



Ricerca di Sistema elettrico

Moduli standard di batterie al litio: test di caratterizzazione e duty cycle per applicazioni stazionarie, con ottimizzazione del BMS

F. Vellucci, G. Pede, V. Sglavo, F. D'Annibale, A. Mariani

MODULI STANDARD DI BATTERIE AL LITIO: TEST DI CARATTERIZZAZIONE E DUTY CYCLE PER APPLICAZIONI
STAZIONARIE, CON OTTIMIZZAZIONE DEL BMS

F. Vellucci, G. Pede, V. Sglavo, F. D'Annibale, A. Mariani (ENEA)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto: Sistemi avanzati di accumulo dell'energia

Obiettivo: Sperimentazione e caratterizzazione di moduli e sistemi al litio

Responsabile del Progetto: Mario Conte, ENEA



Indice

| | |
|--|----|
| SOMMARIO..... | 5 |
| 1 INTRODUZIONE..... | 6 |
| 2 DESCRIZIONE DEI MODULI STANDARD | 6 |
| 3 PROVE | 7 |
| 3.1 PROVE DI CARATTERIZZAZIONE | 8 |
| 3.2 PROVE PER APPLICAZIONI STAZIONARIE | 11 |
| 3.2.1 Prova di “power balancing” | 11 |
| 3.2.2 Prova di time shift..... | 13 |
| 4 OTTIMIZZAZIONE DEL SISTEMA ELETTRONICO DI GESTIONE E CONTROLLO..... | 15 |
| 4.1 RICONFIGURABILITÀ DINAMICA | 15 |
| 4.2 OTTIMIZZAZIONE DELLA POSIZIONE DELLA SCHEDA ELETTRONICA ALL’INTERNO DEL MODULO | 16 |
| 4.3 ALTRI MIGLIORAMENTI RELATIVI ALLA SCHEDA ELETTRONICA | 17 |
| 4.4 MIGLIORAMENTI MECCANICI | 18 |
| 5 CONCLUSIONI..... | 20 |
| 6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI..... | 20 |
| 7 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI..... | 21 |
| 8 ALLEGATO 1 – DIAGRAMMI RELATIVI ALLE PROVE DI CARATTERIZZAZIONE PER IL MODULO DA 30AH @ +23°C.. | 22 |
| 9 ALLEGATO 2 – DIAGRAMMI RELATIVI ALLE PROVE DI CARATTERIZZAZIONE PER IL MODULO DA 30AH @ +30°C.. | 24 |
| 10 ALLEGATO 3 – DIAGRAMMI RELATIVI ALLE PROVE DI CARATTERIZZAZIONE PER IL MODULO DA 30AH @ +40°C.. | 26 |
| 11 ALLEGATO 4 – DIAGRAMMI RELATIVI ALLE PROVE DI CARATTERIZZAZIONE PER IL MODULO DA 60AH @ +23°C.. | 28 |
| 12 ALLEGATO 5 – DIAGRAMMI RELATIVI ALLE PROVE DI CARATTERIZZAZIONE PER IL MODULO DA 60AH @ +30°C.. | 30 |
| 13 ALLEGATO 6 – DIAGRAMMI RELATIVI ALLE PROVE DI CARATTERIZZAZIONE PER IL MODULO DA 60AH @ +40°C.. | 32 |
| 14 ALLEGATO 7 – DIAGRAMMI RELATIVI ALLE PROVE DI CARATTERIZZAZIONE PER IL MODULO DA 100AH @ +23°C | 34 |
| 15 ALLEGATO 8 – DIAGRAMMI RELATIVI ALLE PROVE DI CARATTERIZZAZIONE PER IL MODULO DA 100AH @ +30°C | 36 |
| 16 ALLEGATO 9 – DIAGRAMMI RELATIVI ALLE PROVE DI CARATTERIZZAZIONE PER IL MODULO DA 100AH @ +40°C | 38 |
| 17 ALLEGATO 10 – TABELLA RIEPILOGO PROVA DI SCARICA 3C – CARICA 1C | 40 |
| 18 ALLEGATO 11 – TABELLA PROFILO DI PROVA “POWER BALANCING” | 41 |
| 19 ALLEGATO 12 – TABELLA PROFILO DI PROVA “TIME SHIFT” | 42 |
| 20 ALLEGATO 13 – PROVA DI “POWER BALANCING” PER IL MODULO DA 30AH | 43 |
| 21 ALLEGATO 14 – PROVA DI “TIME SHIFT” PER IL MODULO DA 30AH | 44 |
| 22 ALLEGATO 15 – PROVA DI “POWER BALANCING” PER IL MODULO DA 60AH | 45 |
| 23 ALLEGATO 16 – PROVA DI “TIME SHIFT” PER IL MODULO DA 60AH | 46 |
| 24 ALLEGATO 17 – PROVA DI “POWER BALANCING” PER IL MODULO DA 100AH | 47 |
| 25 ALLEGATO 18 – PROVA DI “TIME SHIFT” PER IL MODULO DA 100AH | 48 |

