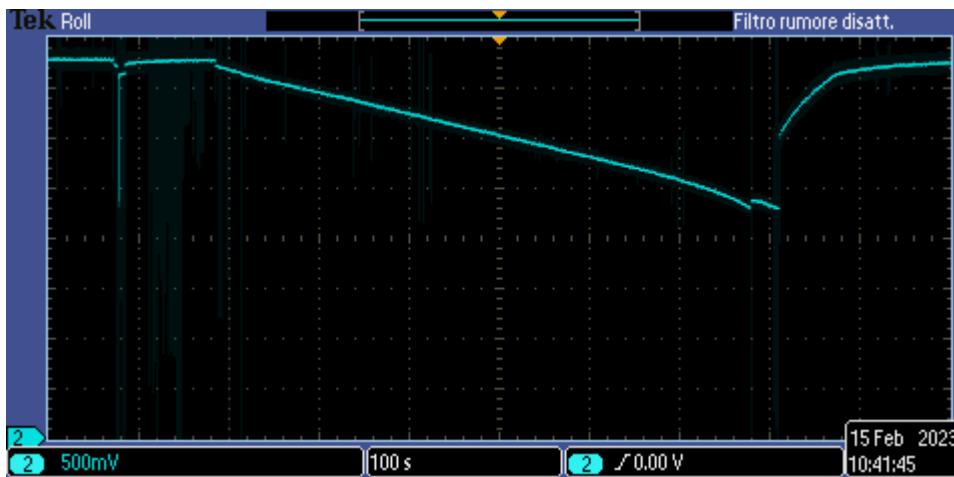


Figura 31 - Ciclo di scarica/carica di un supercap ibrido di benchmark (3.8V -220F) utilizzando correnti di 1A.

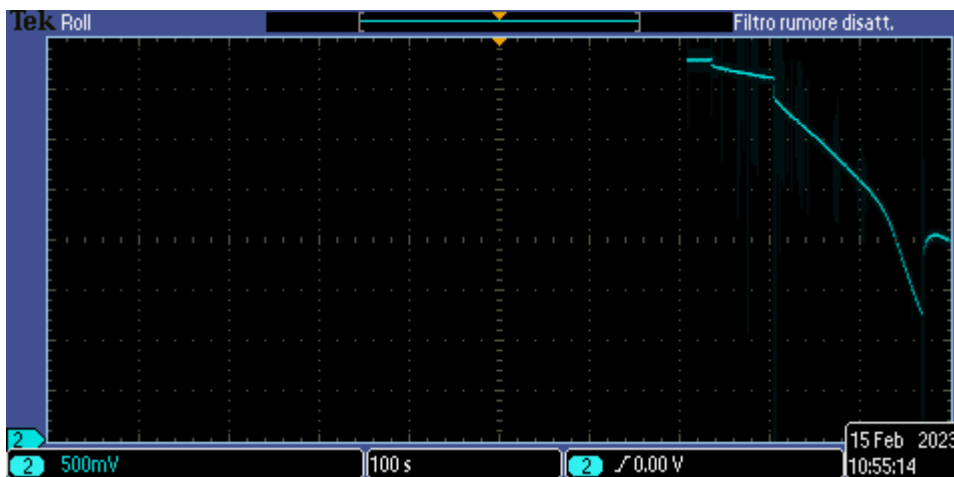


Figura 32 - Scarica profonda del supercap ibrido di benchmark utilizzando un carico a potenza costante di 15W.

