



**MISSION
INNOVATION**

accelerating the clean energy revolution

POA MATERIALI AVANZATI PER L'ENERGIA

**PROGETTO IEMAP - Piattaforma Italiana Accelerata per i Materiali per
l'Energia**

Protocollo di caratterizzazione dei dispositivi

Stefano Rampino, Edmondo Gilioli, Francesco Pattini



D4.17, Protocollo di caratterizzazione dei dispositivi

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

Maggio 2023

Report MISSION INNOVATION

Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA
Mission Innovation 2021-2024 - II annualità
Progetto: Piattaforma accelerata per i Materiali per l'Energia
Work package: WP4 – Materiali per il Fotovoltaico
Linea di attività: LA4.17
Responsabile del Progetto: Massimo Celino (ENEA)
Responsabile della LA: Stefano Rampino (CNR IMEM)

Indice

SOMMARIO	4
1 INTRODUZIONE	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI	5
2.1 PROCEDURA PER LA CARATTERIZZAZIONE ELETTRICA DI UNA CELLA SOLARE	5
2.2 PROCEDURA PER LA CARATTERIZZAZIONE ELETTRICA DI UN SUPERCONDENSATORE	7
2.3 PROCEDURA PER LA CARATTERIZZAZIONE ELETTRICA DI UNA BATTERIA A FILM SOTTILE	10
2.3.1 <i>Misura della capacità di una batteria</i>	10
2.3.2 <i>Misura della resistenza interna</i>	10
2.3.3 <i>Caratteristiche di carica/scarica</i>	11
2.4 PROCEDURA PER LA CARATTERIZZAZIONE ELETTRICA DI UN DISPOSITIVO IBRIDO FOTOVOLTAICO + ACCUMULO.....	12
3 CONCLUSIONI	12

Sommario

Questo report descrive le procedure sperimentali per caratterizzare i componenti singoli ed integrati di un dispositivo ibrido fotovoltaico + accumulo. In particolare, sono descritte le procedure di caratterizzazione di un supercapacitore (supercondensatore), di una batteria a film sottile, e di un dispositivo composto da cella solare + accumulo a tre terminali.

1 Introduzione

La sfida attuale nella caratterizzazione dei dispositivi integrati fotovoltaico + accumulo è misurare tutti i parametri elettrici di cella fotovoltaica e di dispositivo di accumulo (supercap o batteria) sia singolarmente che in sinergia in un collegamento a tre terminali.

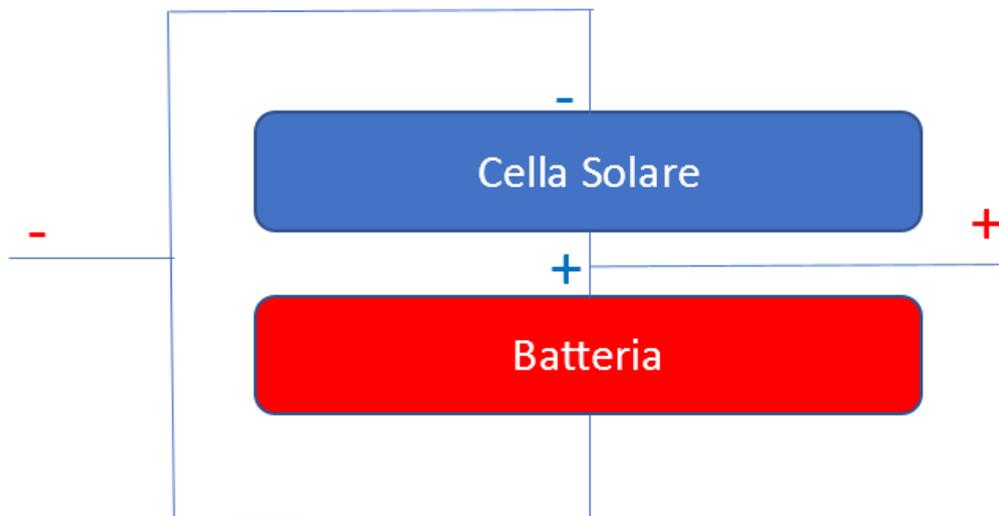


Figura 1 - Schema di un dispositivo ibrido fotovoltaico + accumulo a tre terminali.