| | | |
|----|--|----|
| 26 | ALLEGATO 19 – DISEGNO DEL CASE DEL MODULO DA 30AH | 49 |
| 27 | ALLEGATO 20 – DISEGNO DEL CASE DEL MODULO DA 60AH | 50 |
| 28 | ALLEGATO 21 – DISEGNO DEL CASE DEL MODULO DA 100AH | 51 |

Sommario

Il precedente Piano Annuale di Realizzazione si era concluso con la realizzazione di tre tipologie di moduli batterie al litio: un modulo di piccola taglia (12,8 V – 30 Ah), uno di media taglia (12,8 V – 60 Ah) ed uno di grande taglia (12,8 V -100 Ah). Perseguendo gli obiettivi delle precedenti annualità, questi moduli erano stati concepiti come moduli sostitutivi all’uso delle tradizionali batterie al piombo in applicazioni d’avviamento/alimentazione ausiliari e trazione di veicoli elettrici off-road. Obiettivo della presente annualità era quello di verificare la possibilità d’impiego di detti moduli in applicazioni stazionarie, attraverso l’esecuzione di prove di caratterizzazione e l’applicazione di profili di lavoro tipici di tali applicazioni. Parallelamente era richiesta un’ottimizzazione della scheda elettronica BMS, introducendo dei fattori di specializzazione del BMS per applicazioni stazionarie, a cui si aggiunge la realizzazione di alcuni miglioramenti suggeriti dall’esperienza di montaggio ed esercizio dei moduli prodotti nella precedente annualità.

Sono state eseguite prove di caratterizzazione ai massimi regimi di corrente in carica e scarica consentiti dal Costruttore delle celle e prove caratteristiche dell’impiego stazionario, come la prova di “power balancing” e quella di “time shift”, ottenendo risultati soddisfacenti.

Inoltre è stata introdotta la riconfigurabilità dinamica come fattore di specializzazione del BMS per applicazioni stazionarie, ed è stato studiato un nuovo posizionamento della scheda elettronica che ha consentito di ottenere una notevole riduzione delle dimensioni in pianta dei moduli, senza alterarne l’altezza in maniera significativa. Le conseguenti modifiche sulla meccanica hanno condotto ad un restyling dei moduli: i nuovi esemplari prodotti, uno per ciascuna tipologia di modulo, in risposta ai deliverable del Piano Annuale di Realizzazione, costituiscono dei prodotti disponibili per una successiva fase di ingegnerizzazione, da condurre con eventuali partner industriali interessati.

1 Introduzione

Le attività del precedente Piano Annuale di Realizzazione sono terminate con la realizzazione di tre moduli di batterie al litio ferro fosfato: uno di piccola taglia (12,8 V – 30 Ah), uno di media taglia (12,8 V – 60 Ah) ed uno di grande taglia (12,8 V – 100 Ah), tutti dotati di scheda elettronica di gestione e controllo, nonché di ventole di raffreddamento. Tali moduli, mostrati in Figura 1, sono stati inizialmente concepiti per l'impiego nel campo veicolare, come batterie d'avviamento/alimentazione ausiliari, o come batterie di trazione per veicoli elettrici off-road. Sfruttando la versatilità dei moduli, che costituisce uno dei motivi per cui è stato loro conferito l'attributo di moduli "standard", l'attività del presente Piano Annuale di Realizzazione prevedeva di verificarne la possibilità di utilizzo in applicazioni stazionarie, mantenendo i vantaggi tipici delle batterie al litio rispetto a quelle al piombo in termini di capacità di accettazione di ricariche rapide, oltre che in termini di riduzione di peso e volume, esigenza meno sentita nel settore stazionario rispetto a quello automobilistico, ma comunque sempre presente per ragioni legate all'ingombro ed alla maneggevolezza.