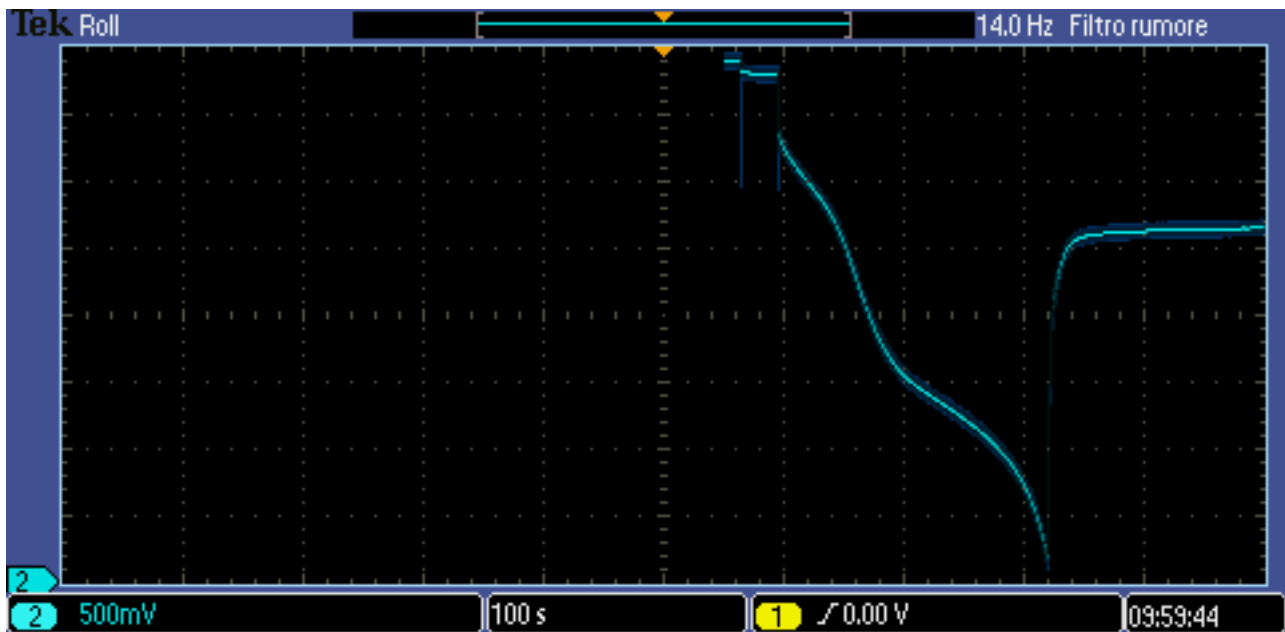


Figura 33 - Scarica profonda a corrente costante = -1A di un supercapacitore ibrido di benchmark.

