

**MISSION
INNOVATION**

accelerating the clean energy revolution

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

D4.45 - Risultati dei test di tutti i dispositivi di test realizzati in questo progetto in un ampio range di condizioni sperimentali

Stefano Rampino, Edmondo Gilioli, Francesco Pattini

Consiglio Nazionale
delle Ricerche

D4.45 - Risultati dei test di tutti i dispositivi di test realizzati in questo progetto in un ampio range di condizioni sperimentali

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	5
2	Risultati ottenuti	5
2.1	Avanzamento della ricerca rispetto allo stato dell'arte internazionale con riferimento ai risultati ottenuti	5
3	Prodotti attesi.....	5
4	Prodotti ottenuti	5
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati	5
6	Sintesi delle attività svolte.....	5
7	Dettaglio delle attività svolte.....	6
8	Pubblicazioni scientifiche.....	14
9	Eventi di disseminazione	14
10	Descrizione dei risultati ottenuti.....	14

Indice delle figure

- Figura 1 - Cella IBC al c-Si utilizzata nella realizzazione dei dispositivi di benchmark.
- Figura 2 - Caratteristiche nominali delle celle solari utilizzate per la realizzazione dei sistemi di benchmark.
- Figura 3 - Caratteristiche IV della cella utilizzata per i dispositivi di benchmark, con relativi parametri elettrici. Le due curve si riferiscono alla caratteristica della cella non laminata (blu) e laminata con il metodo brevettato (rosso).
- Figura 4 – External Quantum Efficiency (EQE) della cella utilizzata per i dispositivi di benchmark. Le due curve si riferiscono alla caratteristica della cella non laminata (blu) e laminata con il metodo brevettato (rosso).
- Figura 5 - Tipologia di batteria utilizzata per il benchmark: Samsung INR18650 – 3000mAh.
- Figura 6 - Curva di scarica della batteria INR Samsung utilizzata per il benchmark.
- Figura 7 - Curva di carica della batteria INR Samsung utilizzata per il benchmark.
- Figura 8 - Curva di scarica dei supercapacitori utilizzati per i sistemi di benchmark.
- Figura 9 - Curva di carica dei supercapacitori utilizzati per i sistemi di benchmark.
- Figura 10 – Curve di carica/scarica dei supercapacitori ibridi usati per i sistemi di benchmark.
- Figura 11 - Curva IV in condizioni di illuminazione (STC) del minimodulo.
- Figura 12 - Ciclo di carica di un supercap ibrido e una cella illuminata a 1 sun.
- Figura 13 - Scarica di un sistema PV + Supercap Ibrido.
- Figura 14 - Curva di carica di un sistema PV+Supercap EDLC sotto illuminazione di 1 sun.
- Figura 15 - Autoscarica del sistema PV+Supercap EDLC.
- Figura 16 - Scarica del sistema PV+EDLC su un carico da 5W a irradianza = 0.1 sun.
- Figura 17 – Cicli di carica/Scarica del sistema PV+EDLC su un carico da 0.2W a irradianza = 1 sun.
- Figura 18 - Cicli di carica/autoscarica a 0.1 sun in presenza di un diodo di blocco con soglia da 0.7V tra PV e EDLC.
- Figura 19 - Cicli di carica/autoscarica a 0.1 sun in presenza di un diodo di blocco con soglia da 0.2 V tra PV e EDLC.
- Figura 20 - Cicli di carica-scarica PV+EDLC a 1 sun.
- Figura 21 - Cicli di carica-scarica PV+EDLC a 1 sun in presenza di un diodo di blocco con soglia di 0.2V.
- Figura 22 - Andamento della carica e della scarica in un sistema PV+BAT in presenza di un carico da 5W.
- Figura 23 - Stato di standby di un supercapacitore ibrido.
- Figura 24 - Scarica veloce a -1A di un supercapacitore ibrido.
- Figura 25 - Scarica e carica di un supercap ibrido con una corrente di 1A.
- Figura 26 - Scarica a -0.1 A di un supercapacitore ibrido.
- Figura 27 - Scarica a -0.5 A di un supercapacitore ibrido.
- Figura 28 – Cicli successivi di scarica a -0.5 A di un supercapacitore ibrido.
- Figura 29 - Voltaggio del sistema PV+Batteria che alimenta un carico di 5W sotto irradianza di 1 sun.
- Figura 30 - Voltaggio del sistema PV+Batteria che alimenta un carico di 5W sotto irradianza di 0.6 sun.
- Figura 31 - Voltaggio del sistema PV+Batteria che alimenta un carico di 5W sotto irradianza di 0.4 sun.
- Figura 32 - Voltaggio del sistema PV+Batteria che alimenta un carico di 5W sotto irradianza di 0.1 sun.
- Figura 33 - Andamento del sistema dopo 18 ore in condizioni di buio e in assenza di un diodo di blocco.
- Figura 34 - Andamento del sistema dopo 18 ore in condizioni di buio e in presenza di un diodo di blocco da 0.2V di soglia.

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

Grazie allo studio di questi prototipi, per la prima volta è stata portata avanti un'analisi completa sul funzionamento di questi dispositivi integrati, evidenziandone limiti di efficienza energetica e di flessibilità nella gestione dell'elettricità generata ed accumulata.

3 Prodotti attesi

Dispositivi ibridi di benchmark (a base di celle solari di Silicio cristallino) di alta efficienza

4 Prodotti ottenuti

Sono stati prodotti 3 prototipi finali differenti nei quali, al modulo di Si cristallino ad alta efficienza, è stato accoppiato un dispositivo di accumulo differente: batteria agli ioni di Litio, supercapacitore e supercapacitore ibrido.

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, variando le condizioni operative (irradianza, corrente di

carica, carico alimentato, etc.). Questi dispositivi sono stati poi confrontati con quelli prodotti nelle LA4.12 e LA4.15 per evidenziare i progressi e i limiti dei dispositivi integrati.

7 Dettaglio delle attività svolte

Per la realizzazione dei dispositivi di benchmark, sono stati selezionati e testati una serie di dispositivi fotovoltaici e di accumulo.

Dispositivi fotovoltaici. La scelta dei dispositivi fotovoltaici è stata fatta secondo i criteri teorizzati e validati durante le attività del secondo anno. Ecco i criteri di seguito riassunti.

- 1) Tipo di cella PV: indipendentemente dalla tecnologia, abbiamo individuato un dispositivo realizzato come minimodulo, con celle connesse in serie tra di loro, in modo che il voltaggio di massima potenza sia compatibile con i voltaggi delle batterie a film sottile o dei supercap integrati. Dato che la scelta della tecnologia (Si, thin-film, celle organiche, perovskiti, III-V) non era vincolante, si è subito puntato a scegliere dispositivi fotovoltaici basati sul Si. Tale tecnologia è attualmente la più diffusa, la più economica e la più efficiente, in grado di essere adattata in dimensione alla specifica del dispositivo finale. In più tale tecnologia è quella di gran lunga utilizzata nelle installazioni residenziali ed industriali. Questo aspetto è sempre stato tenuto in considerazione in modo che le ricadute di queste LA non fossero solo confinate ai dispositivi da laboratorio, ma che si potessero sfruttare anche per applicazioni a più alto TRL.
- 2) Voltaggio: i minimoduli PV sono stati progettati e realizzati in modo che il voltaggio di massima potenza (V_{mp}) sia vicino al voltaggio di plateau della batteria, ossia al voltaggio di carica a tensione costante. Invece, nel caso del superCap, la tensione di circuito aperto della cella non doveva superare la tensione massima del superCap.
- 3) Corrente: i minimoduli PV sono stati progettati in modo che la I_{sc} fosse comparabile o minore del C-rate della batteria: ad esempio, se la I_{sc} è di x A, la batteria dovrà avere una capacità maggiore o uguale di x Ah. Nel caso del SuperCap, la massima corrente di carica non deve superare i 10 A, una condizione assolutamente irraggiungibile per minimoduli, ma comunque da tenere sempre in considerazione.
- 4) Fill Factor: Era fondamentale che anche la V_{oc} del minimodulo non superasse la tensione massima di carica della batteria più di 0.1 V. E che la I_{mp} fosse molto simile alla I_{sc} . Per questo motivo il minimodulo scelto è stato realizzato in modo che la V_{mp} sia almeno l'80% della V_{oc} ; quindi, è necessario che il FF sia almeno $> 75\%$.

La scelta della tipologia di celle solari è ricaduta dal primo momento sul Si monocristallino, oramai disponibile commercialmente in molte varietà tecnologiche, come PERC, TOPCon, IBC, HJT e altre varianti. Poiché era necessario produrre dei dispositivi custom, con la necessità di collegare in serie più celle a seconda delle configurazioni necessarie, abbiamo optato per la scelta delle celle IBC (Interdigitated Back Contact), che presentano entrambi i contatti elettrici sul retro della cella (Figura 1). Questa caratteristica permette la facile saldatura (e dissaldatura) di nastri metallici dietro le celle, che permettono poi il collegamento in serie delle varie celle in maniera più veloce e sicura rispetto alle celle con gli elettrodi presenti sia sul front che sul back. In più, l'assenza dei contatti sul front permette di produrre

maggior fotocorrente a parità di area, poiché non sono presenti finger metallici ad ombreggiare la superficie.



Figura 1 - Cella IBC al c-Si utilizzata nella realizzazione dei dispositivi di benchmark

Le celle in questione sono le Sunpower Maxeon Gen III, le cui caratteristiche nominali sono riportate in Figura 2.

Electrical Characteristics of a typical Moxeon Gen III Cell At Standard Test Conditions (STC) STC: 1000W/m ² , AM 1.5G and cell temp 25°C							
	Cell Bin	P _{mp} (Wp)	Eff. (%)	V _{mp} (V)	I _{mp} (A)	V _{oc} (V)	I _{sc} (A)
Ultra Peak Performance	Me1	3.72	24.3	0.632	5.89	0.730	6.18
Ultra Premium Performance	Le1	3.63	23.7	0.621	5.84	0.721	6.15
Ultra High Performance	Ke1	3.54	23.1	0.612	5.79	0.713	6.11

Electrical parameters are nominal values.

Temp. Coefficients in SunPower Panels: Voltage: -1.74mV/°C, Current: 2.9mA/°C, Power: -0.29%/°C

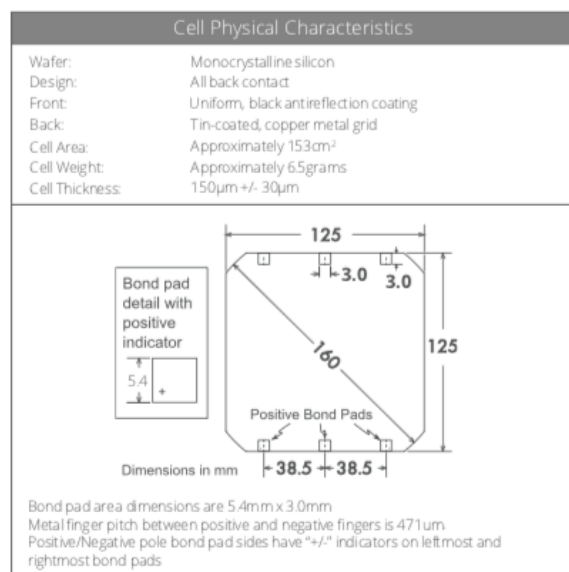
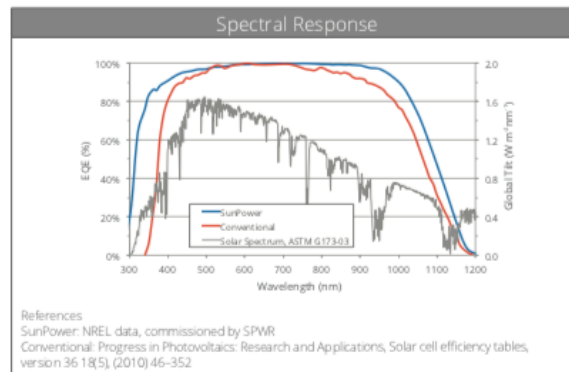
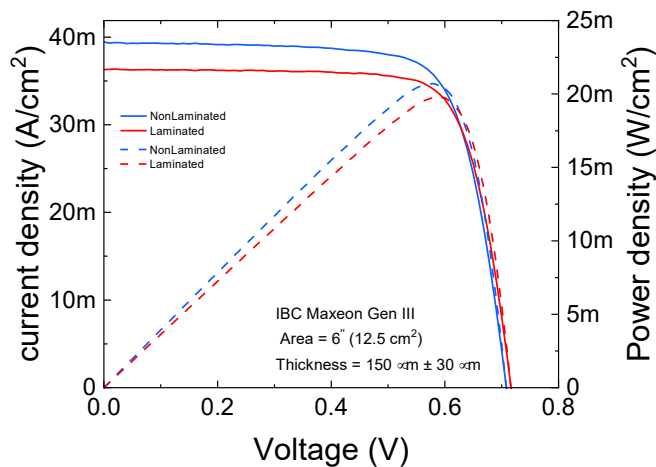


Figura 2 - Caratteristiche nominali delle celle solari utilizzate per la realizzazione dei sistemi di benchmark.

La scelta di queste celle è stata maggiormente motivata dal fatto che si possono tagliare mediante laser in semi-celle più piccole, grandi fino ad 1/6 delle celle originali. Questo aspetto dà la possibilità di ottenere mini-moduli di celle con i parametri elettrici misurati sperimentalmente ed elencati in Figura 3, a parte la V_{oc} , che essendo la somma di quelle delle singole celle, dà un totale di circa 4.3 V per un minimodulo da 6 celle. Questo valore è fondamentale, perché va a corrispondere alla tensione massima di una batteria a film sottile di litio, e quindi andrebbe ad accoppiarsi perfettamente con essa.