Per la caratterizzazione di tutti i dispositivi sono necessarie le seguenti apparecchiature:

Per la cella solare: multimetro con range di tensione e temperatura adatti per monitorare la caratteristica IV nel 4° quadrante; simulatore solare calibrato o luce solare di cui si possa misurare istantaneamente l'irradianza.

Per la batteria: voltmetro, amperometro, oscilloscopio, generatore di tensione a corrente costante, resistenze variabili, dispositivo di scarica a corrente costante, piastra riscaldante (fino a 50°C), termocoppia.

Per i supercapacitori: voltmetro, amperometro, oscilloscopio, generatore di tensione a corrente costante, resistenze variabili, dispositivo di scarica a corrente costante.

Per i dispositivi ibridi: voltmetro, amperometro, oscilloscopio, generatore di tensione a corrente costante, resistenze variabili, dispositivo di scarica a corrente costante, piastra riscaldante, termocoppia, simulatore solare calibrato o luce solare ad irradianza nota.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Procedura per la caratterizzazione elettrica di una cella solare

- 1) Utilizzando un multimetro con range di tensione ($>V_{oc}$) e di corrente ($>I_{sc}$) adeguate alla misura della cella solare, andare a collegare la cella in polarizzazione diretta (+ del multimetro connesso al + della cella).
- 2) Mettere il multimetro in modalità di misura di tensione. Selezionare una corrente = 0.
- 3) Illuminare la cella. Il primo voltaggio misurato dal multimetro sarà la V_{oc} della cella solare
- 4) Mettere il multimetro in modalità di misura di corrente. Selezionare una tensione = 0

- 5) Illuminare la cella. La prima corrente misurata dal multimetro sarà la I_{sc} della cella solare, che diventerà J_{sc} se divisa per l'area attiva della cella solare (in cm^2)
- 6) Queste due misure preliminari servono per scegliere il range di misura della curva IV. Controllare che il range di corrente durante la misura di tensione sia maggiore della I_{sc} misurata.
- 7) Applicare una tensione decrescente dal valore di V_{oc} misurato fino a $V=0$, misurando la corrente (che avrà il segno negativo) ad ogni step.
- 8) Invertire il segno della corrente misurata
- 9) Plottare la corrente misurata in funzione della tensione applicata: questa è la curva IV della cella, simile a quella rossa riportata nella figura sottostante (che diventa JV dividendo I per l'area attiva della cella).
- 10) Moltiplicare i valori di corrente per i rispettivi valori di tensione: questo prodotto è la potenza generata dalla cella solare. Plottando questa grandezza in funzione del voltaggio si otterrà una curva simile a quella blu riportata nel grafico sottostante. Il massimo della curva è dato dal punto di massima potenza della cella P_{max} , che è data per un determinato valore di corrente (I_{mp}) e di Voltaggio (V_{mp}).

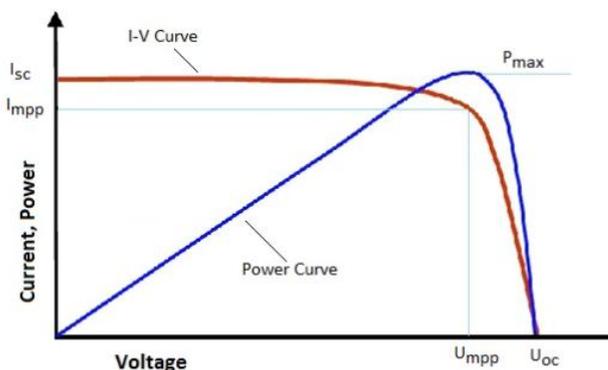


Figura 2 - Caratteristiche IV e PV di una cella solare illuminata

- 11) Calcolare il FF della cella, ottenuto dalla seguente formula:

$$FF = \frac{P_{max}}{J_{sc} V_{oc}} = \frac{J_{MP} V_{MP}}{J_{sc} V_{oc}}$$

- 12) Conoscendo in partenza la potenza irradiata dalla fonte luminosa P_{in} , calcolare l'efficienza fotovoltaica usando la seguente formula:

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}}$$

- 13) Eseguire tutta la procedura di misura precedente in condizioni di buio, applicando una tensione crescente da $-0.2V$ fino a $V > V_{oc}$
- 14) Plottare la corrente in funzione della tensione, ottenendo una curva simile a questa:

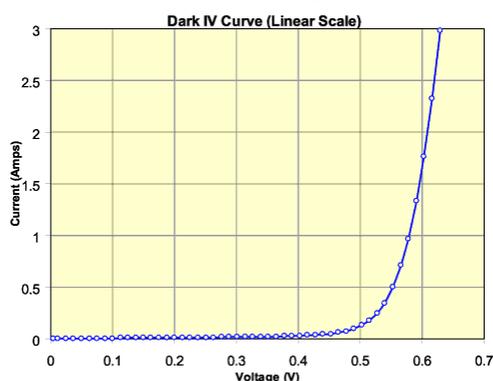


Figura 3 - Curva IV di una cella solare misurata al buio

- 15) Dalla regressione lineare della corrente calcolata tra -0.2V e 0.2V, quantificare la Resistenza di shunt della cella, reciproco della Conduttanza di Shunt. Questa grandezza serve per determinare le perdite del dispositivo ibrido in condizioni di sottoilluminazione o di buio.

2.2 Procedura per la caratterizzazione elettrica di un supercondensatore

I supercondensatori si distinguono dagli altri tipi di condensatori per la misurazione della loro capacità. Hanno valori di capacità molto elevati ($\gg 1F$) che non possono essere misurati direttamente con le apparecchiature standard. Il modo più comune per testare i valori di queste parti è il metodo di "carica e scarica". Di seguito sono riassunte le due procedure per caratterizzare la capacità di un supercondensatore, anche se integrato in un dispositivo ibrido.

Misura della capacità di un supercondensatore dalla curva di carica a corrente costante.

La procedura di misura è quindi la seguente:

- 1) Collegare tra di loro i due terminali del supercapacitore, che dovranno essere in stato di corto circuito per circa 30 minuti.
- 2) Applicare una corrente costante I agli estremi del supercondensatore fino a raggiungere la sua tensione nominale (V_{cc}).
- 3) Misurare il tempo di carica T tra il valore di tensione V_1 e il valore V_2 .
- 4) Calcolare la capacità in Farad con la seguente formula. $C = I * T / (V_1 - V_2)$ - (Tempo in secondi, Corrente in Ampere, Voltaggi in Volt).

Misura della capacità di un supercondensatore dalla curva di scarica a corrente costante.

La stessa misura si può effettuare anche in fase di scarica a corrente costante, secondo la procedura seguente:

- 1) Applicare una differenza di potenziale agli estremi del supercondensatore fino a raggiungere la sua tensione nominale (V_{cc}).
- 2) Lasciare il supercondensatore in steady state per 30 minuti alla sua tensione nominale.
- 3) Scaricare il supercondensatore attraverso un carico di corrente costante predeterminata. Misurare la caduta di tensione tra V_1 e V_2 Si misura il tempo di scarica tra V_1 e V_2 , $T(\text{sec})$ e si calcola la capacità con la seguente formula. $C = I * T(\text{sec}) / (V_1 - V_2)$, dove I è la corrente di scarica = $1 \times C$ (in Faraday)