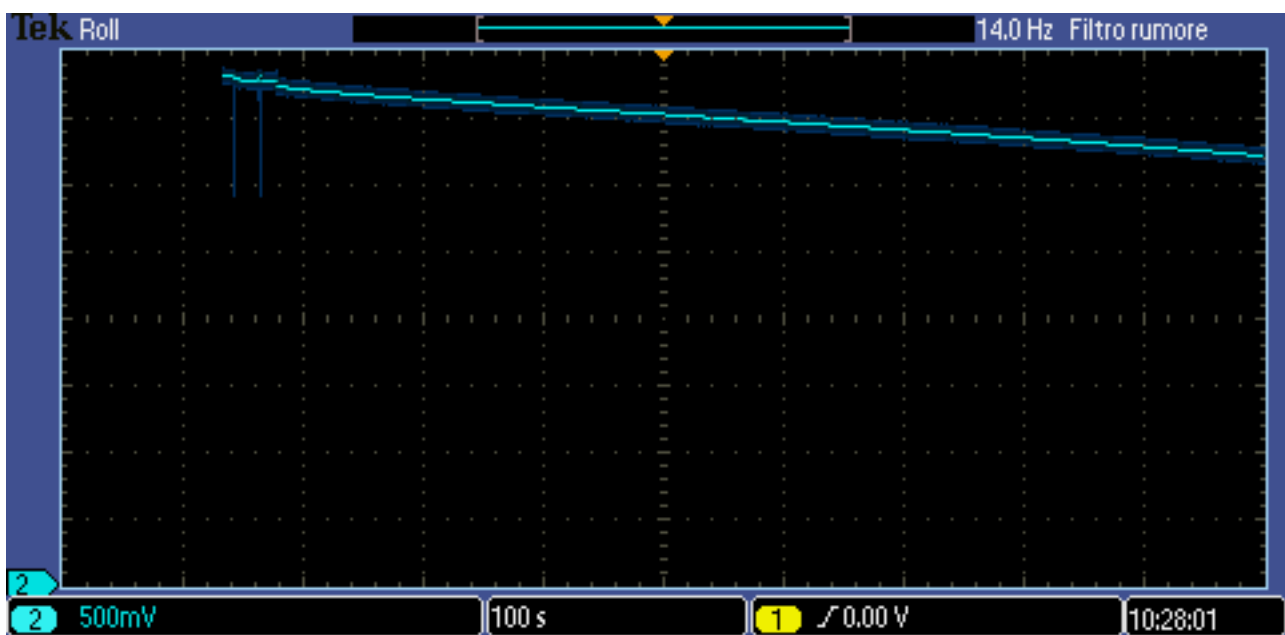


Figura 34 - Scarica lenta a corrente costante = -0.1A di un supercapacitore ibrido di benchmark.

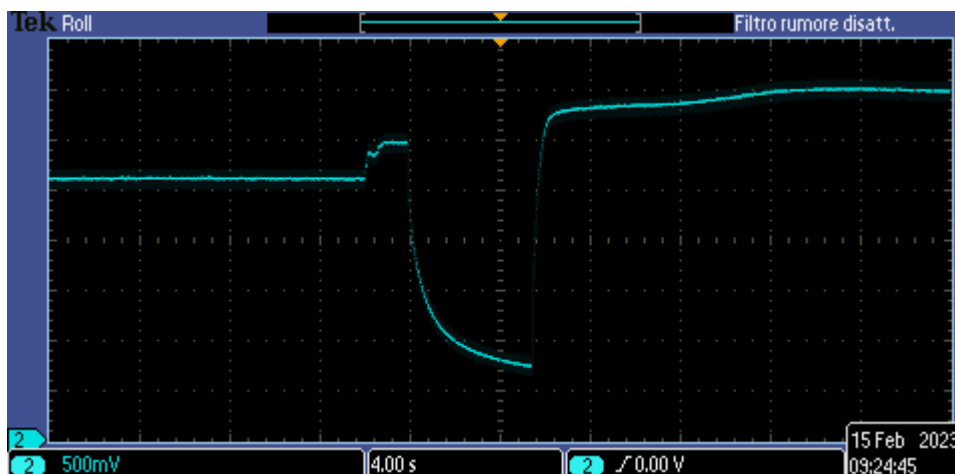


Figura 35 - Stress test di scarica in corto circuito e carica a 10A di un supercapacitore ibrido di benchmark.

10.2 Dispositivi sperimentali delle LA4.12 e 4.15

10.2.1 Dispositivi 4.12

I dispositivi a due terminali sviluppati all'interno delle LA4.10; 4.11; 4.12 sono stati ampiamente descritti nei report D4.47 e D.48. Qui di seguito sono riportate tutte le curve sperimentali non mostrate negli altri deliverable, ricavate da dispositivi non ottimizzati o da stress-test.