Cell Type	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	Isc (A)	FF (%)	Eff (%)
c-Si	716	36.30	0.95	76.12	19.79

Figura 3 - Caratteristiche IV della cella utilizzata per i dispositivi di benchmark, con relativi parametri elettrici. Le due curve si riferiscono alla caratteristica della cella non laminata (blu) e laminata con il metodo brevettato (rosso).

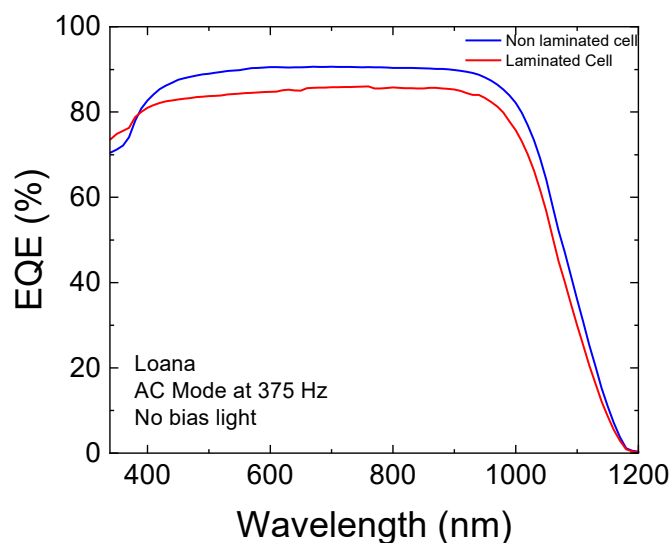


Figura 4 – External Quantum Efficiency (EQE) della cella utilizzata per i dispositivi di benchmark. Le due curve si riferiscono alla caratteristica della cella non laminata (blu) e laminata con il metodo brevettato (rosso).

Tutti i dispositivi di benchmark, da quelli iniziali fino a quelli finali, sono stati realizzati utilizzando questo tipo di celle. La fabbricazione dei minimoduli è stata fatta all'interno dei nostri laboratori, utilizzando un metodo di laminazione roll-to-roll brevettato, che consente di ottenere facilmente minimoduli incapsulati in modo leggero ma resistente nel tempo. Le caratteristiche della cella solare laminata, a parte l'inevitabile perdita di corrente dovuta al

filtro ottico dell'incapsulante, evidenziano un miglioramento sia della Voc che del FF rispetto alla cella nuda (Figura 3 e 4).

Per quanto riguarda la parte di accumulo con cui realizzare i dispositivi di benchmark, ci si è concentrati su tre differenti tecnologie:

1) Batteria elettrochimica al Litio

Come nel caso delle celle solari, anche le batterie al Litio presentano versioni diverse in cui i componenti (anodo, catodo, elettrolita) possono variare. Per motivi di densità volumetrica di energia ottimale, ci siamo focalizzati sulle batterie a ioni di Litio 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 (Figura 5).



Figura 5 - Tipologia di batteria utilizzata per il benchmark: Samsung INR18650 – 3000mAh.

L'analisi della curva di scarica (Figura 6) mette in evidenza il fatto che utilizzando delle correnti di scarica fino a 7A, è possibile sfruttare tutta la capacità reale della batteria, pari a 2800mAh. Inoltre, in queste condizioni più del 70% della capacità è sfruttata nel range di voltaggio compreso tra 4.2V e 3.5V, che implica che la potenza alimentabile da questa batteria si mantiene sempre tra i 25 e i 30W. Per un carico di 5W, l'autonomia della batteria in condizioni di buio è compresa tra le 5 e le 6 ore.

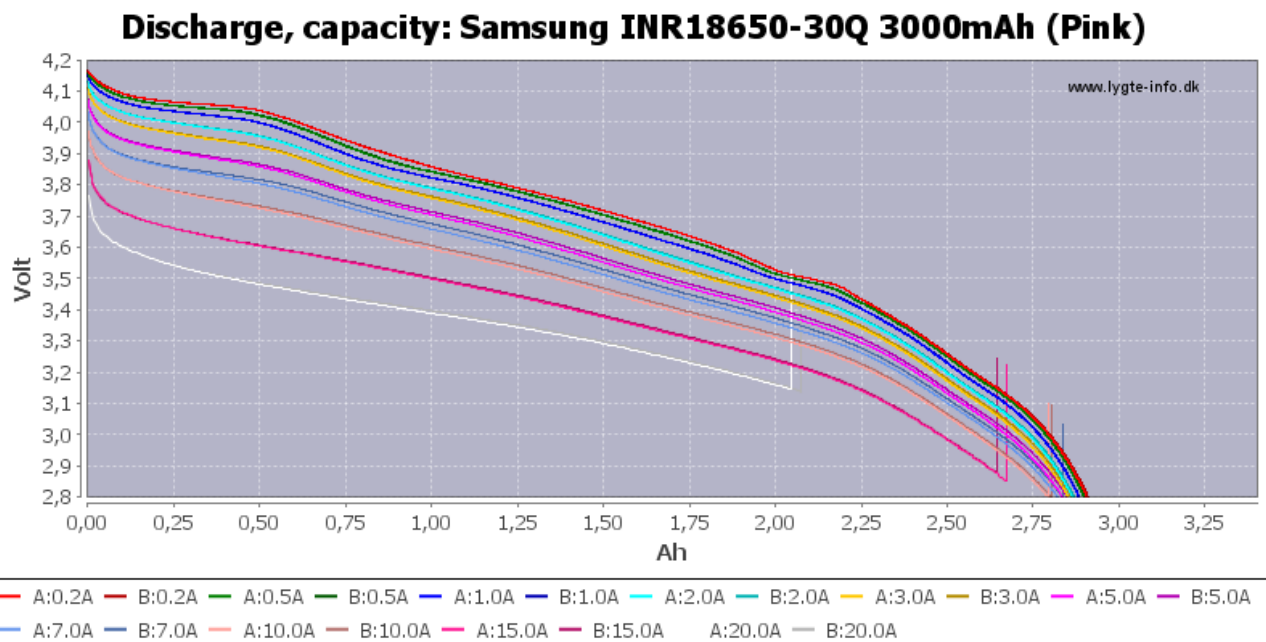


Figura 6 - Curva di scarica della batteria INR Samsung utilizzata per il benchmark

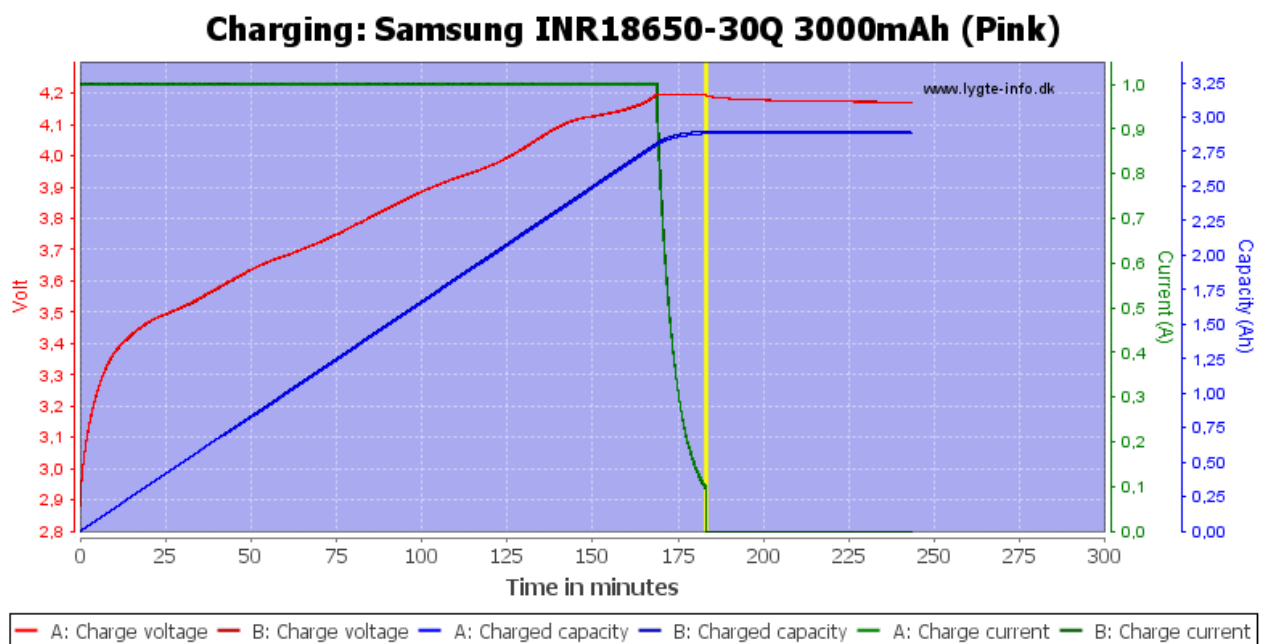
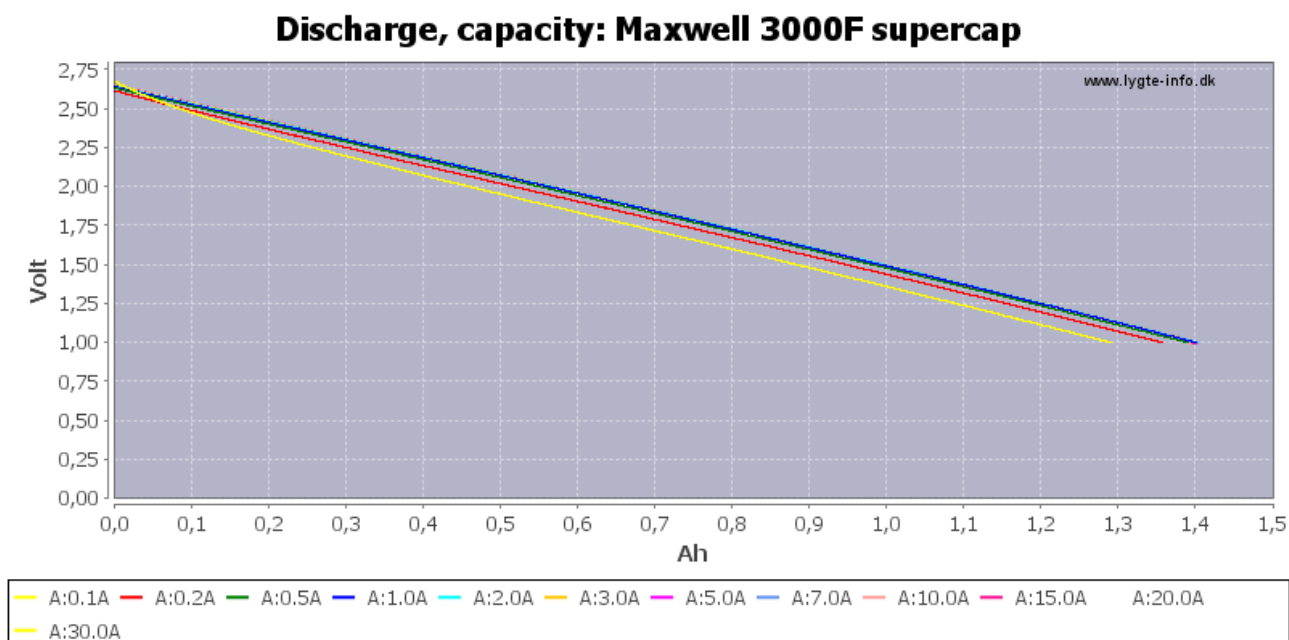


Figura 7 - Curva di carica della batteria INR Samsung utilizzata per il benchmark

La curva di carica di Figura 7 mette invece in evidenza il fatto che, completamente scarica ed alimentata da una corrente costante di circa 1A (pari alla corrente prodotta dal mini-modulo fotovoltaico), la batteria recupera un voltaggio di 3.5V in meno di un'ora e mezza, pari al 50% della sua capacità. Il voltaggio massimo viene raggiunto in 170 minuti, pari al 90% della sua capacità massima.

2) Supercapacitori EDLC

Tra le decine di tipologie diverse di supercapacitori, ci siamo concentrati sui cosiddetti “Electric Double Layer Capacitors” (EDLC), dei supercapacitori in grado di immagazzinare una grossa 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). La curva di scarica di questi supercapacitori (Figura 8) indica la grandissima stabilità di questi dispositivi in un range vastissimo di corrente di scarica (da 0.1 A fino a 30 A). Il fatto che la capacità si riduca linearmente con il voltaggio limita l’utilizzo di questi supercapacitori in termini di capacità. Affinché il voltaggio applicato al carico sia pressoché costante, in assenza di convertitori DC-DC, è possibile utilizzare al massimo il 30% della capacità massima, riducendo di molto l’autonomia dei sistemi in cui questi supercapacitori sono utilizzati. Il problema principale dei supercap si può comprendere anche analizzando la curva di carica (Figura 9): la capacità cresce linearmente con il voltaggio, senza formare alcun plateau, come nel caso della batteria al Li. Questo implica che il voltaggio del supercap vari moltissimo durante la carica, e vada a limitare quello di funzionamento della cella solare. Per questo motivo, quando il supercapacitore è scarico, a bassi voltaggi, la cella solare genererà una potenza molto minore della sua potenza massima, allungando ulteriormente il tempo di carica del supercapacitore. Anche il carico collegato a questo sistema “sentirà” delle variazioni di voltaggio importanti (tra 0 e 3V) e spesso incompatibili con il funzionamento del carico stesso. Per questo motivo è stata testata un’altra categoria di supercapacitori.