Figura 1. Moduli batterie

L'attitudine all'impiego in applicazioni stazionarie è stata verificata sottoponendo i moduli ad una serie di prove, consistenti sostanzialmente in cicli di carica e scarica a diverse temperature, in condizioni il più possibile simili a quelle d'esercizio.

Parallelamente all'esecuzione delle prove, è stata eseguita un'attività di progettazione per ottimizzare la scheda elettronica di gestione e controllo, al fine di adattarla meglio all'impiego in applicazioni stazionarie, come previsto dal Piano Annuale di Realizzazione. Tale attività è stata svolta dal Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione dell'Università di Pisa su specifica ENEA, che successivamente si è occupata della realizzazione ed approvvigionamento della scheda elettronica nuova versione, nonché delle conseguenti modifiche meccaniche sull'involucro, giungendo, in conclusione, alla nuova release dei moduli batterie. E' stato realizzato un esemplare per ciascuna tipologia di modulo.

2 Descrizione dei moduli standard

Le prove sono state eseguite sui moduli standard realizzati nel precedente Piano Annuale di Realizzazione. Ciascun modulo è costituito da 4 celle al LiFePO_4 da 3,2 V nominali, collegate in serie, ottenendo una tensione totale pari a 12,8 V nominali. Sono state prodotte tre tipologie di modulo: piccola, media e grande taglia. Il modulo di piccola taglia è equipaggiato con celle da 30 Ah, quello di media taglia con celle da 60 Ah ed infine quello di grande tagli con celle da 100 Ah. Ciascun modulo è corredato di una scheda elettronica di gestione e controllo (BMS) con bilanciamento attivo e di un sistema di raffreddamento costituito da tre ventole da $34,5 \text{ Nm}^3/\text{h}$ $75,5 \text{ Pa}$ @ 7.000 giri/min ciascuna. La scheda elettronica BMS è stata progettata dal Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione dell'Università di Pisa (su specifica ENEA) e realizzata dall'ENEA nella precedente annualità. La Figura 2 illustra l'interno dei moduli e la Tabella 1 ne riassume le principali caratteristiche elettriche. Si rimanda ai rapporti relativi alle precedenti annualità per i dettagli

relativamente alla scelta del tipo di chimica delle celle, la capacità, la scheda elettronica, il thermal management e la configurazione geometrica [1], [2], [3], [4], [5].



Figura 2. Vista interna dei moduli batterie: 30Ah e 60Ah (sinistra), 100Ah (destra)

Tabella 1. Principali caratteristiche elettriche dei moduli

| Grandezza | | Piccola taglia | Media taglia | Grande taglia |
|---|--|----------------|--------------|---------------|
| Tensione nominale singola cella [V] | | 3,2 | 3,2 | 3,2 |
| Numero di celle in serie | | 4 | 4 | 4 |
| Capacità nominale [Ah] | | 30 | 60 | 100 |
| Temperatura di esercizio (scarica) [°C] | | -20 ÷ +65 | -20 ÷ +65 | -20 ÷ +65 |
| Temperatura di esercizio (carica) [°C] | | 0 ÷ +45 | 0 ÷ +45 | 0 ÷ +45 |
| Scarica @ +23°C | Max corrente continuativa [A] | 90 | 180 | 300 |
| | Corrente di picco @ 60 sec [A] | 150 | 300 | 500 |
| | Tensione di cut-off (valore di cella) [V] | 2,5 | 2,5 | 2,5 |
| Carica @ +23°C | Metodo di carica | CC/CV | CC/CV | CC/CV |
| | Max corrente di carica [A] | 30 | 60 | 100 |
| | Tensione max consigliata (valore di cella) [V] | 3,65 | 3,65 | 3,65 |
| | Tensione di cut-off (valore di cella) [V] | 3,85 | 3,85 | 3,85 |

3 Prove

La verifica dell' idoneità all'impiego dei moduli batterie in applicazioni stazionarie è stata condotta sottoponendo i moduli all' esecuzione di prove di caratterizzazione e prove specialistiche per il settore stazionario, finalizzate a verificare le prestazioni dei moduli nel loro complesso, cioè come insieme di celle, scheda elettronica BMS, meccanica (involucro) e thermal management, in condizioni il più possibile simili a quelle d' esercizio. Le prove sono state eseguite presso il Centro Ricerche "Casaccia" dell' ENEA, mediante l' impiego di ciclatori e camere climatiche, di cui un esempio è riportato nella Figura 3.