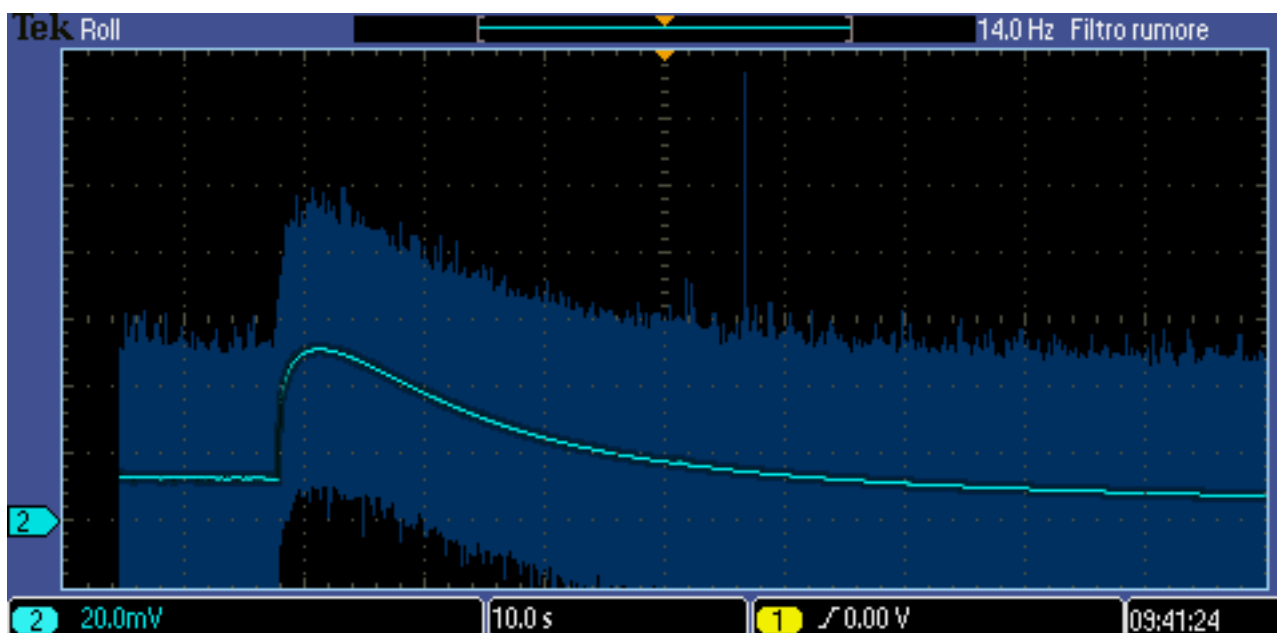


Figura 36 - Curva di carica sotto illuminazione di un dispositivo 4.12 basato su elettrodo di TiO₂.

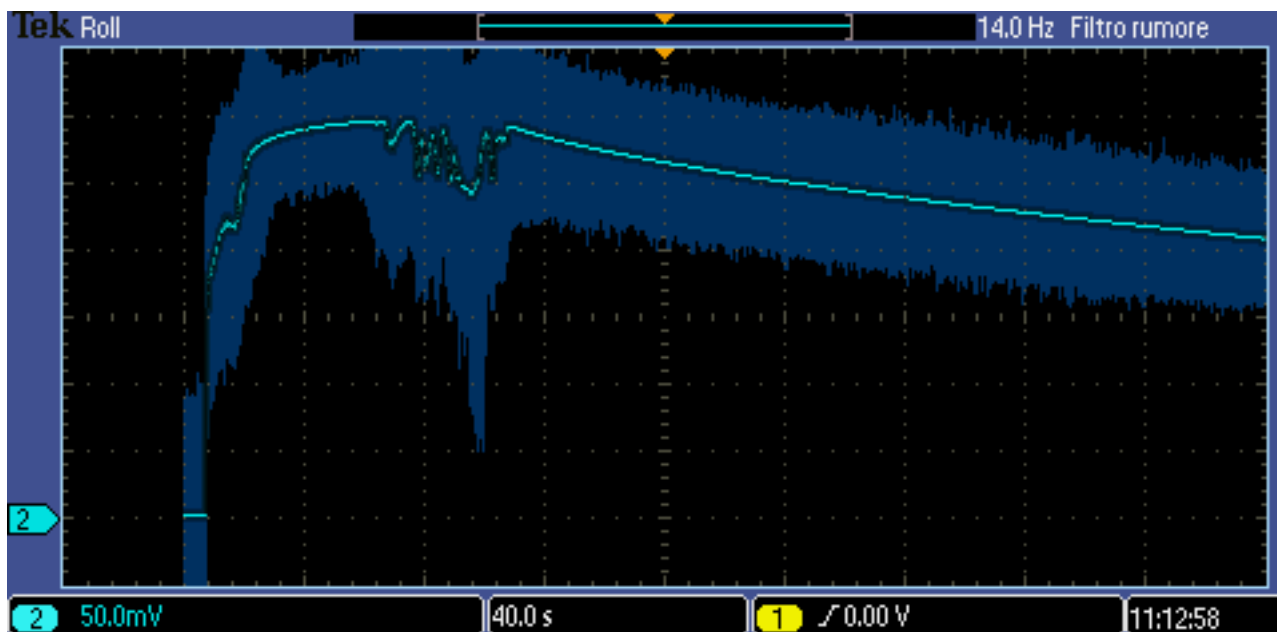


Figura 37 - Curva di carica sotto illuminazione di un dispositivo 4.12 basato su elettrodo di WO_3 .