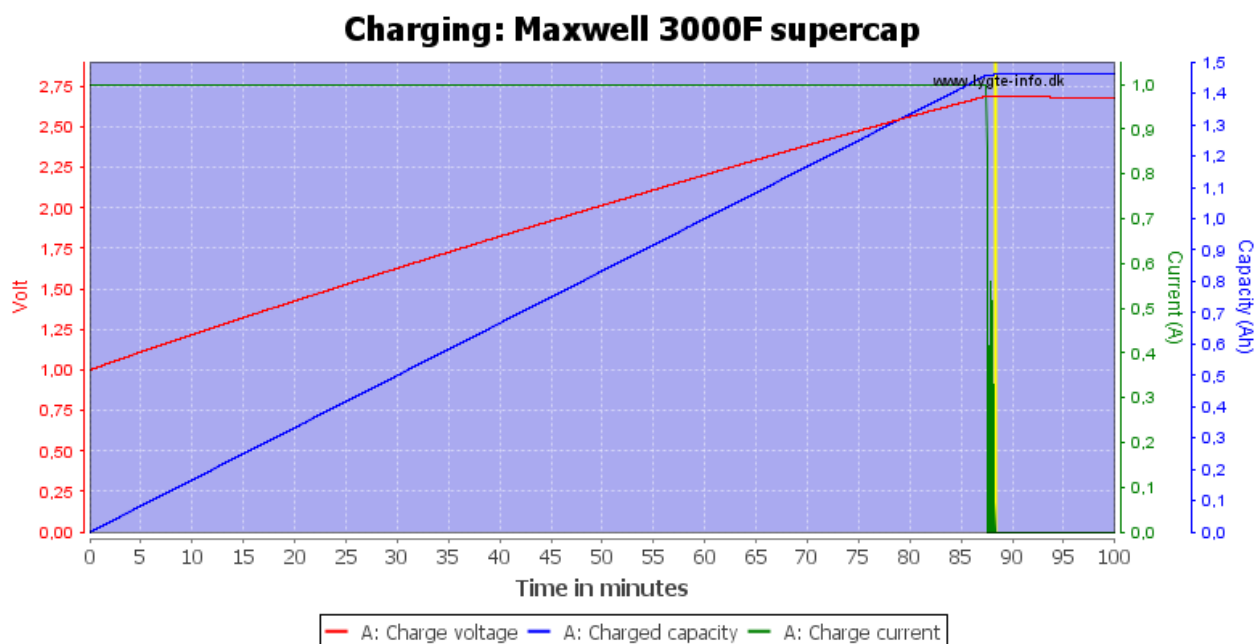


Figura 9 - Curva di carica dei supercapacitori utilizzati per i sistemi di benchmark.

3) 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). Dalle curve di carica/scarica in Figura 10, emerge il fatto che esista un plateau molto ampio dove il voltaggio del supercap è costante, mentre la sua capacità varia tra il 10% e l'80% del valore massimo. Questo aspetto è fondamentale per dotare un sistema di una stabilità durante i cicli di carica e di scarica: il modulo solare può generare gran parte dell'energia in condizioni di voltaggio e corrente costanti ed anche il carico può essere alimentato con voltaggi sempre costanti.

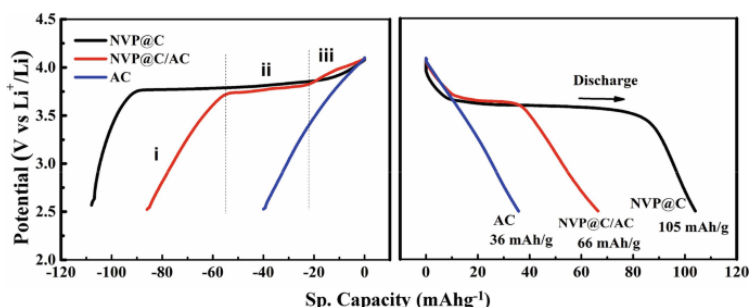


Figura 10 – Curve di carica/scarica dei supercapacitori ibridi usati per i sistemi di benchmark.

Altro aspetto importantissimo è che questi supercap, come le batterie, non si scaricano completamente a 0 V, ma a capacità nulla mostrano un voltaggio di circa 2.6V. A differenza

dei supercap EDLC, che lavorano tra 0 e 3V, questi lavorano tra i 2.6V e i 3.8V: grazie a ciò, partendo anche al voltaggio più basso, il modulo solare riesce a lavorare già al 70% della sua potenza massima, riducendo molto i tempi di carica del sistema.

Combinando il minimodulo solare di c-Si con tecnologia IBC e i tre dispositivi di accumulo sopracitati, sono stati realizzati dei sistemi discreti di benchmark che hanno chiarito il comportamento di questi circuiti, i loro vantaggi ed i loro limiti.

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

Di seguito sono stati selezionati e riportati gli studi sperimentali più importanti sui sistemi di benchmark realizzati. I test sono stati centinaia, ottenuti in condizioni variabili di:

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

Ecco i componenti utilizzati:

- Minimodulo solare con le caratteristiche evidenziate in Figura 11

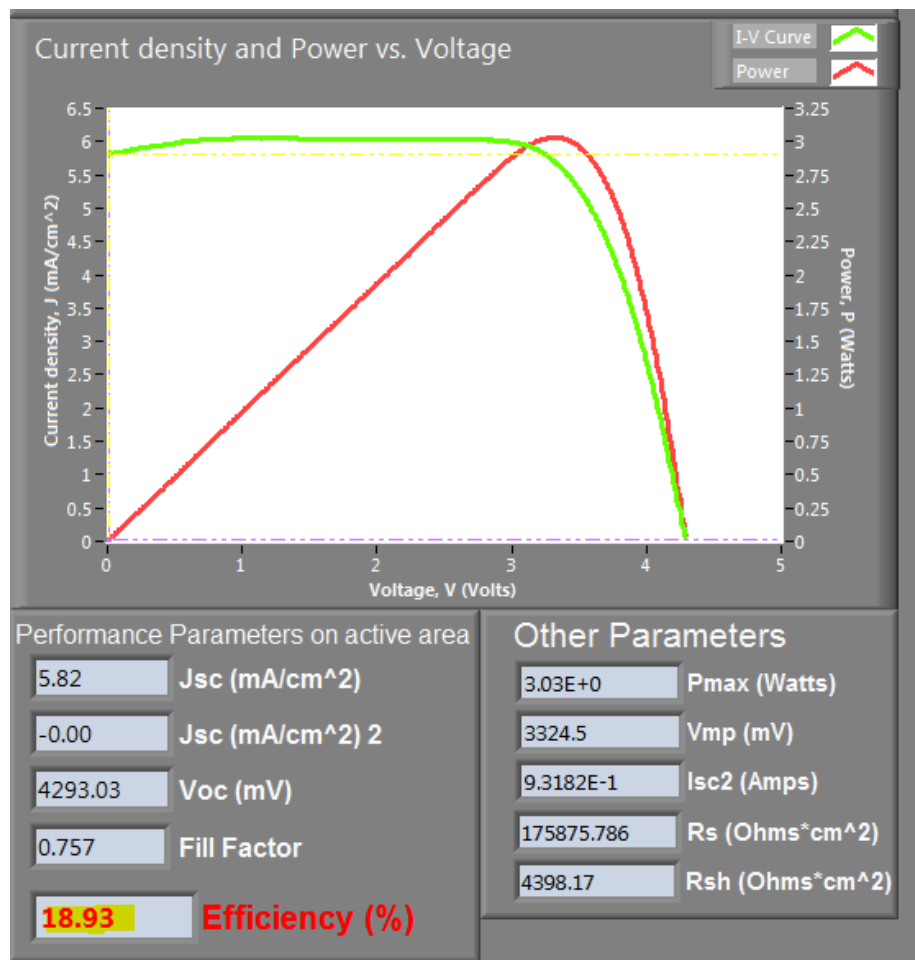


Figura 11 - Curva IV in condizioni di illuminazione (STC) del minimodulo.

- Batteria Samsung 18650 INR 3000 mAh
- Supercapacitore EDLC Kemet 5.5V – 1F
- Supercapacitore Ibrido Eaton 3.8V – 220F

I test principali si sono basati su:

- Carica completa dei sistemi sotto illuminazione solare
- Carica completa dei sistemi mediante bias esterno
- Scarica completa dei sistemi su carico
- Scarica completa dei sistemi mediante corrente esterna
- Cicli di carica/scarica solare ed elettrica
- Test di autoscarica in presenza/assenza di diodo di blocco
- Determinazione di resistenze parassite dei sistemi (Rs e Rsh)

Di seguito sono riportati i grafici più rappresentativi, commentati per evidenziare le peculiarità.

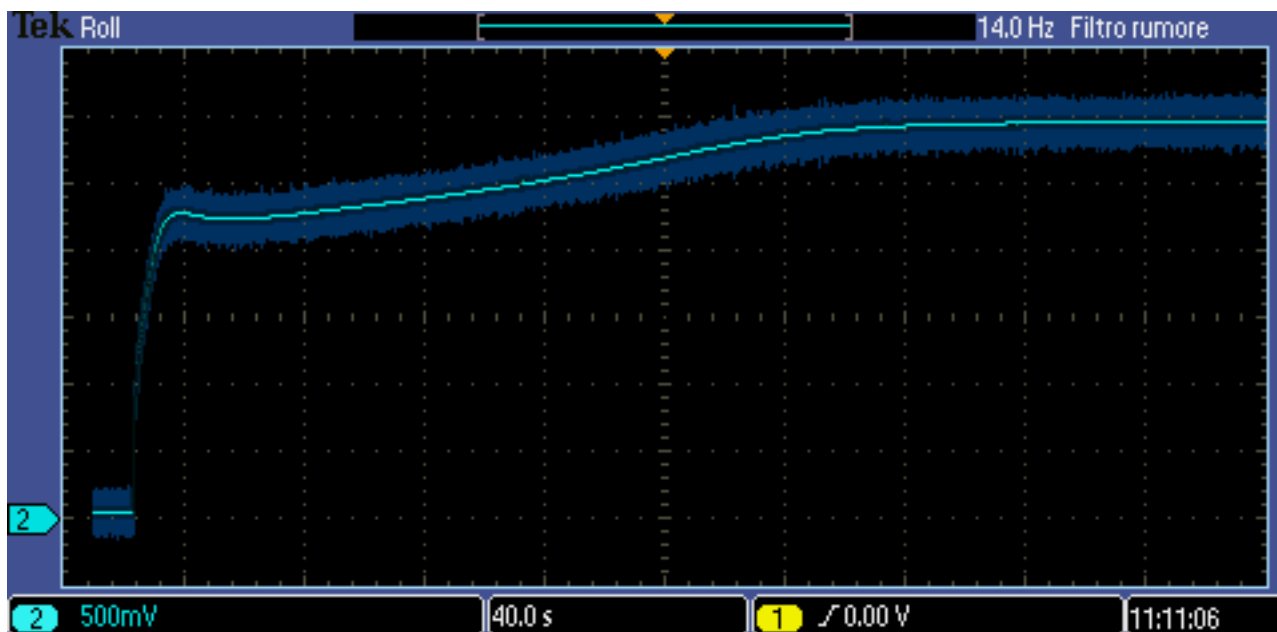


Figura 12 - Ciclo di carica di un supercap ibrido e una cella illuminata a 1 sun.

La curva di Figura 12 evidenzia il fatto che il supercap ibrido, anche completamente scarico, si porta istantaneamente ad un voltaggio di 2.5V. In questo modo il modulo solare lavora già a 2.5V-1A, quindi a 2.5W, l'82% della sua potenza massima (3.03 Wp). Questa poi cresce nel tempo, poiché aumenta anche il voltaggio del supercap. Il plateau a 2.5V è il comportamento caratteristico dell'elettrodo a batteria del supercap ibrido. La tensione massima, uguale alla tensione di Voc della cella, viene raggiunta dopo 200 secondi.

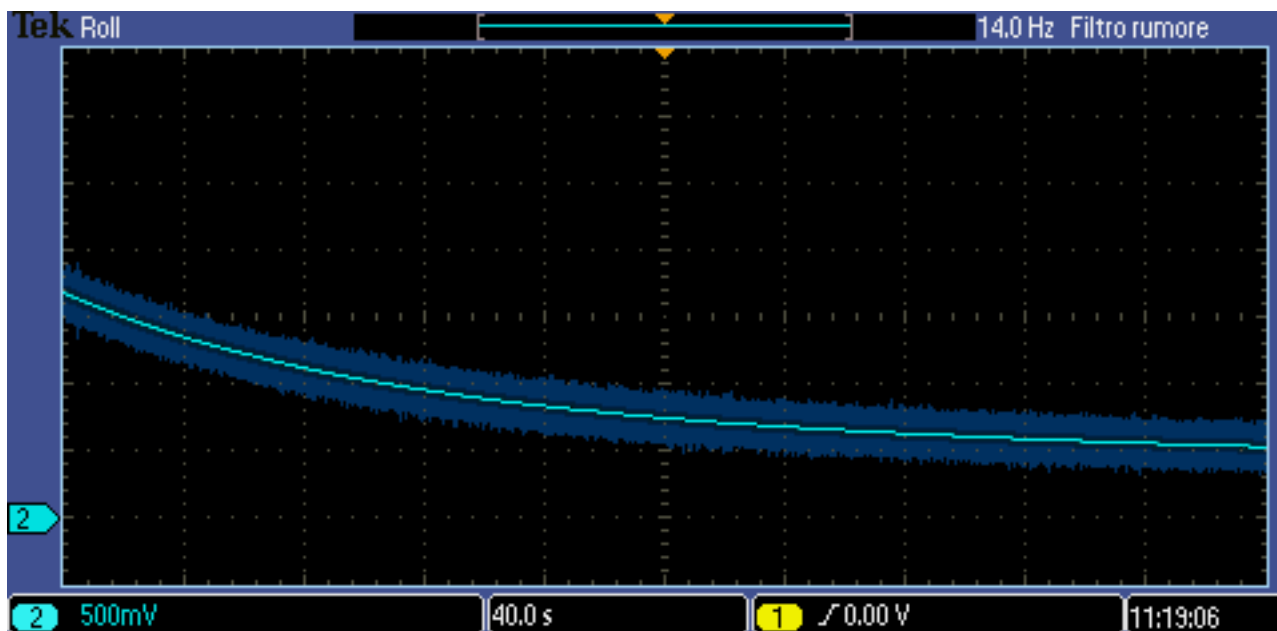


Figura 13 - Scarica di un sistema PV + Supercap Ibrido.