Figura 3. Camera climatica (sinistra) e ciclatore (destra)

Durante l’esecuzione delle prove lo stato delle singole celle è stato costantemente monitorato dal sistema elettronico di gestione e controllo, che interviene in caso di allarme facendo “aprire” un contattore che disconnette il modulo batterie dal ciclatore, interrompendo ogni fase di lavoro attiva dello stesso. La Figura 4 illustra, a titolo di esempio, l’impostazione dei parametri di sicurezza nella finestra di configurazione del BMS per il modulo da 100 Ah, eseguita prima dell’inizio delle prove.

```
#####
# BMS-ENEA CONFIGURATION FILE #
#####
# PARAMETER NAME                               VALUE
# USE . AS DECIMAL SEPARATOR
#
CANUSB_Port                                    COM4
# CAN Baudrate 500kb/s !!do not change!!
CAN_Baudrate                                  6
# CAN Command Message ID !!do not change!!
CAN_CMD_ID                                    0x100

# BATTERY PACK ORGANIZATION
#NUM_OF_MODULES                               4
MASTER_MODULE_ID                             5
SLAVE_1_MODULE_ID                             1
SLAVE_2_MODULE_ID                             2
SLAVE_3_MODULE_ID                             3

# BATTERY SAFE OPERATING RANGE
# ALERT CONDITIONS: ACTIVATE ALARM SIGNAL FOR TIME_ALARM_ON [s]
TIME_ALARM_ON                                 5
V_MAX_ALERT                                   3.85
V_MIN_ALERT                                   2.50
T_MAX_ALERT                                   65
T_MIN_ALERT                                   0
I_MAX_CHARGE_ALERT                            150
I_MAX_DISCHARGE_ALERT                         400
# ERROR CONDITIONS: SWITCH OFF CONTACTOR
V_MAX_ERROR                                   3.90
V_MIN_ERROR                                   2.40
T_MAX_ERROR                                   67
T_MIN_ERROR                                   -10
I_MAX_CHARGE_ERROR                            200
I_MAX_DISCHARGE_ERROR                         500

#FAN CONTROL
T_CELL_FAN_ON                                 45
T_CELL_FAN_OFF                                40
T_BOARD_FAN_ON                                60
T_BOARD_FAN_OFF                               55
```

Figura 4. Esempio di file di configurazione del BMS

La funzione di sicurezza viene gestita dal BMS a due livelli: un primo livello di “alert” ed un secondo livello di “error”. In fase di configurazione vengono impostati i valori di “alert” per i parametri che definiscono lo stato delle celle (tensione, temperatura, corrente) ed i corrispondenti valori di “error”. Se, durante il funzionamento, si raggiunge il valore di “alert” per uno dei parametri controllati dal BMS, questo genera un messaggio di allarme. Se la condizione di allarme permane per il tempo “TIME_ALARM_ON” (anch’esso impostabile nella fase di configurazione) l’allarme viene tramutato in errore e contemporaneamente viene “aperto” il contattore che disconnette il modulo batterie dal ciclatore. Se durante il funzionamento si raggiunge il valore di “error” per uno dei parametri suddetti, il BMS comanda l’immediata “apertura” del contattore. Come si vede dal confronto della Figura 4 con la Tabella 1, le prove sono state eseguite impostando i valori di sicurezza forniti dal Costruttore delle celle. La Figura 4 mostra anche l’impostazione per il funzionamento delle ventole: accensione al valore della temperatura di cella pari a +45 °C (ogni cella è strumentata con un sensore di temperatura del tipo NTC) e spegnimento a +40 °C, oppure accensione se la temperatura sulla scheda elettronica (anch’essa dotata di sensore di temperatura) raggiunge il valore +60 °C e spegnimento quando detta temperatura scende a +55 °C.