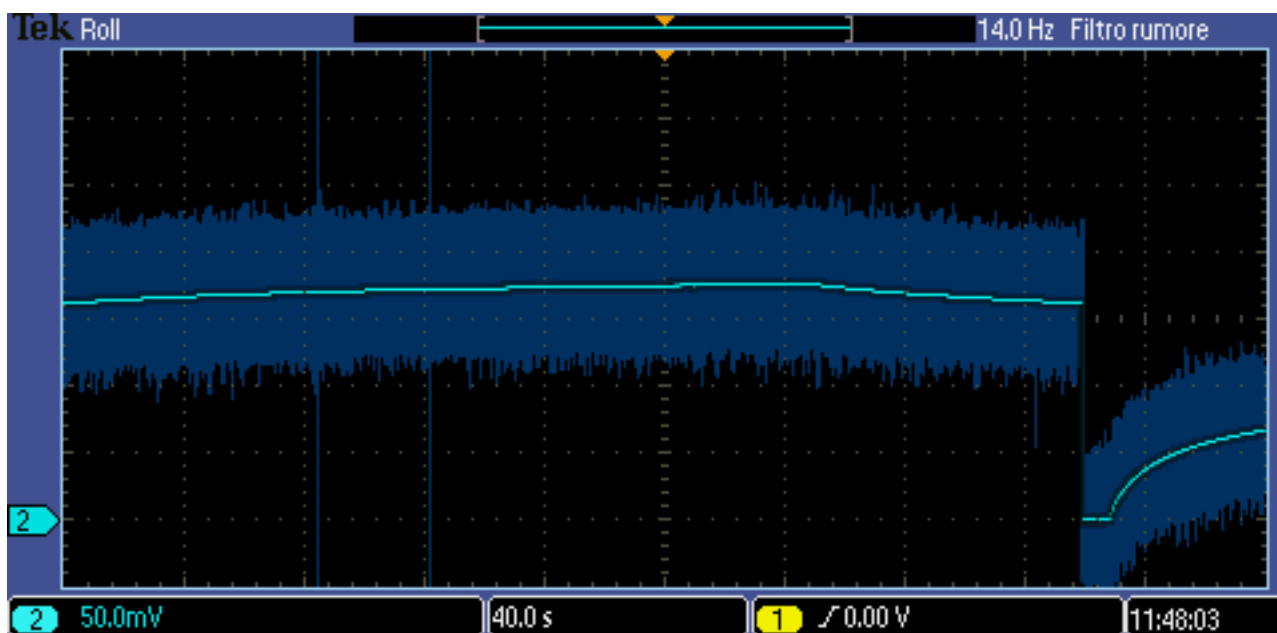


Figura 38 – Test di cortocircuito sotto illuminazione di un dispositivo 4.12 basato su elettrodo di WO_3 .

10.2.2 Dispositivi 4.15

I dispositivi a due terminali sviluppati all'interno delle LA4.13; 4.14; 4.15 sono stati ampiamente descritti nei report D4.47 e D.48. Qui di seguito sono riportate tutte le curve sperimentali non mostrate negli altri deliverable, ricavate da dispositivi non ottimizzati o da stress-test.