La scarica totale del sistema PV+Supercap ibrido a corrente costante (1A) permette di conoscere la capacità reale del supercap. Integrando la curva del voltaggio nel tempo e

moltiplicandolo per la corrente costante, si ottiene la quantità di energia ceduta dal sistema. Questa è pari a quella trattenuta da un condensatore ($\frac{1}{2} C(V_{\max}^2 - V_{\min}^2)$), dove $V_{\max}$ è il voltaggio iniziale e $V_{\min}$ è il voltaggio finale. La capacità misurata è di 215F, molto vicina alla capacità nominale di 220F.

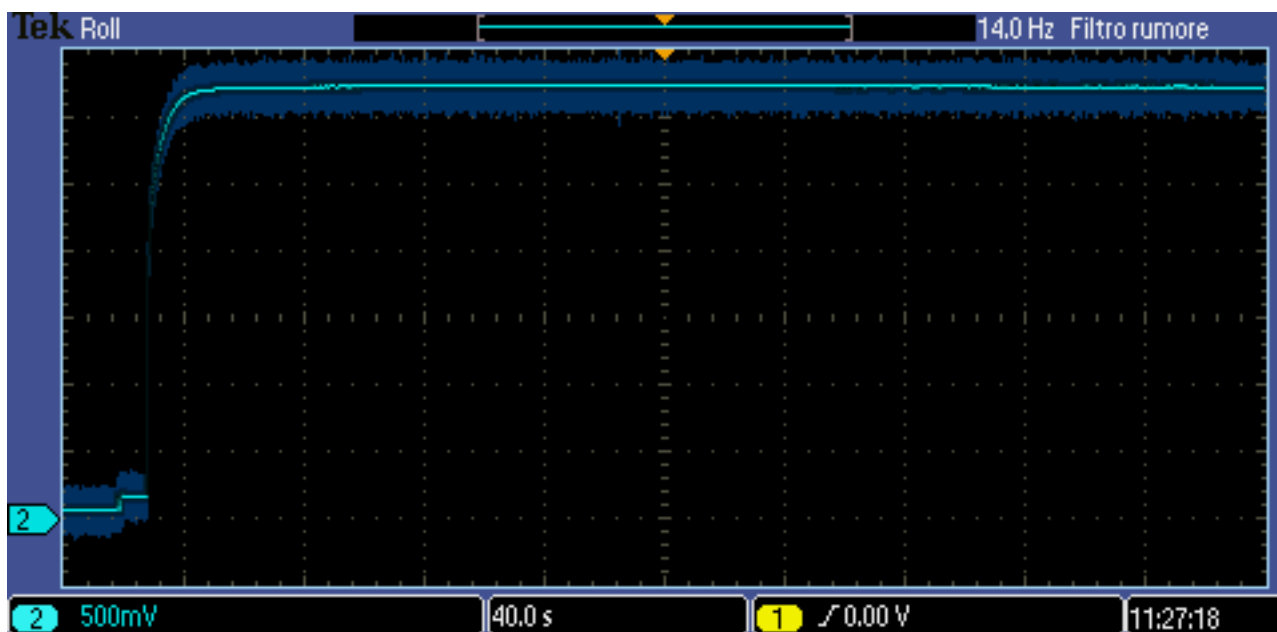


Figura 14 - Curva di carica di un sistema PV+Supercap EDLC sotto illuminazione di 1 sun.

La curva di carica del sistema PV+Supercap EDLC di Figura 14 mette in evidenza la velocità di carica del supercap che ha una bassa capacità (1F). Nonostante la bassa capacità, il voltaggio del supercap parte da 0 Volt e si assesta al voltaggio massimo solo dopo 40 secondi. Per i primi 40 secondi, la cella solare ha generato una potenza variabile e molto minore della potenza massima.

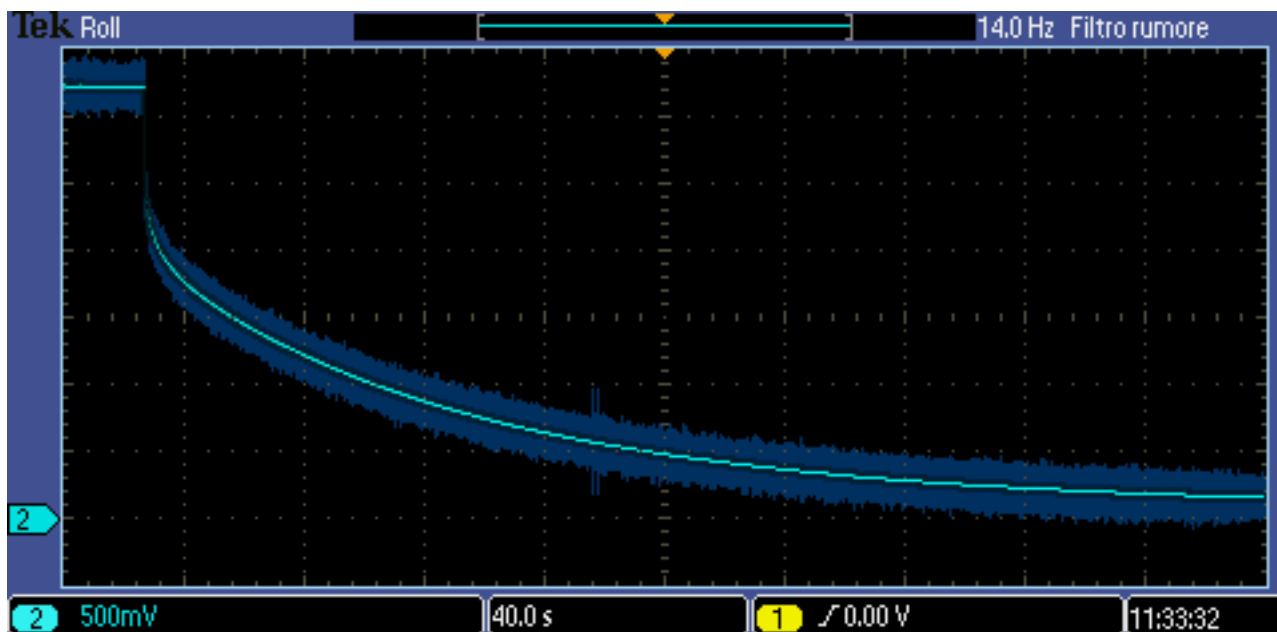


Figura 15 - Autoscarica del sistema PV+Supercap EDLC

La curva di Figura 15 sottolinea la problematica di autoscarica del sistema PV+Accumulo. Al buio, la cella viene alimentata in polarizzazione diretta dal supercap. Il circuito si trasforma in un RC, dove la resistenza è quella di shunt della cella solare. Il condensatore ben presto si scarica, e quando illuminato dovrà ricaricarsi da zero, come già descritto in Figura 14.

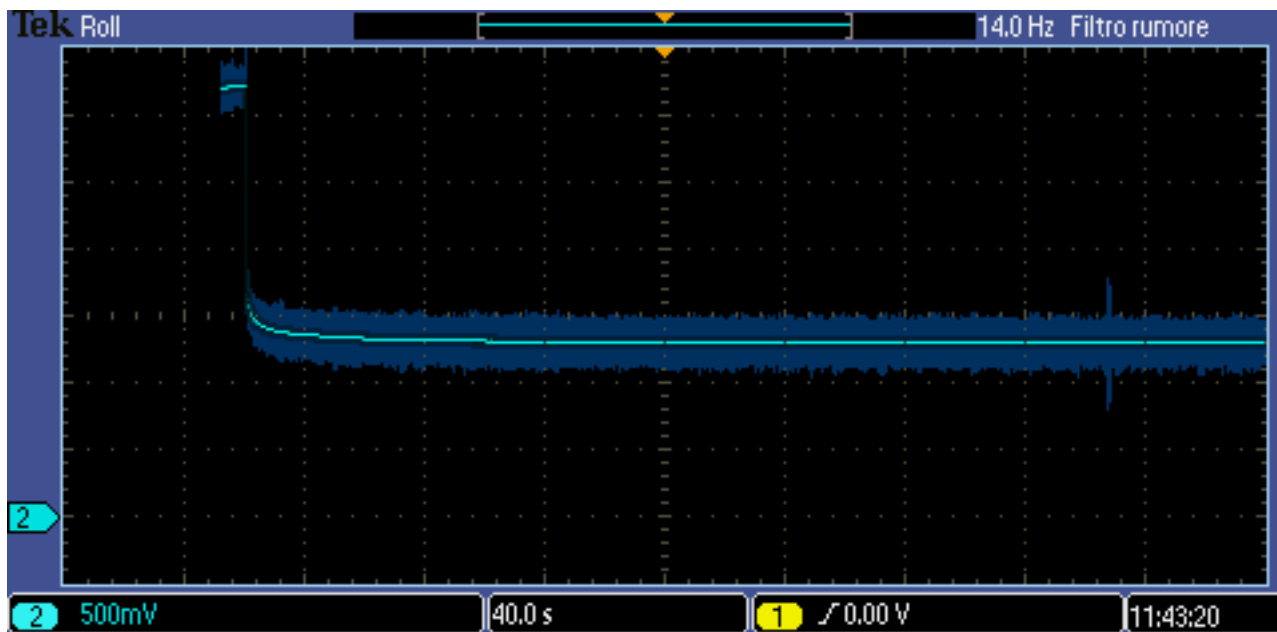


Figura 16 - Scarica del sistema PV+EDLC su un carico da 5W a irradianza = 0.1 sun.

In presenza di un carico, il sistema PV+EDLC è altamente propenso a scaricarsi velocemente in condizioni di buio o di scarsa illuminazione. Come si può vedere in Figura 16, la scarica del condensatore è istantanea. Il plateau visualizzato viene raggiunto poiché il carico e la cella

vengono staccati dal sistema, non essendoci più abbastanza potenza. Il capacitore resta con la sua tensione costante, che conserva molto efficacemente.

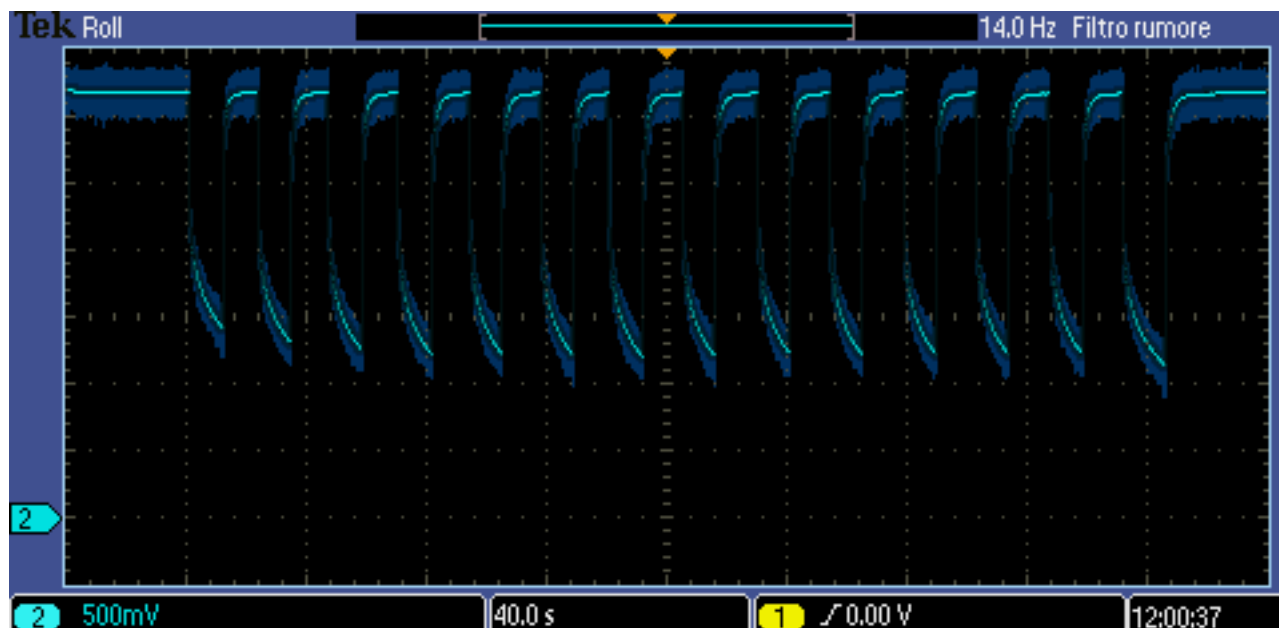


Figura 17 – Cicli di carica/Scarica del sistema PV+EDLC su un carico da 0.2W a irradianza = 1 sun.

I cicli di carica/scarica di Figura 17 mettono in evidenza l'ottima stabilità del sistema sottoposto a cicli ripetuti. Questa è la caratteristica migliore dei supercap EDLC, che riescono a rispondere a variazioni repentine di corrente sia in modulo che in verso.