3.1 Prove di caratterizzazione

Le prove di caratterizzazione sono state condotte sottoponendo i moduli a cicli costituiti da una scarica a corrente costante di intensità pari a $3C^1$, seguita, dopo una pausa di ½ ora, da una carica del tipo corrente

¹ Con la dicitura nC si intende un valore di corrente pari ad n volte il valore della capacità nominale C. Analogamente, con il termine C/n si intende un valore di corrente pari al valore della capacità nominale C diviso per n.

costante/tensione costante con valore massimo di corrente pari ad 1C, cioè sono state poste in successione una scarica ed una carica ai massimi livelli di corrente consentiti dal Costruttore delle celle. La carica alla corrente massima consente, tra l'altro, di saggiare la capacità del modulo batterie di accettare cariche rapide. La Tabella 2 riporta la sequenza completa di prova.

Tabella 2. Sequenza prova di caratterizzazione

| N° Fase | Descrizione della fase |
|---------|--|
| 1 | Ciclo standard di preparazione |
| 2 | Acclimatazione alla temperatura di prova |
| 3 | Scarica completa a corrente costante 3C |
| 4 | Pausa 1/2h |
| 5 | Carica completa CC/CV, $I_{max} = 1C$ |

Prima della prova il modulo è stato sottoposto a un ciclo standard² di preparazione e mantenuto a temperatura controllata per il tempo necessario al raggiungimento della temperatura di prova.

La scarica completa è stata ottenuta attraverso l'applicazione di una corrente costante di intensità 3C fino al raggiungimento della condizione di fine scarica, che si verifica quando la tensione di una cella raggiunge il valore minimo, 2,5 V, indicato dal Costruttore delle celle oppure qualora sia raggiunta la tensione minima di modulo, 10 V, corrispondente al raggiungimento della tensione minima in tutte le celle.

La durata della pausa è stata appositamente ridotta, al fine di esaltare lo stress termico.

La carica applicata è del tipo corrente costante – tensione costante, cioè composta da una fase di carica a corrente costante, con valore di corrente uguale al limite massimo per la corrente di carica continuativa, 1C, fornito dal Costruttore delle celle, fino al raggiungimento della tensione massima di modulo ed una fase di carica a tensione costante, pari al valore raggiunto nella fase precedente, in cui la corrente si riduce gradualmente con l'aumentare dello stato di carica del modulo, fino al valore minimo 1 A, ove la carica si può considerare completa. Il valore massimo della tensione è un compromesso tra il massimo valore della tensione di cella, 3,65 V, indicato dal Costruttore della cella stessa, e la tensione massima di modulo, 14,6 V, corrispondente al raggiungimento della tensione massima in tutte le celle. Nel caso in esame, è stato impostato il valore 14,5 V.

Durante la prova sono state registrate la tensione e la temperatura delle singole celle, la tensione di batteria, la corrente, la temperatura ambiente e quella della scheda elettronica, con un tempo di campionamento pari a 10 s.

La prova è stata eseguita a diversi valori della temperatura ambiente, +23 °C, +30 °C e +40 °C. Particolare rilevanza è stata data alla prova a +40 °C, perché rappresentativa delle prestazioni dei moduli nelle condizioni più impegnative, in quanto alla scarica/carica ai massimi regimi consentiti dal Costruttore delle celle abbina la temperatura +40°C che, oltre ad essere comunemente citata negli standard relativi alle procedure di prova per batterie al litio [6] [7], è anche una temperatura facilmente raggiungibile in estate all'interno delle tipiche strutture in cui sono alloggiati i sistemi d'accumulo per uso stazionario al verificarsi, ad esempio, di un guasto all'impianto di condizionamento termico del locale. Anche in queste condizioni, il sistema di raffreddamento ha consentito di portare a termine la prova senza incorrere nell'arresto del sistema da parte del BMS per protezione termica. La Figura 5, riportata di seguito, illustra l'andamento dell'esperimento per il modulo da 100Ah, che è risultato essere quello più sollecitato: il valore massimo di

² Per assicurare che ciascuna prova venga eseguita nella medesima condizione iniziale, prima della sua esecuzione deve essere realizzato un ciclo standard, il quale si compone di una fase di scarica standard seguita, dopo una pausa di opportuna durata, da una fase di carica standard. Se non diversamente specificato, il ciclo standard è normalmente realizzato alla temperatura di +23°C. La scarica standard è una scarica a corrente costante di intensità pari a C/2 o diverso regime di scarica in accordo alle specifiche del Costruttore: nel caso in esame, è stato applicato il valore C/2. La durata della pausa è 1 ora (o più, se non si raggiunge la stabilizzazione termica ad una temperatura sufficientemente bassa da consentire l'inizio della successiva fase di carica). La carica standard è una carica del tipo corrente costante – tensione costante, con valore massimo di corrente secondo le specifiche del Costruttore, solitamente pari a C/2 o C/3: nel caso in esame è stato applicato il valore C/3.

temperatura raggiunto è +58 °C, comunque inferiore al valore limite fornito dal Costruttore delle celle, +65 °C. In Allegato 1 ÷ 9 sono riportati anche i diagrammi relativi all’esecuzione del test sul modulo da 30 Ah e su quello da 60 Ah.