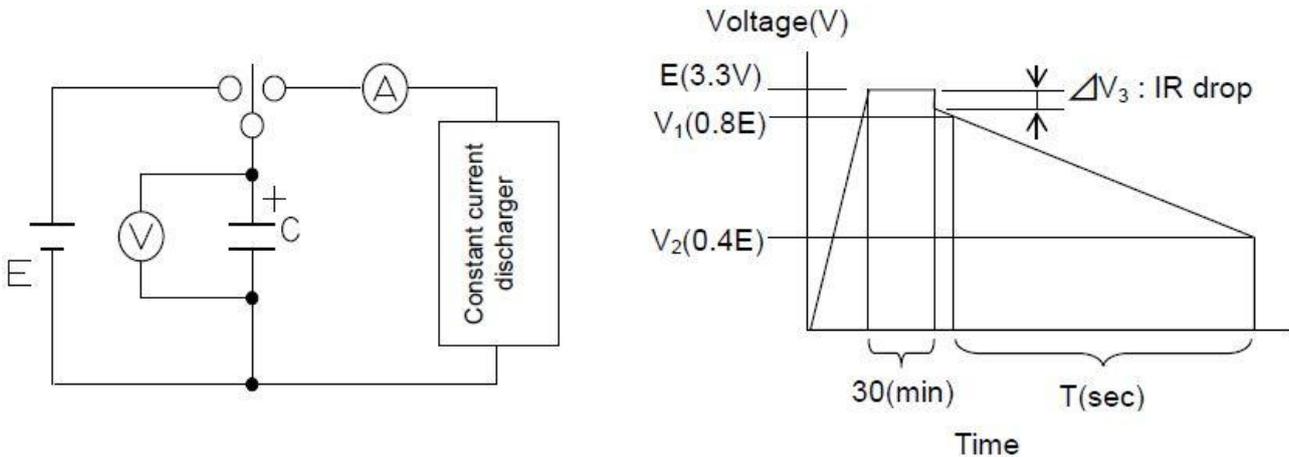


Figura 4 - Schema del circuito di scarica di un supercapacitore.

La caduta di potenziale (ΔV_3) a carica completa, disconnettendo il supercondensatore dal generatore di tensione, è dovuta alla resistenza interna del supercondensatore.

La figura 2 mostra che per il supercondensatore la tensione, e di conseguenza la corrente, sono discontinue al tempo zero della fase di scarica. Questo comportamento può essere spiegato ipotizzando che il supercondensatore si comporti come un condensatore ideale, di capacità C , in serie con il suo valore di resistenza interna, r , come mostrato in figura 3. Pertanto, la tensione che attraversa il condensatore superiore, V_{SC} , è data da:

$$V_{SC}(t) = rI(t) + \frac{q(t)}{C}.$$

Nel processo di scarica, a $t=0$ la corrente è data da $I = V_{CC}/(r+R)$ e la tensione salta da $V_{SC}(t)=V_{CC}(t<0)$ a $V_{SC}(t=0)=V_{CC}-\Delta V_3$. Pertanto, per $t \geq 0$:

$$V_{SC}(t) = (V_{CC}-\Delta V_3)\exp(-t/\tau). \quad (\text{Eq. 2})$$

Misura di capacità e resistenza interna dalla curva di scarica di un supercondensatore a resistenza costante.

Per questa misura utilizziamo una resistenza conosciuta R , posta in serie con il supercapacitore. Utilizziamo la relazione matematica che lega la costante di tempo RC all'andamento della tensione di carica del condensatore e data dalla seguente equazione:

$$V_c = V_{CC}(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$$

Possiamo osservare che dall'equazione precedente, trascorso un intervallo di tempo pari a RC , essa diventa:

$$V_c = V_{CC}(1 - e^{-1}) = 0,632 V_{CC}; \quad \text{poiché: } (1 - e^{-1}) = 0,632.$$

Ciò significa che misurando il tempo t che occorre per scaricare il supercapacitore da V_{CC} al 63.2% di V_{CC} , possiamo poi correlare il tempo alla sua capacità

$$\tau = R \cdot C \quad \text{otteniamo } C = \frac{\tau}{R}$$

La procedura è quindi schematizzata come segue:

- 1) Applicare una differenza di potenziale agli estremi del supercondensatore fino a raggiungere la sua tensione nominale (V_{cc}).
- 2) Lasciare il supercondensatore in steady state per 30 minuti alla sua tensione nominale.
- 3) Scaricare il supercondensatore attraverso un carico di resistenza costante predeterminata. Misurare il tempo t che occorre per la caduta di tensione tra V_{cc} e ed il valore relativo al 63.2% di V_{cc} .
- 4) La capacità del condensatore sarà uguale al rapporto tra τ (in secondi) e R (in Ohm).