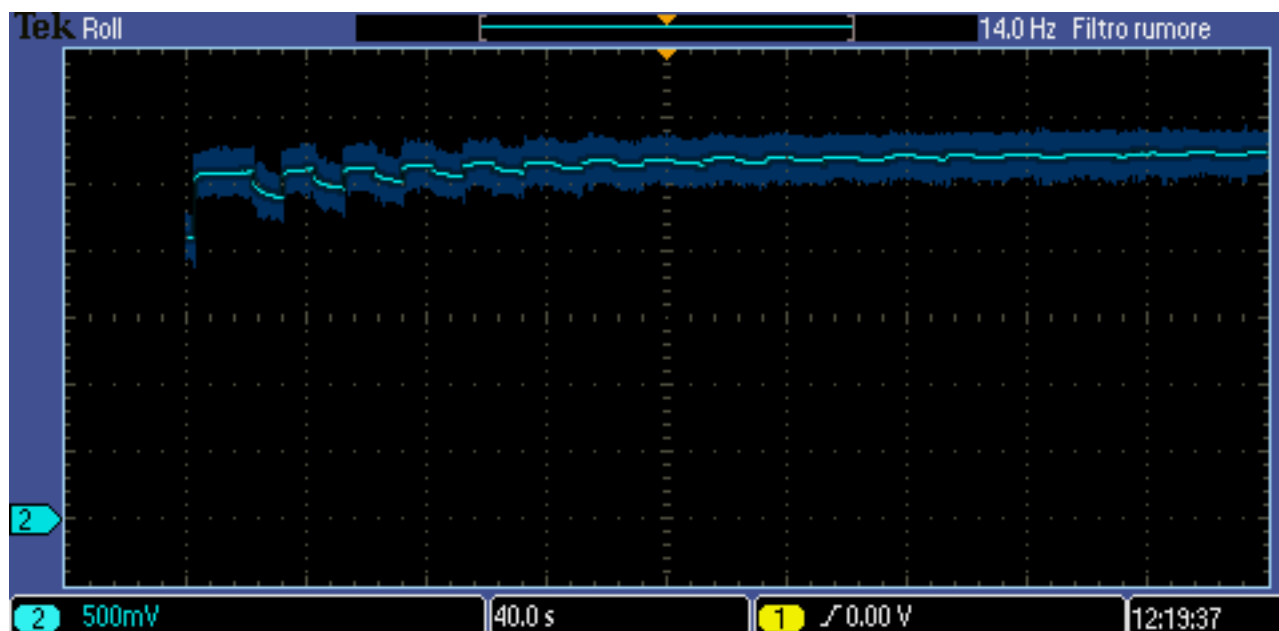


Figura 18 - Cicli di carica/autoscarica a 0.1 sun in presenza di un diodo di blocco con soglia da 0.7V tra PV e EDLC.

Se viene inserito un diodo di blocco tra supercap e cella PV, viene inibita l'autoscarica. In figura 18 si nota come i continui cicli di carica portino il sistema a saturare il voltaggio. I cicli

successivi di autoscarica non riescono ad abbassare il voltaggio, che resta costante, conservando l'energia incamerata nel supercap durante i cicli di carica.

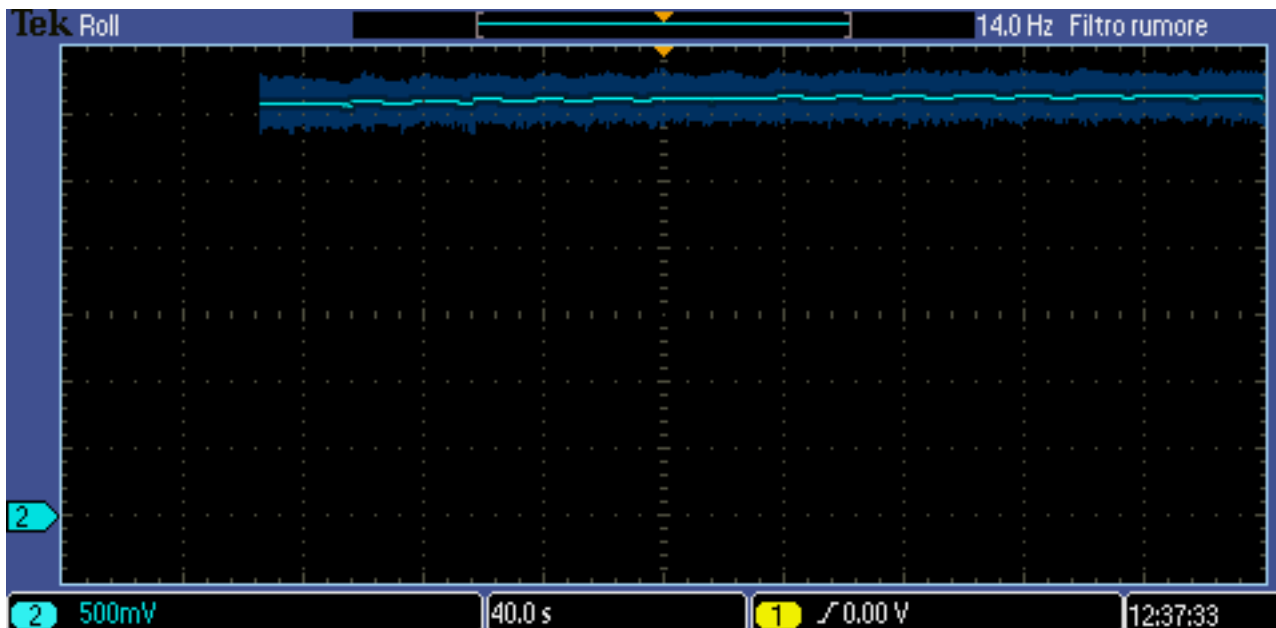


Figura 19 - Cicli di carica/autoscarica a 0.1 sun in presenza di un diodo di blocco con soglia da 0.2 V tra PV e EDLC.

La situazione migliora nel momento in cui si inserisce un diodo Schottky, con una soglia di 0.2V anziché da 0.7V. Il voltaggio massimo raggiunto è più alto di 0.5V rispetto al setup precedente. La scelta del diodo è quindi molto importante per evitare di introdurre inutili cadute di tensione.

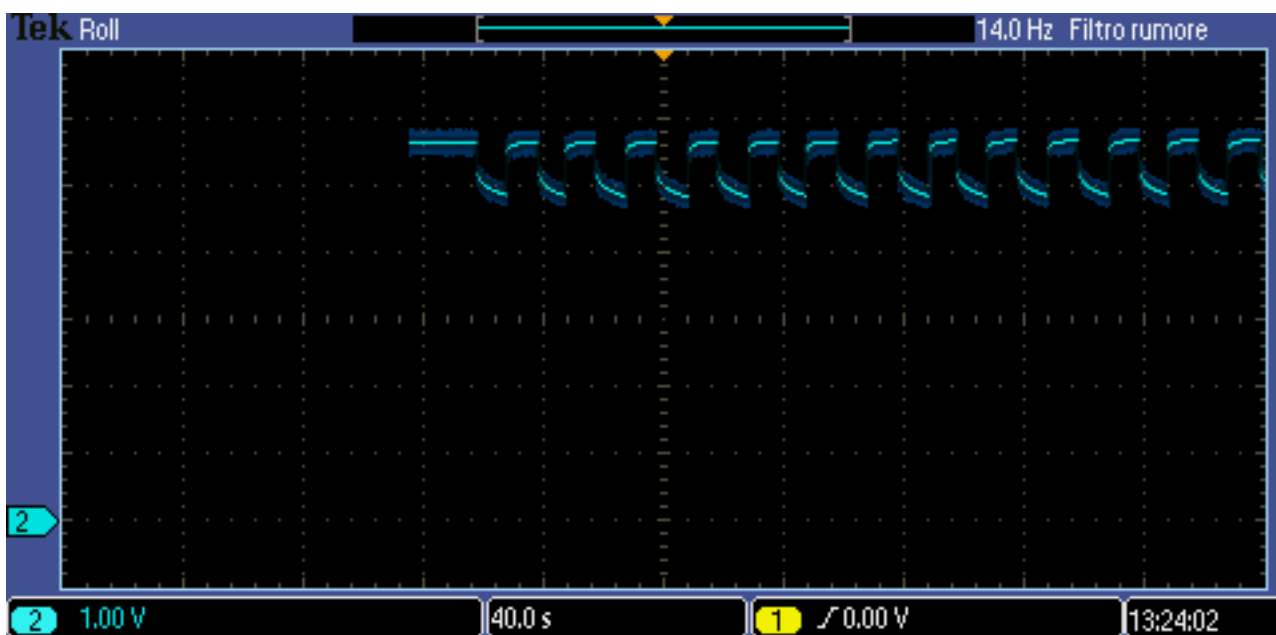


Figura 20 - Cicli di carica-scarica PV+EDLC a 1 sun

In figura 20 è riportata una serie di cicli carica/autoscarica in presenza di un'irradianza di 1 sun. L'alta irradianza è responsabile del voltaggio massimo più alto, e della velocità di carica praticamente istantanea.

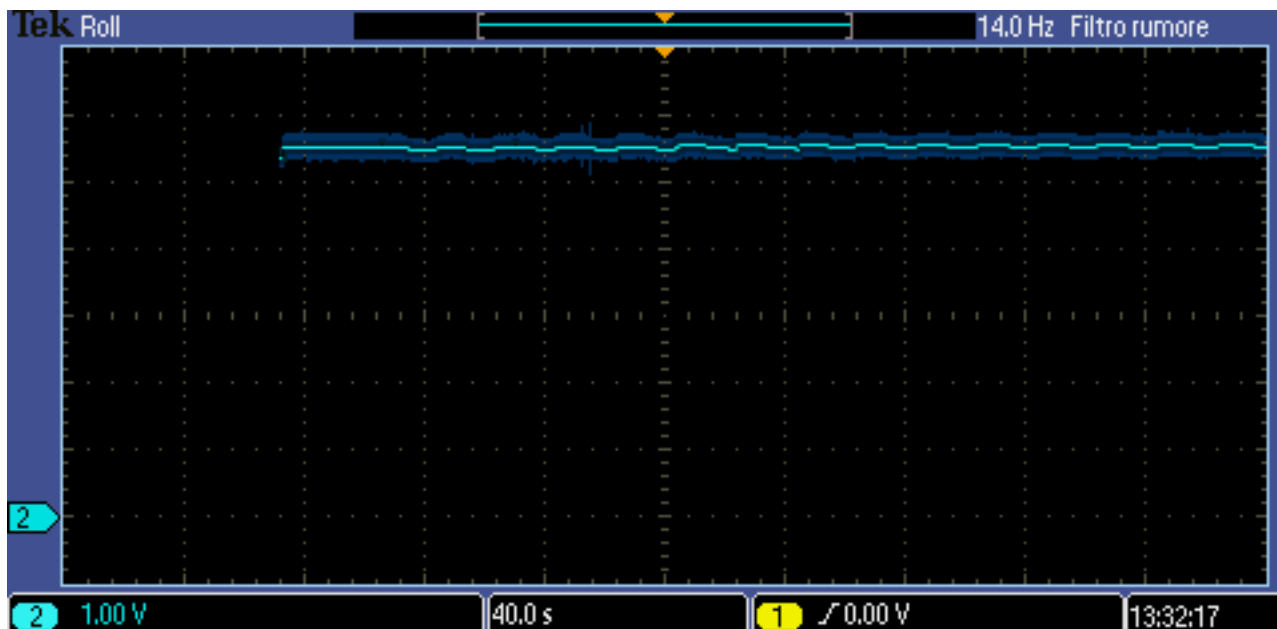


Figura 21 - Cicli di carica-scarica PV+EDLC a 1 sun in presenza di un diodo di blocco con soglia di 0.2V.

L'andamento di figura 21 conferma la necessità di collegare un diodo di blocco tra cella PV e supercap in questo tipo di sistemi per non perdere velocemente la carica immagazzinata durante il periodo di illuminazione. Questa necessità è anche uno dei più grandi limiti delle architetture integrate presenti anche in letteratura: è difficile trovare un compromesso tra massima integrazione, che limita le performance, e la massima efficienza, che ha bisogno di passare dall'integrazione monolitica al collegamento discreto degli elementi.

Passando invece ai sistemi che prevedono una batteria al Li come dispositivo di stoccaggio della carica elettrica, sono stati eseguiti vari test per studiare le caratteristiche dei sistemi di benchmark.