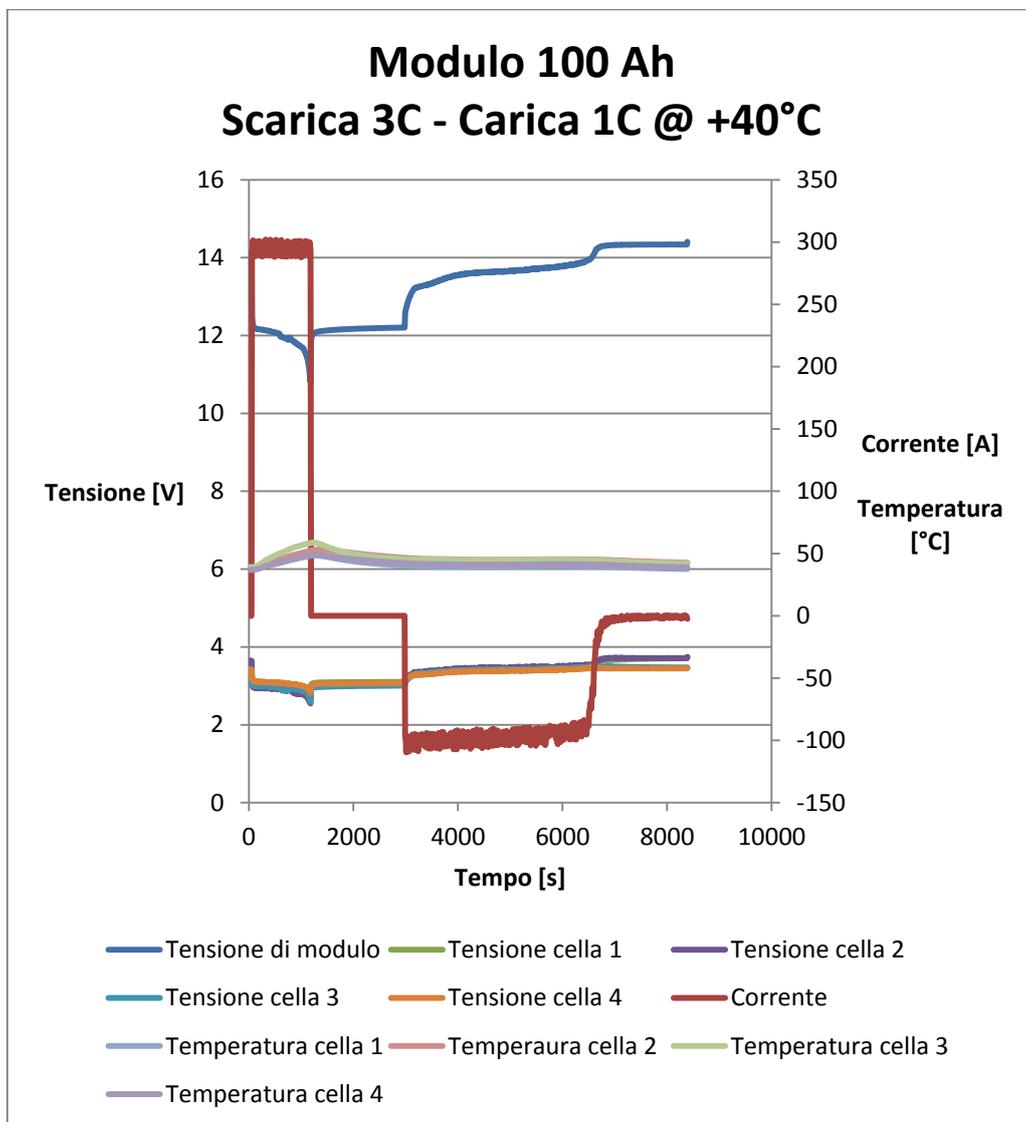


Figura 5. Ciclo di scarica 3C e carica 1C @ +40°C per il modulo batterie da 100 Ah