In questa configurazione con una resistenza serie esterna conosciuta, è possibile conoscere, andando a variare i valori di quest'ultima, il valore della resistenza interna del supercapacitore, che si comporta allo stesso modo di una resistenza interna in un generatore di tensione.

Nel grafico successivo si chiarisce come, variando la resistenza esterna e misurando la costante di tempo al 63.2% della tensione nominale, è possibile conoscere la resistenza interna r andando ad estrapolare il valore di τ a $R = 0$, che sarà uguale al prodotto della resistenza interna per la capacità.

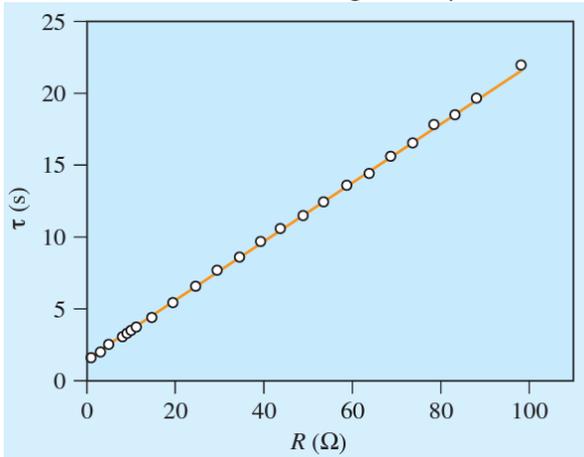


Figura 5 – Metodo di estrapolazione della resistenza interna r del supercondensatore utilizzando resistenze esterne variabili e misurando i tempi di caratteristici di scarica.

Un'altra modalità per conoscere la resistenza interna r è quella di misurare la discontinuità di voltaggio a $t=0$ (ΔV) in funzione della resistenza esterna (grafico sottostante). Dal fit della curva corrispondente si dovrebbe derivare direttamente la resistenza r dall'equazione 2.

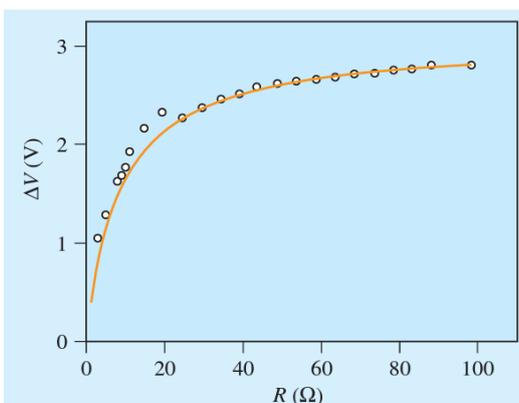


Figura 6 - Metodo alternativo per la determinazione della resistenza interna del supercondensatore dalla misura di discontinuità del voltaggio a $t=0$.

2.3 Procedura per la caratterizzazione elettrica di una batteria a film sottile

Sono fondamentalmente due i parametri da monitorare in una batteria elettrochimica: la sua capacità e la sua resistenza interna di una batteria fornisce informazioni preziose su una batteria, poiché un valore elevato di quest'ultima indica una lifetime solitamente più corta.