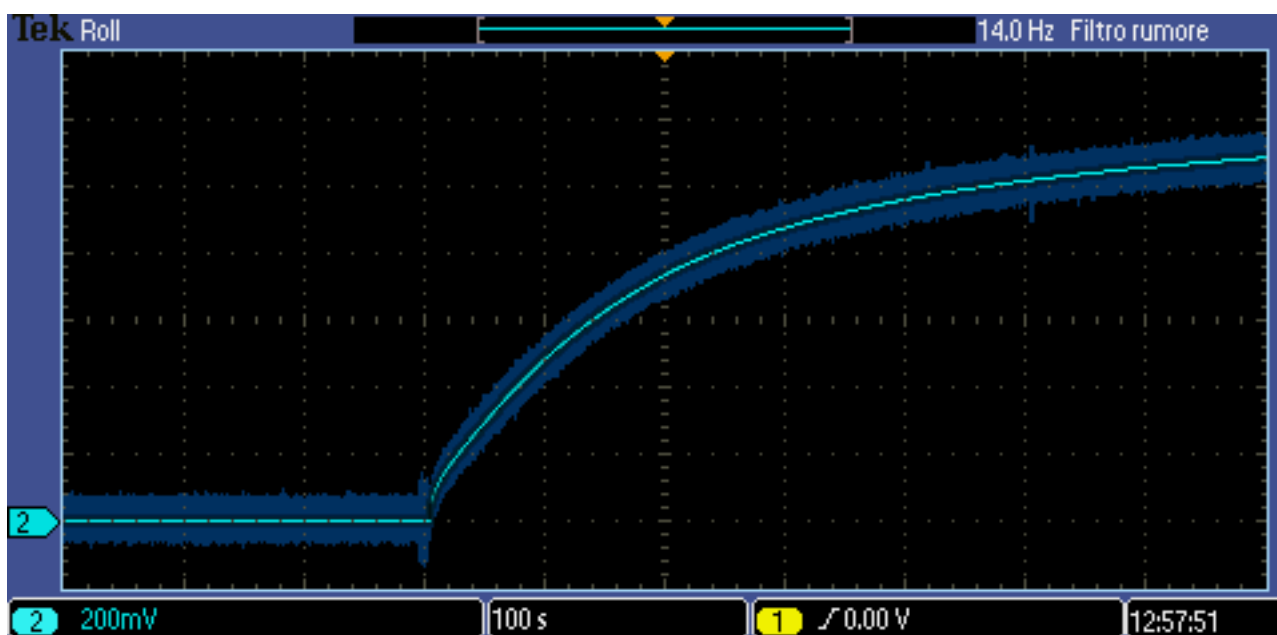


Figura 39 - Carica di un dispositivo accoppiato cella 4.15 e supercap a bassa capacità (1F).

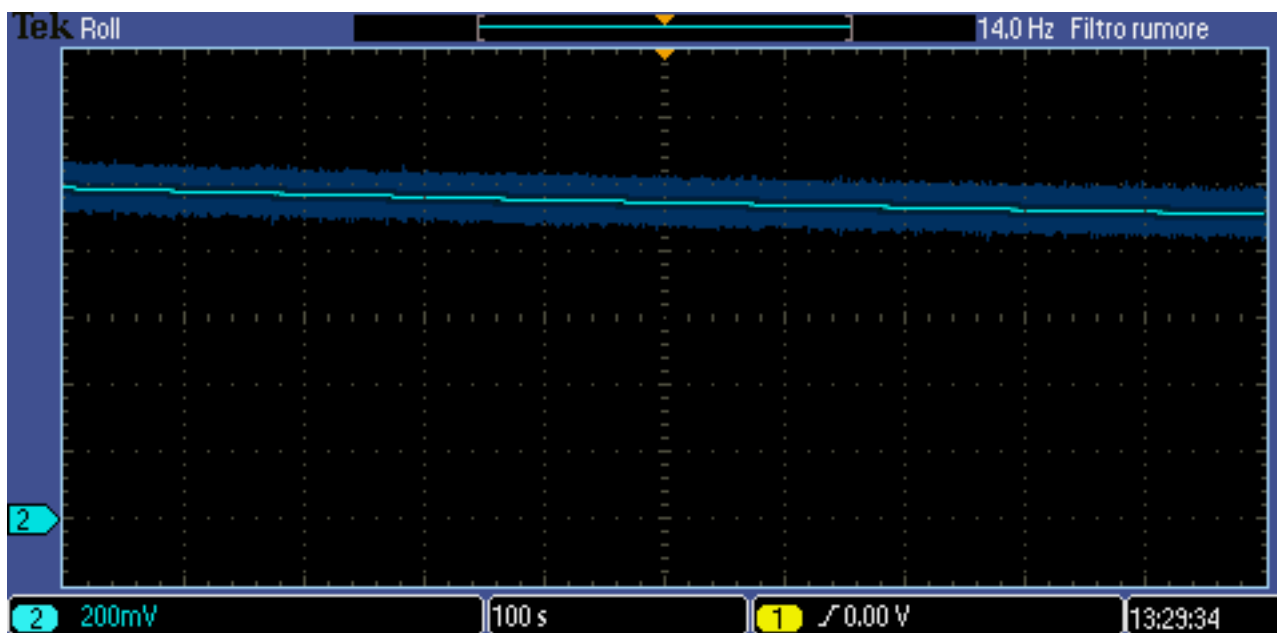


Figura 40 - Corrente di autoscarica del dispositivo accoppiato 4.15 PV+Batteria.