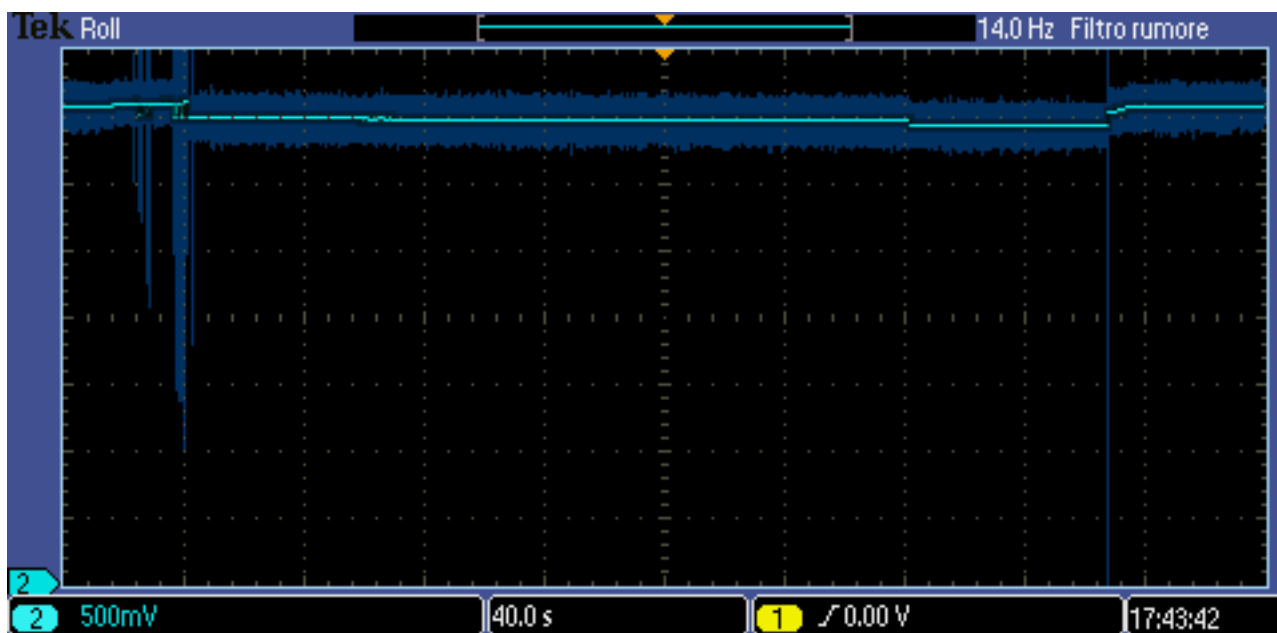


Figura 22 - Andamento della carica e della scarica in un sistema PV+BAT in presenza di un carico da 5W.

In figura 22 è riportato l'andamento della carica della batteria da parte del modulo PV, seguito poi da un lungo ciclo di scarica su un carico da 5W, infine concluso con un ciclo di carica sotto illuminazione. La batteria, nonostante sia in costante fase di scarica, riesce a mantenere molto costante il voltaggio, sostenendo appieno il carico da 5W per molto tempo. Dopo aver disconnesso il carico, l'illuminazione successiva riesce a riportare in poco tempo il voltaggio di circuito aperto ai valori iniziali.

In presenza di un sistema che deve continuamente alimentare carichi senza cadute di tensione, la batteria si dimostra il componente più stabile ed efficiente da accoppiare con una cella PV. D'altra parte, anche il supercapacitore ibrido ha caratteristiche che si avvicinano alla batteria, se analizzato in termini di voltaggio costante e voltaggio compatibile con il punto di massima potenza della cella solare.

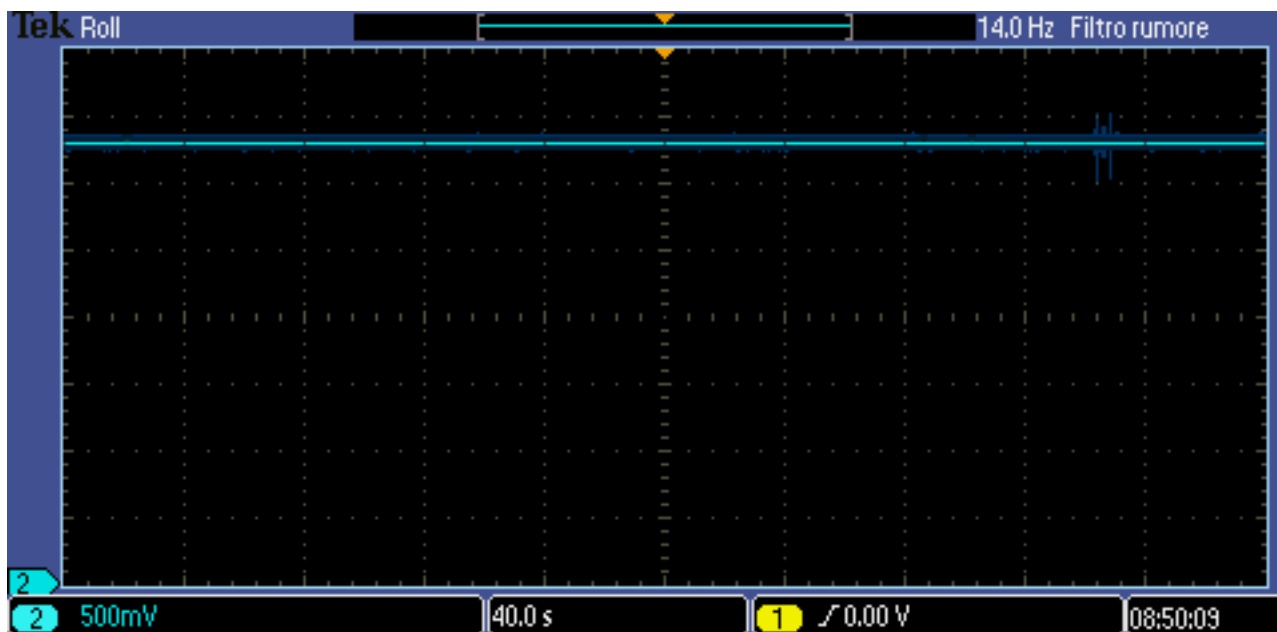


Figura 23 - Stato di standby di un supercapacitore ibrido.

E' interessante notare come il supercapacitore ibrido abbia una resistenza di shunt interna altissima. In figura 23 è riportato il voltaggio di standby di un supercap ibrido caricato precedentemente mediante PV. Il voltaggio non subisce decrementi misurabili dopo svariate ore di monitoraggio. La corrente di shunt misurata durante il mantenimento a voltaggio massimo (3.8V) è minore di 100 mA, un valore almeno 30 volte più basso di quello misurato sui migliori supercap EDLC, che hanno perdite comprese tra i 2.8 e i 5 mA.

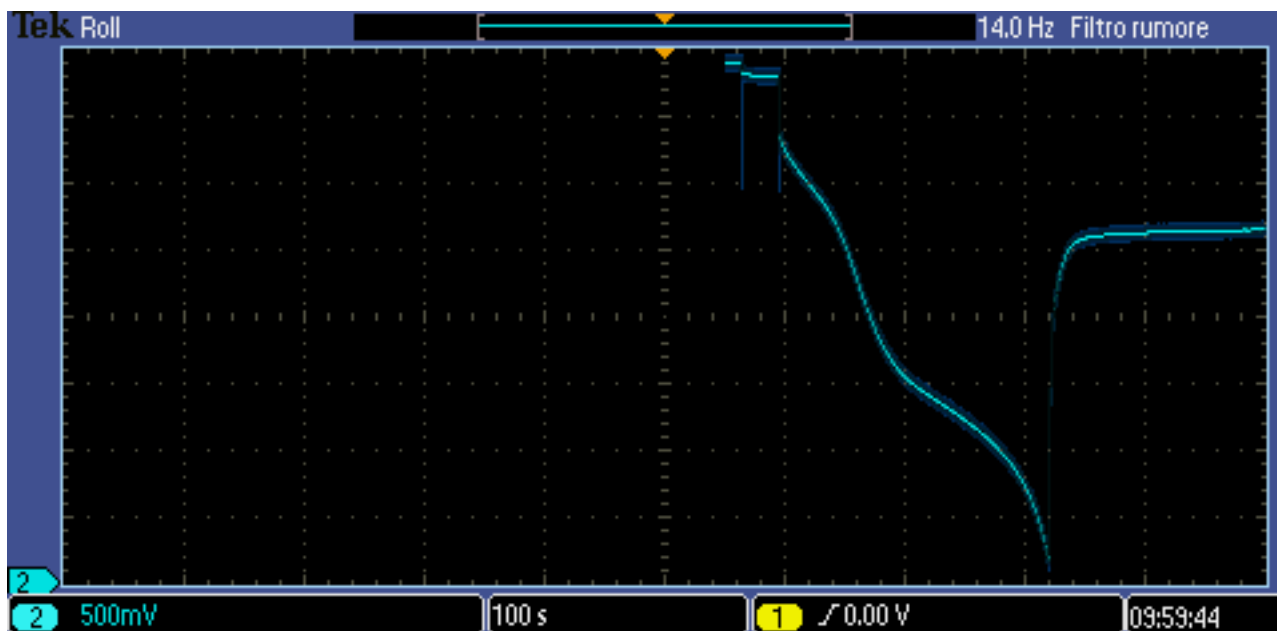


Figura 24 - Scarica veloce a -1A di un supercapacitore ibrido.

L'andamento della scarica del supercap ibrido evidenziato in Figura 24 è molto differente dalla scarica di un supercapacitore EDLC. Inizialmente il supercap viene caricato con corrente

di 1A fino ad un voltaggio nominale di 3.9V. Il salto di voltaggio osservabile subito dopo $<0.1\text{ V}$ è dovuto alla resistenza interna del supercap, su cui c'è la caduta di potenziale di 0.1V. Si deduce quindi che la resistenza interna del supercap è di $0.1\text{V}/1\text{A} < 0.1\text{ Ohm}$. La curva di scarica a -1A ha un comportamento complesso: istantaneamente il voltaggio crolla da 3.8V a 3.4V. Successivamente va a scaricarsi esponenzialmente ma molto lentamente nei primi 50 secondi, per poi accelerare successivamente la scarica nei successivi 50 secondi, e ritornando alla fine all'andamento di scarica esponenziale lenta iniziale. Il voltaggio del supercap va completamente a 0 alla fine della scarica, ma nel momento in cui si lascia in standby il voltaggio risale velocemente a 2.6V. Questo è l'effetto dell'elettrodo dove avvengono le reazioni di redox dovute alla presenza del Litio. Anche in condizioni di capacità nulla, il voltaggio agli elettrodi è di 2.6V. Questo, come sottolineato più volte, è il grande vantaggio dei supercap ibridi: la loro carica parte da 2.6V e non da 0V come accade ai supercap EDLC completamente scarichi.

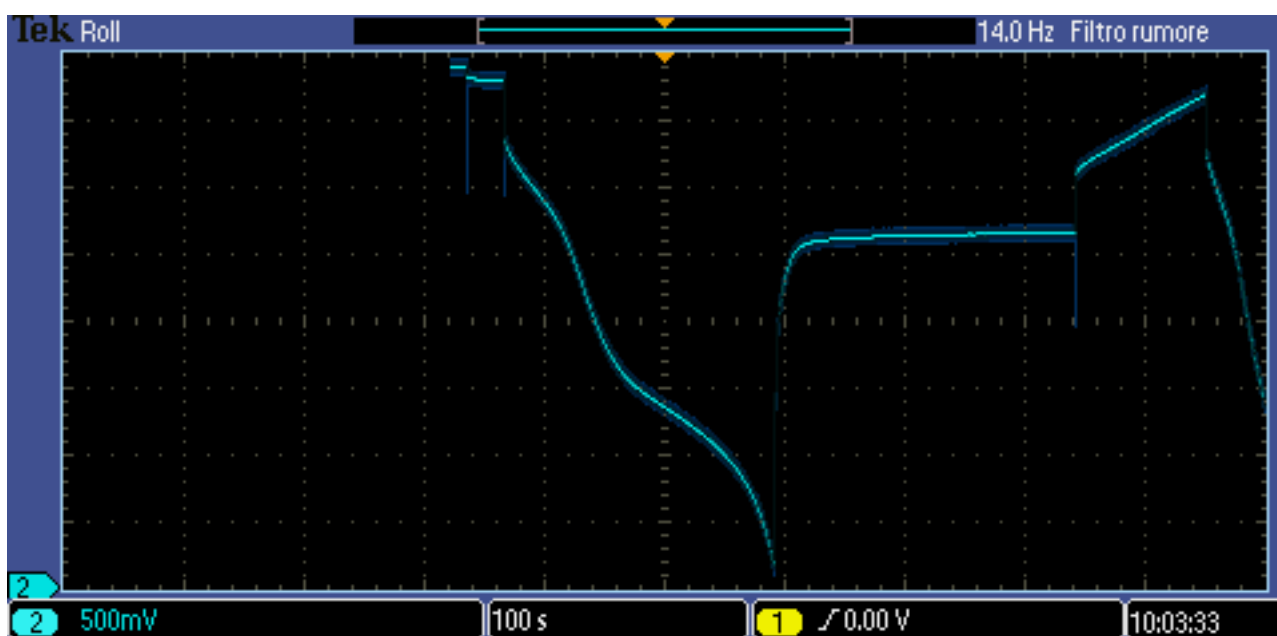


Figura 25 - Scarica e carica di un supercap ibrido con una corrente di 1A.

La carica successiva allo stato di standby, con una corrente di 1A, è riportata nella parte destra di Figura 25. Dopo un'istantanea salita del voltaggio da 2.6 a 3.1V, la carica è perfettamente lineare nel tempo, in linea con il comportamento di una batteria al Li.