2.3.1 Misura della capacità di una batteria

Metodo CC-CV

- 1) Mantenere inizialmente la batteria a 25 ° C per 3 ore.
- 2) Caricare la batteria con una corrente pari a $1/20C$ fino alla tensione $V = V_{max}$.
- 3) Mantenere la tensione $V = V_{max}$ e ridurre la corrente di carica fino alla corrente $I = C / 200$ o alla minima corrente fornita dal generatore.
- 4) Mantenere la batteria a V_{max} per 3 ore.
- 5) Scaricare la batteria a velocità $C / 20$ fino a tensione $V = V_{min}$.
- 6) Mantenere la tensione a $V = V_{min}$ e ridurre la corrente di scarica fino alla corrente $I = 1/200 C$ o alla minima corrente fornita dal generatore.
- 7) Calcolare la capacità in Ah di scarica, moltiplicando il tempo di carica (in ore) per la corrente di scarica.
- 8) Mantenere la batteria in condizioni di riposo per 3 ore. Questo valore di tensione è considerato lo 0% SOC (State of Charge).
- 9) Caricare la cella alla velocità $C/3$ fino alla tensione $V = V_{max}$
- 10) Mantenere la tensione $V = V_{max}$ e ridurre la corrente di carica fino alla corrente $I = C / 200$ o al minimo corrente fornita dal generatore.
- 11) Calcolare la capacità in Ah di carica integrando la corrente di carica (A) nel tempo di carica.
- 12) Lasciare a V_{max} per 3 ore. L'ultimo valore di tensione letto è considerato il 100% di SOC.

2.3.2 Misura della resistenza interna

La procedura per la determinazione della resistenza interna della batteria è la seguente:

- 1) Mantenere inizialmente la batteria a 25 ° C per 3 ore.
- 2) Caricare la batteria con una corrente pari a $0.1 C$ fino alla tensione massima, corrispondente a SOC=100%.
- 3) Mantenere la tensione $V = V_{max}$ e ridurre la corrente di carica fino alla corrente $I = C / 200$ o alla minima corrente fornita dal generatore.
- 4) Mantenere la batteria a V_{max} per 3 ore. Il valore letto a circuito aperto è l'OVC della batteria
- 5) Scaricare la batteria con una corrente I di massimo $0.5 C$ per due secondi.
- 6) Misurare la tensione (V_{dis}) ai capi della batteria durante la scarica di massimo due secondi
- 7) Calcolare la resistenza interna della batteria con la seguente formula: $r = (OVC - V_{dis})/I$

La misura della resistenza interna in funzione del tempo e dei cicli di scarica consente di completare l'analisi sulla lifetime del dispositivo. Un aumento improvviso della resistenza (ad es. da qualche decina di milliohm a un centinaio) potrebbe essere il sintomo di un malfunzionamento della batteria, che necessita quindi un'analisi periodica più ravvicinata.

2.3.3 Caratteristiche di carica/scarica

Curve di carica

Dal metodo CC-CV si sono ottenuti il valore di capacità massima (espresso in Ah o mAh), che rappresenta il 100% di SOC il valore di OVC relativo al 100% di SOC ed il valore di OVC relativo allo 0% di SOC. Con questi tre valori si ricostruiranno le curve di carica e di scarica della batteria.

Nel caso della carica, bisognerà utilizzare la stessa procedura CC-CV:

- 1) Applicare una corrente di carica costante partendo dal voltaggio OVC relativo allo 0% di SOC.
- 2) Monitorare nel tempo il voltaggio ai capi della batteria durante la ricarica, e nella condizione di corrente costante, la dipendenza temporale del voltaggio OVC diventerà una direttamente una curva OVC vs. SOC.
- 3) Nelle batterie al litio, ad un certo punto della curva di carica il voltaggio sarà praticamente diventato costante e uguale al valore di OVC misurato al 100% di SOC, mentre la capacità avrà appena oltrepassato l'80% del SOC.
- 4) Da questo punto procedere a tensione costante (CV), abbassando al minimo la corrente erogata dal generatore: la corrente si ridurrà esponenzialmente fino a raggiungere un valore nullo al 100% di SOC.
- 5) Plottare SOC, voltaggio e corrente di carica in funzione del tempo
- 6) Plottare SOC in funzione del voltaggio. La regione in cui il voltaggio si mantiene costante variando la SOC è il voltaggio di plateau della batteria.

Curve di scarica

Per derivare la curva di scarica, bisogna partire dalla condizione di SOC=100%.