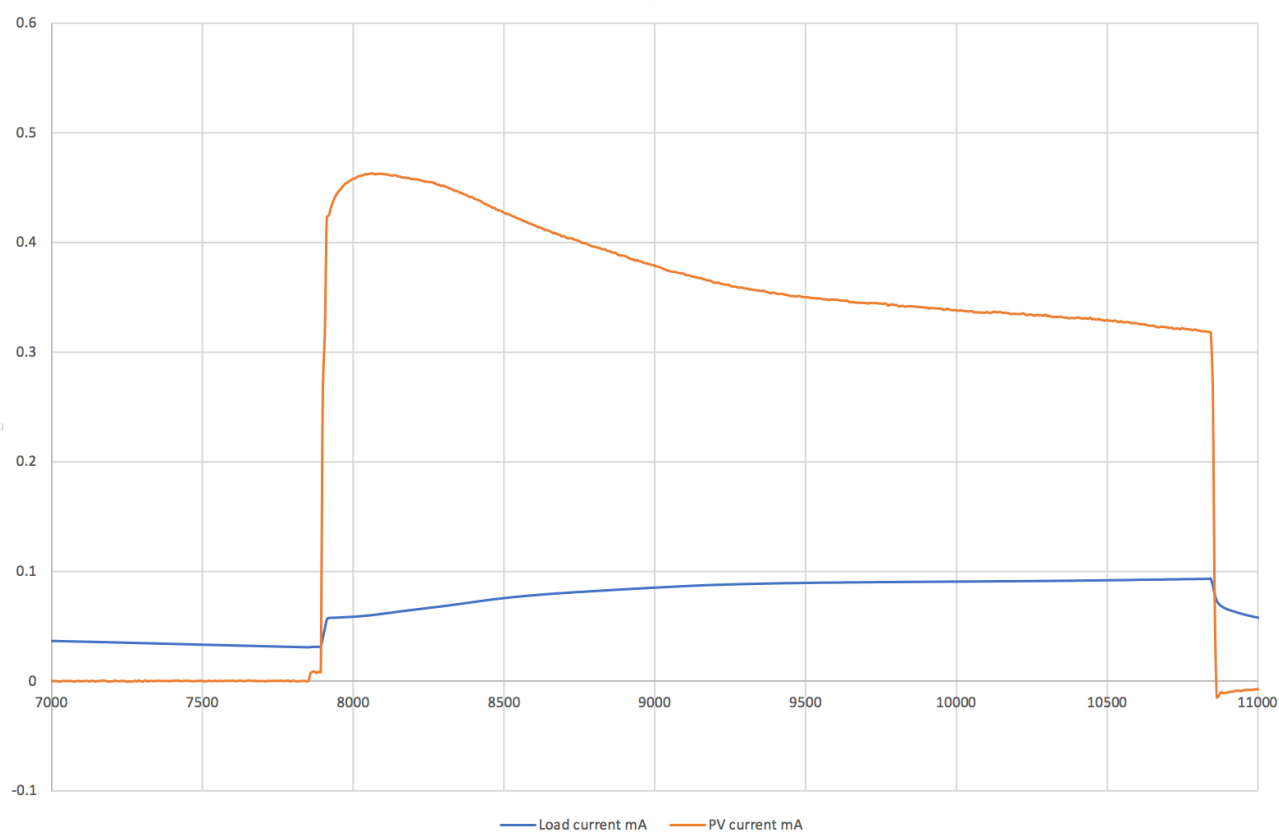


Figura 41 – Cella PV 4-15 + Batteria 4.15: andamento delle correnti rispettivamente della cella PV (arancione) e del carico da 50 μ W (blu) durante un ciclo di carica sotto illuminazione in luce diffusa.