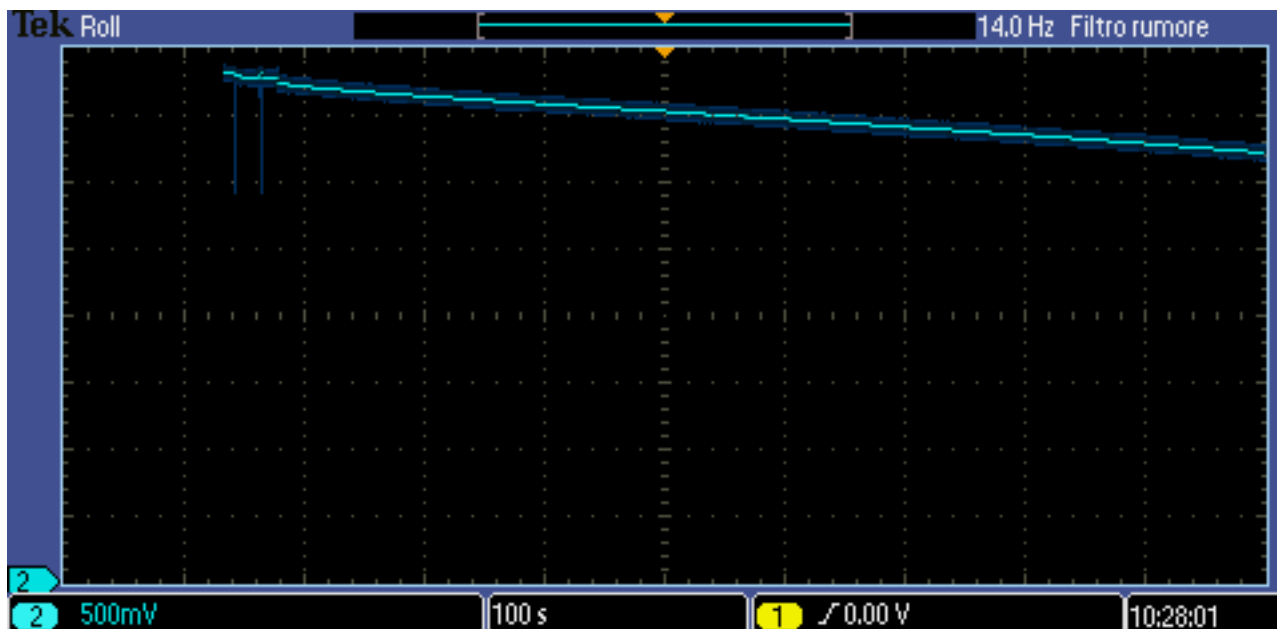


Figura 26 - Scarica a -0.1 A di un supercapacitore ibrido.

In Figura 26 è riportata la curva di scarica del supercap ibrido con una corrente di 100 mA. In questo regime di scarica, rispetto a quello visto in Figura 24, non c'è un crollo istantaneo del voltaggio, ma al contrario un decadimento molto lento. In più, la tensione limite del supercap completamente scarico è di 2.6V. Il tempo di decadimento a corrente costante di 0.1A da 3.8V a 2.6V è di 145 minuti circa. Integrando la curva si deduce che l'energia rilasciata dal supercap durante la scarica è di 300 mWh, a cui corrisponde una capacità di 216F, molto vicina alla capacità nominale di 220F riportata nel datasheet. Va notato che applicando la corrente di scarica di 1A, il voltaggio del supercap a capacità nulla non si ferma a 2.6V ma va fino a 0V (Figura 25). In più il tempo di scarica non è lineare con la corrente, infatti, in questo regime di corrente il supercap si scarica in meno di 5 minuti.

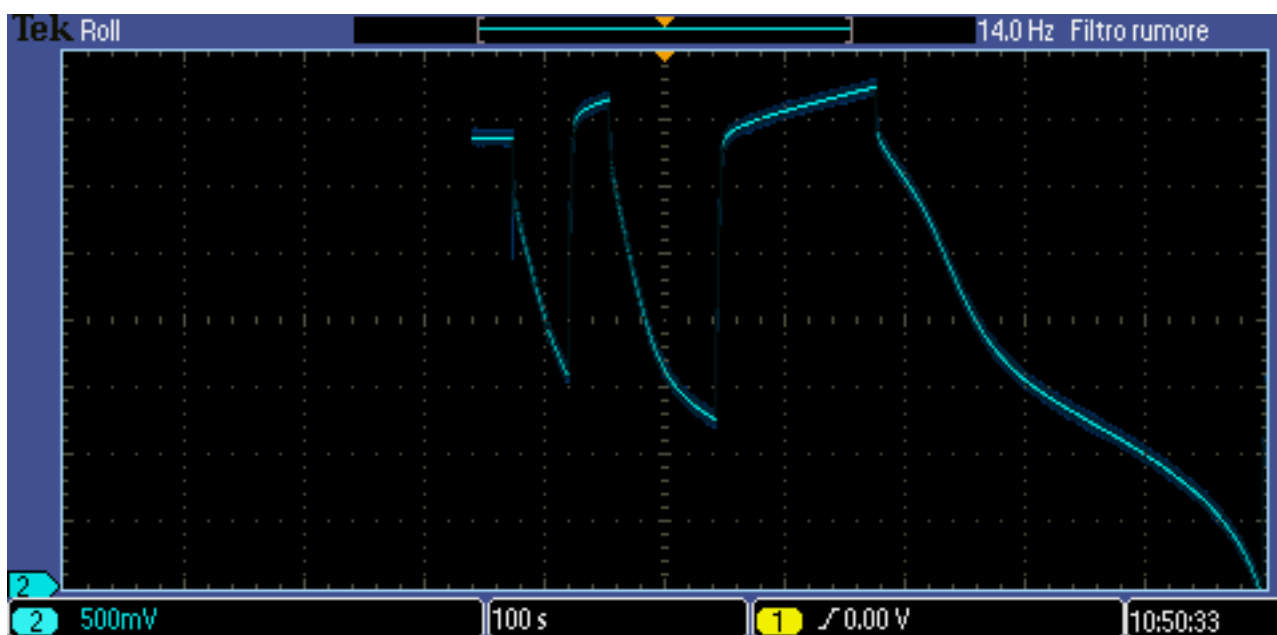


Figura 27 - Scarica a -0.5 A di un supercapacitore ibrido

Aumentando la corrente di scarica a -0.5A, si rivede lo stesso andamento della scarica a -1A, con una perdita di voltaggio molto veloce ed una capacità equivalente minore di quella nominale (Figura 27). Questo porta a concludere che per preservare la stabilità del voltaggio del sistema tra i 3.8V e i 2.6, il carico che deve essere accoppiato a questo tipo di supercapacitori non deve superare i $3.8V \cdot 0.5A = 1.7W$.

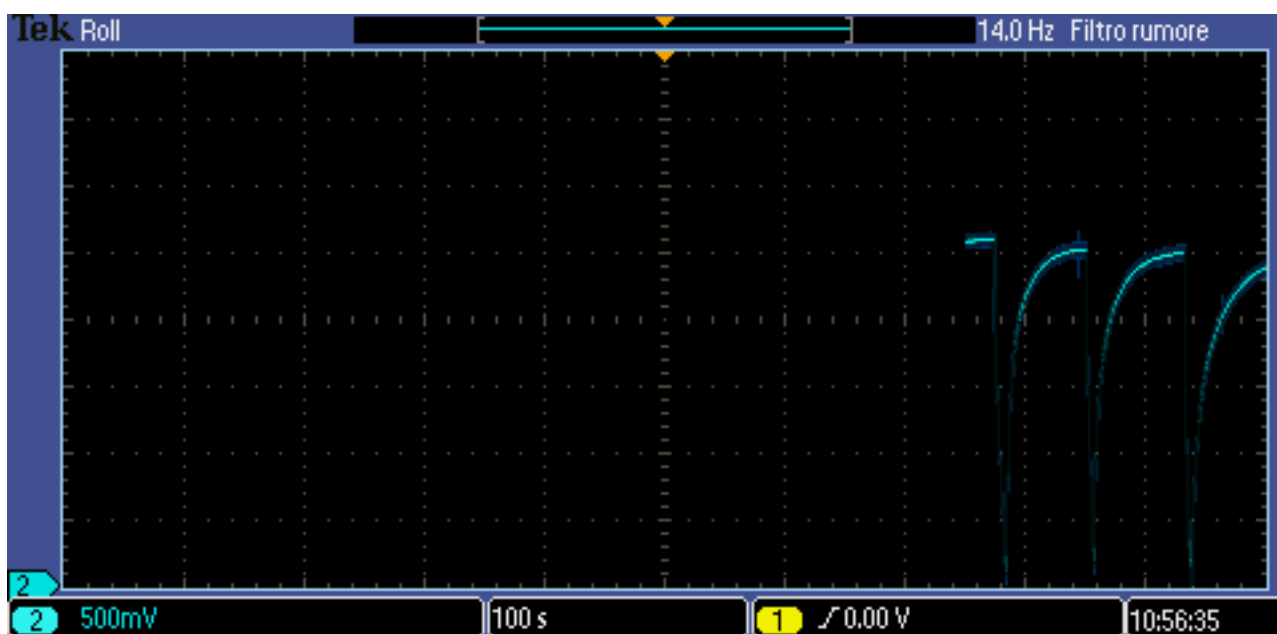


Figura 28 – Cicli successivi di scarica a -0.5 A di un supercapacitore ibrido.

D'altra parte, cicli continuativi di scarica a -0.5A partendo da 2.6V con successivi step di standby fanno vedere che dopo la scarica il sistema si riassetta sempre al voltaggio iniziale di

2.5V-2.6V. Questa è la forza del supercap ibrido: nello step di ricarica partirà sempre da uno stato iniziale minimo di 2.6V, indipendentemente dalla sua storia precedente di scarica. Infine, sono stati testati i funzionamenti continuativi dei dispositivi di benchmark PV+Accumulo realizzati in differenti condizioni sperimentali e operative.

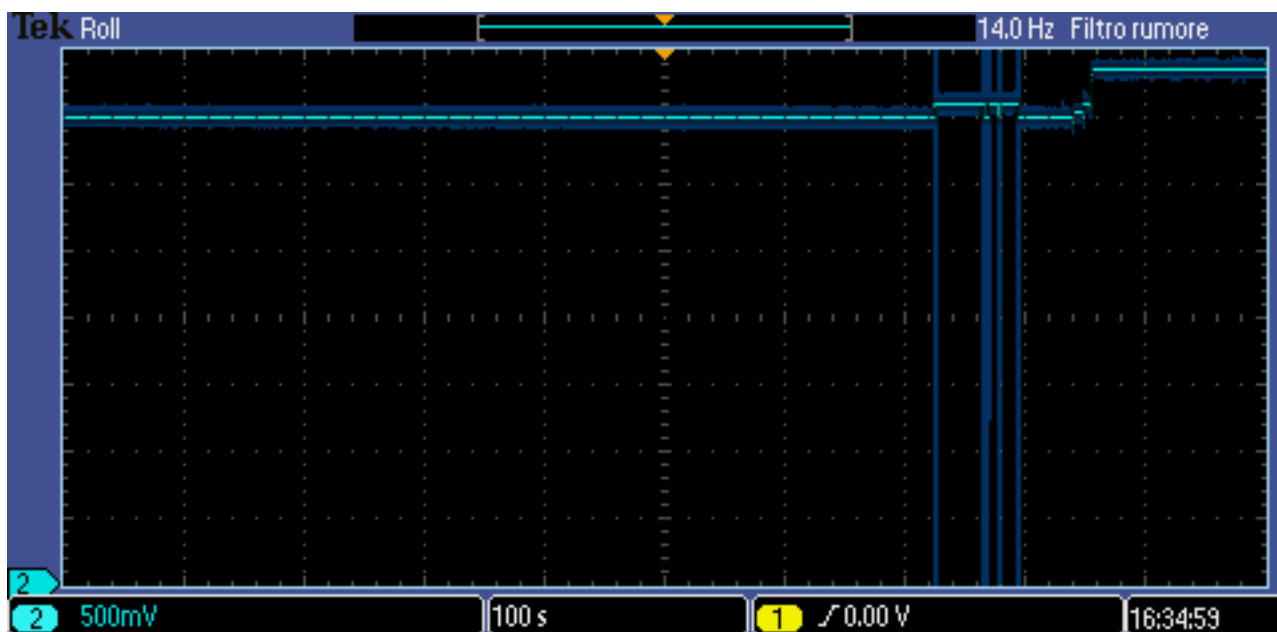


Figura 29 - Voltaggio del sistema PV+Batteria che alimenta un carico di 5W sotto irradianza di 1 sun.

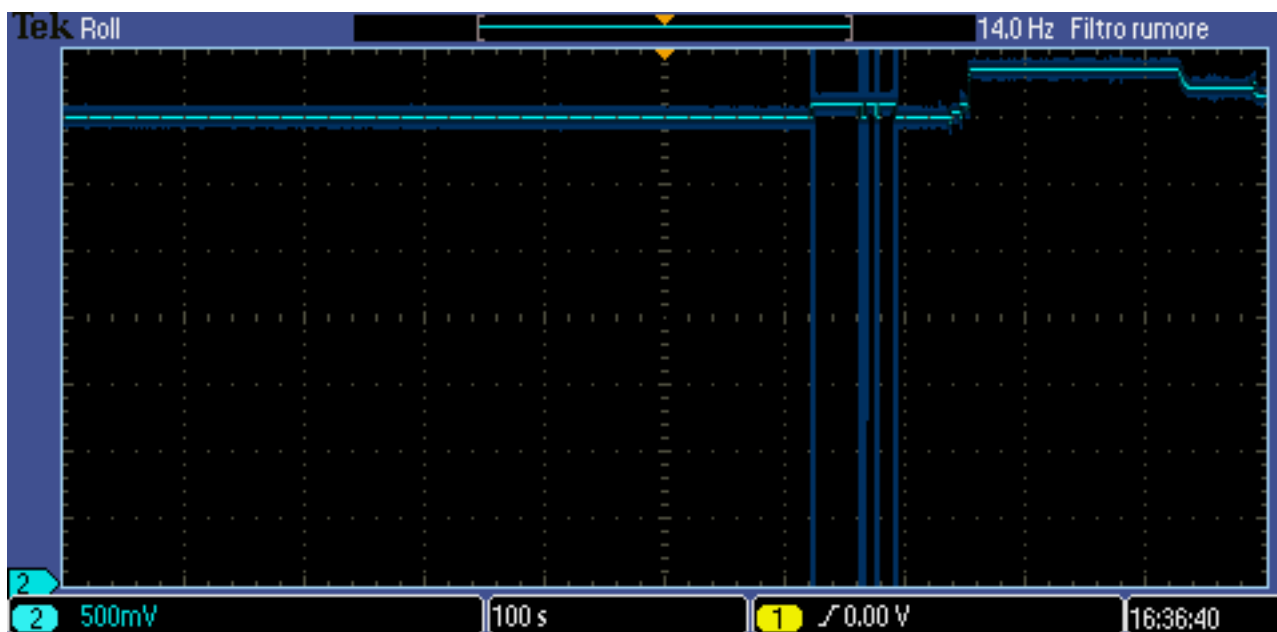


Figura 30 - Voltaggio del sistema PV+Batteria che alimenta un carico di 5W sotto irradianza di 0.6 sun.