- 1) Caricare la batteria al massimo della sua capacità.
- 2) Applicare una corrente di scarica costante, solitamente intorno a 0.5C per non danneggiare la batteria.
- 3) Misurare la variazione del voltaggio in funzione del tempo. A corrente costante il grafico diventa direttamente la variazione della capacità in funzione del voltaggio. Poiché siamo in condizioni di scarica, con il passare del tempo del tempo non misuriamo lo stato di carica, come nel caso della curva precedente, ma misuriamo la profondità di scarica della batteria (DOD), dove $DOD = 100\% - SOC$.
- 4) Continuare a misurare la variazione del voltaggio in funzione del tempo, fino a che la tensione non raggiunge il valore corrispondente a 0% SOC, ossia 100% DOD.
- 5) Ricostruire curva di voltaggio in funzione del DOD.
- 6) Ripetere la misura variando la corrente di scarica, a correnti più basse corrisponderanno valori più alti di tensione a parità di DOD, viceversa se si aumenta la corrente di scarica diminuirà il voltaggio della batteria in un determinato SOC.

- 7) Ripetere la misura di scarica andando a variare la temperatura della batteria, posizionando quest'ultima su una piastra e monitorando con una termocoppia che la temperatura rimanga costante durante tutta la fase di scarica.

2.4 Procedura per la caratterizzazione elettrica di un dispositivo ibrido fotovoltaico + accumulo

L'efficienza di generazione/carica dei sistemi ibridi è definita dall'equazione:

$$\eta = \frac{V_b \times C_b}{P \times A \times t \times 1/3600} \times 100$$

Per determinare il ciclo di carica scarica del dispositivo PV+ Accumulo, seguire la seguente procedura:

- 1) Connettere in parallelo cella solare (o minimodulo PV) e dispositivo di accumulo (batteria o supercap).
- 2) Coprire la cella solare, connettere un carico che svuoti la batteria fino a 0% SOC e non esporre alla luce per almeno 3 ore.
- 3) Scoprire e illuminare la cella.
- 4) Monitorare il valore della tensione misurata ai capi in funzione del tempo. Nel caso di una batteria scarica, la tensione di partenza sarà la tensione minima con 0% di SOC. Nel caso di un supercondensatore, la tensione di partenza sarà prossima allo 0.
- 5) Misurare il tempo necessario per arrivare a 100% SOC. Il valore andrà inserito nella formula dell'efficienza totale citata all'inizio del paragrafo.
- 6) Coprire la cella e registrare l'ultimo valore di tensione OVC (V_b).
- 7) Conoscendo potenza irradiante, area del dispositivo solare, tensione finale della carica e capacità nominale, è possibile ricavare l'efficienza finale del dispositivo ibrido.
- 8) Successivamente registrare il decremento di tensione in funzione del tempo in condizioni di buio. E' fondamentale capire qual è la variazione negativa di tensione nel tempo, e la relativa dissipazione di potenza che poi il dispositivo dovrà recuperare quando nuovamente illuminato.
- 9) Ripetere la misura di carica variando la temperatura del dispositivo, posto su una piastra riscaldante a temperatura nota e costante

3 Conclusioni

In questo report sono state fornite le procedure attività sono stati studiate le modalità caratterizzazione dei dispositivi che compongono i sistemi ibridi fotovoltaico + accumulo. Sono stati descritti i parametri più importanti che caratterizzano i singoli dispositivi di accumulo, supercapacitori e batterie, i parametri elettrici delle celle solari e l'efficienza del dispositivo ibrido PV + accumulo. Sono state validate delle procedure di caratterizzazione di tutti i dispositivi in gioco, sia a livello teorico che a livello sperimentale, variando le caratteristiche dei dispositivi di accumulo e fotovoltaici e studiandone la risposta reale. Queste procedure

hanno permesso di caratterizzare i dispositivi di benchmark reperiti commercialmente che saranno utili come riferimento per i dispositivi custom realizzati all'interno del progetto IEMAP da altri collaboratori.