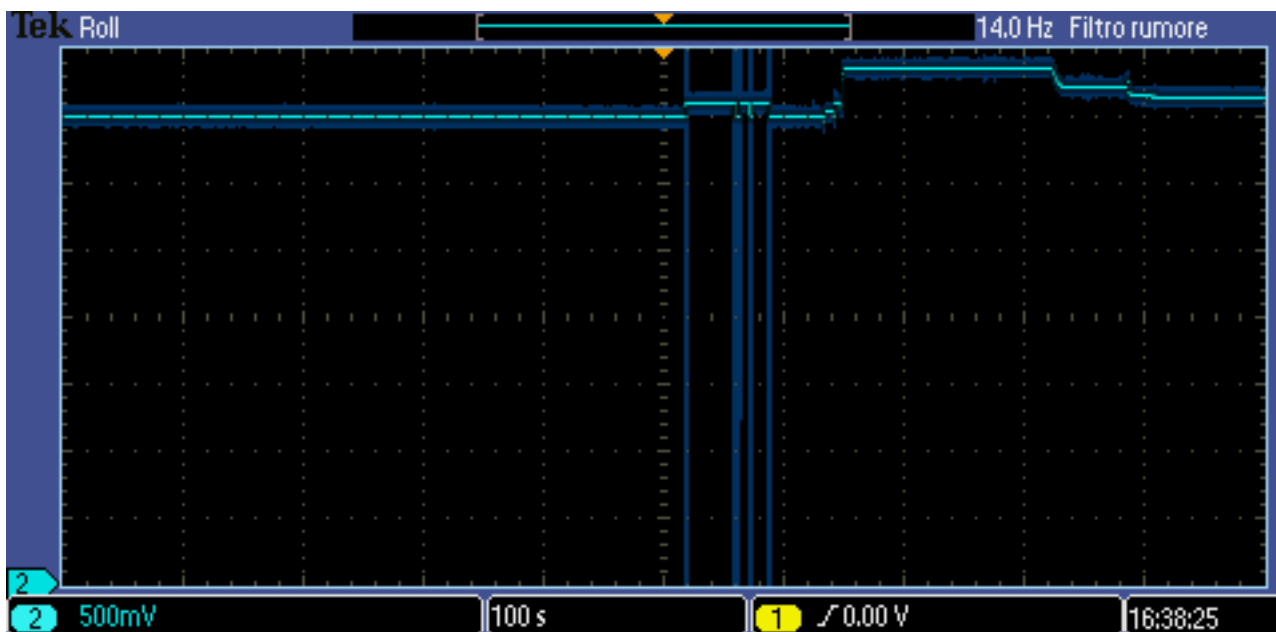


Figura 31 - Voltaggio del sistema PV+Batteria che alimenta un carico di 5W sotto irradianza di 0.4 sun.

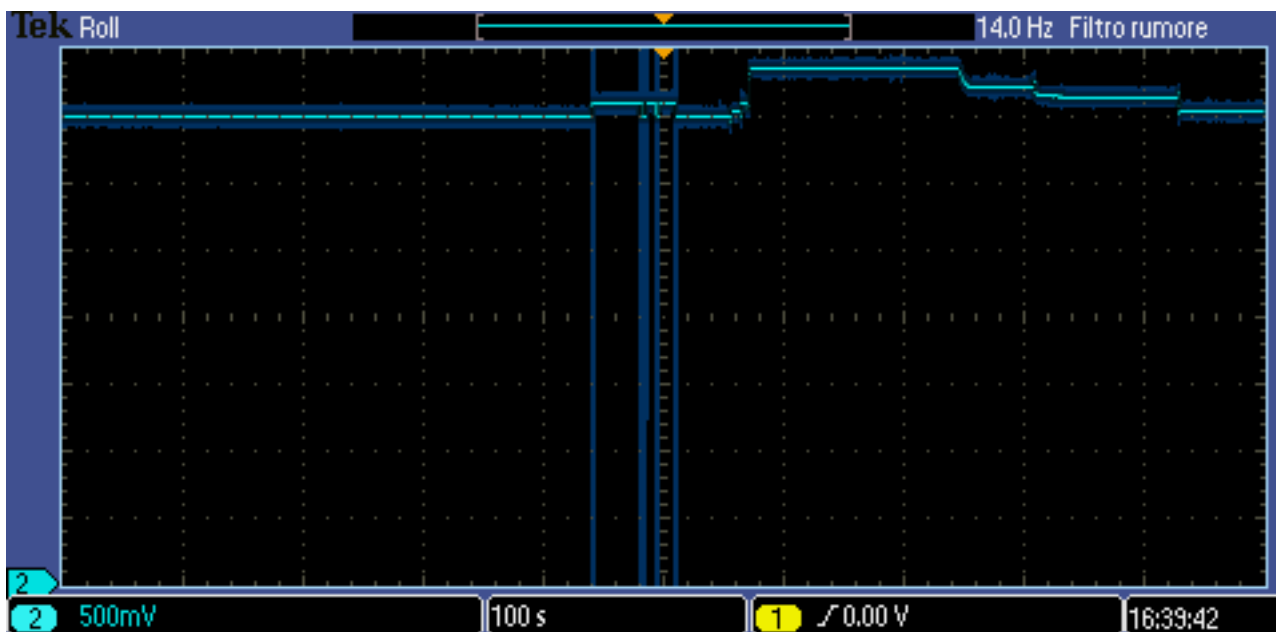


Figura 32 - Voltaggio del sistema PV+Batteria che alimenta un carico di 5W sotto irradianza di 0.1 sun

Nelle Figure 29,30,31,32 sono evidenziati nella parte destra le variazioni del voltaggio del sistema PV+Batteria mentre alimenta un carico di 5W, in varie condizioni di illuminazione. Quando l'irradianza è di 1 sun ($100\text{mW}/\text{cm}^2$), la potenza erogata dal modulo PV riesce ad alimentare direttamente il carico senza “chiedere” carica alla batteria: il voltaggio resta pari a quello della batteria carica (3.8V). Nel momento in cui l'irradianza si abbassa, la potenza elettrica proveniente dal pannello non è più in grado di alimentare da sola il carico da 5W. La batteria contribuisce quindi all'alimentazione, portando ad un abbassamento del voltaggio del sistema, che si assesta a 3.5V nel caso di irradianza pari a 0.1 sun. Il voltaggio, seppur più

basso, resta molto costante nel tempo. Questo è il merito della capacità della batteria, in grado di fornire più di 10Wh di energia al sistema, tenendo il voltaggio costante tra 4.2V e 3V.

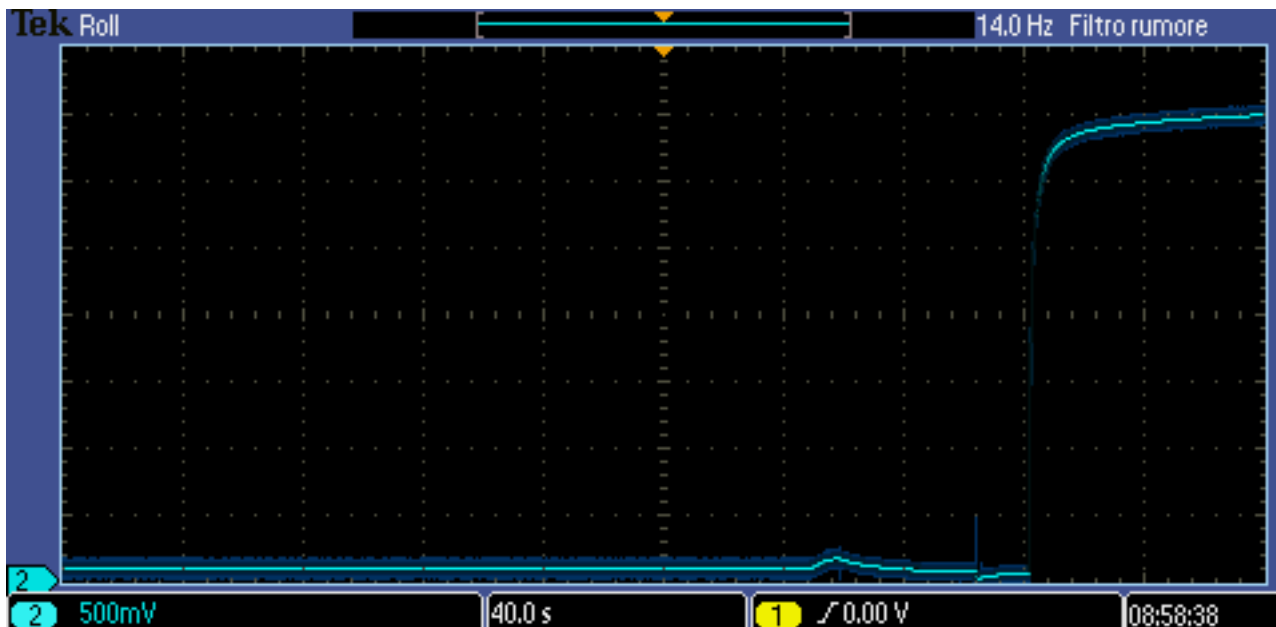


Figura 33 - Andamento del sistema dopo 18 ore in condizioni di buio e in assenza di un diodo di blocco.

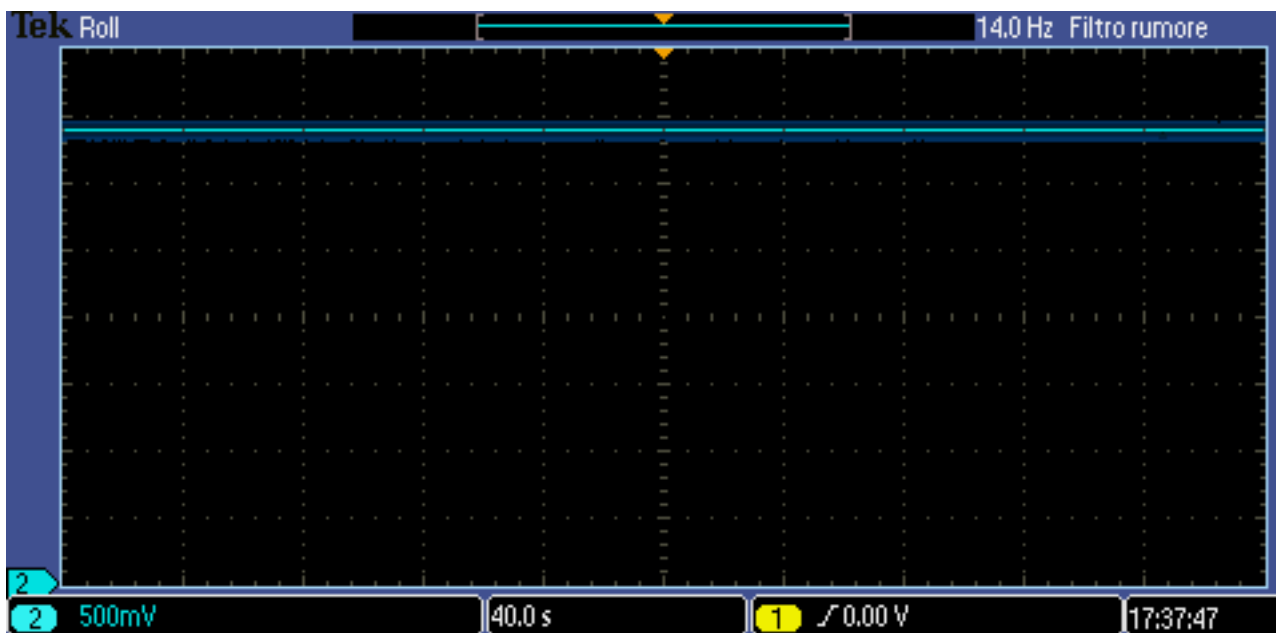


Figura 34 - Andamento del sistema dopo 18 ore in condizioni di buio e in presenza di un diodo di blocco da 0.2V di soglia.

Infine, possiamo notare dal confronto tra le figure 33 e 34 la vitale importanza di un diodo di blocco tra cella PV e batteria. Dopo 18 ore in condizioni di buio, la cella solare, che si comporta come un carico, riesce a scaricare completamente la batteria (Figura 33). Non appena illuminato, il sistema riporta il suo voltaggio ai valori standard della batteria, ma questi cicli continuati nel tempo di carica/scarica totale vanno a togliere capacità (e durata) alla

batteria, che ad un certo punto non riuscirà più a garantire l'autonomia necessaria ad alimentare il carico connesso al sistema. La presenza di un diodo con soglia di 0.2V, assorbendo potenza in maniera trascurabile e pur facendo diminuire il potenziale reale sulla batteria, riesce a mantenere il voltaggio del sistema stabile in condizioni di stand-by, salvaguardando la salute della batteria e allungando il tempo di invecchiamento (Figura 34).