Durante lo svolgimento della prova, la tensione e la temperatura delle celle costituenti il modulo si sono mantenute nei limiti di normale funzionamento. In Allegato 10 è riportata una tabella riepilogativa delle prove di caratterizzazione eseguite e dei risultati ottenuti³. I valori di capacità risultano leggermente inferiori alla capacità nominale: ciò è corretto, a causa della normale riduzione del valore di capacità legata

³ Il modulo da 30 Ah e quello da 60 Ah sembrano essere più favoriti rispetto al modulo da 100 Ah dal punto di vista del raffreddamento. Questo potrebbe essere dovuto alla potenza termica da smaltire, più alta nel modulo da 100Ah a causa delle correnti di lavoro più elevate. Inoltre, per la standardizzazione, il sistema di ventilazione utilizzato è lo stesso per tutti i tipi di modulo, quindi è più efficiente nei moduli da 30Ah e 60Ah rispetto a quello da 100Ah. Infine bisogna considerare il fattore geometrico: nella configurazione del modulo da 30 Ah e 60 Ah la scheda elettronica è disposta in maniera baricentrica rispetto alle celle (vedere Figura 2) mentre nella configurazione del modulo da 100Ah due celle sono di fronte alla scheda elettronica, una in particolare è vicina al dispositivo di potenza “Cincon”. Sarebbe necessario, quindi, un ulteriore approfondimento. La soluzione di cambiare la posizione della scheda elettronica portandola sotto il coperchio del modulo per ottimizzare le problematiche di ingombro in pianta, che verrà descritta più avanti, potrebbe rivelarsi utile a migliorare anche l’aspetto termico.

all'intensità della corrente di scarica. I valori del rendimento coulombico sono leggermente inferiori all'unità, quindi in linea con i valori usuali. I valori del rendimento energetico oscillano tra il 73% ed il 77%: si tenga presente che nella definizione canonica dei rendimenti si fa riferimento ad una scarica seguita da una pausa di durata opportuna e poi da una carica standard: per le batterie al litio si ottengono valori tipici del rendimento energetico che sono qualche punto percentuale al di sopra del 90%. Nel caso in esame, il calcolo del rendimento è stato fatto con riferimento ad una scarica violenta, seguita da una pausa appositamente corta per accentuare la condizione di stress del modulo batterie e quindi da una carica violenta, eseguite, tra l'altro, su celle non più completamente nuove (in quanto si tratta delle celle approvvigionate e testate, sempre in condizioni severe, nei due anni precedenti). Si ritengono pertanto plausibili i valori di rendimento energetico ottenuti nelle prove.

3.2 Prove per applicazioni stazionarie

Nelle applicazioni per lo stazionario le batterie sono sottoposte a sequenze di scarica e carica di diversa intensità e durata, in funzione dell'applicazione cui sono rivolte. Escludendo il caso dei gruppi di continuità, i servizi per cui vengono utilizzate le batterie nelle applicazioni stazionarie si possono riassumere e suddividere in due categorie principali:

- a) "power balancing",
- b) "time shift".

Nel servizio di "power balancing", il sistema di accumulo è utilizzato in abbinamento ad una fonte rinnovabile o un convertitore per livellare la curva di produzione e di carico. Nel caso dell'abbinamento ad una fonte rinnovabile, il sistema di accumulo compensa le fluttuazioni di potenza fornita dalla fonte rinnovabile. Nel caso dell'abbinamento ad un convertitore, il valore di potenza totale da fornire all'impianto utilizzatore viene suddiviso tra il convertitore stesso ed il sistema d'accumulo che, in questo tipo di applicazione, consente di limitare la potenza installata del convertitore e diminuire l'energia prelevata dalla rete, contribuendo alla riduzione delle emissioni di CO₂. A ciò si associa spesso anche un servizio di "power quality", ottenuto con l'ulteriore aggiunta di un banco di condensatori.

Nel servizio di "time shift", il sistema di accumulo è utilizzato per immagazzinare energia in un certo periodo, quando è disponibile, per poi utilizzarla diverso tempo dopo, quando si ha una richiesta di potenza. La differenziazione temporale tra accumulo ed utilizzo, oltre che alla disponibilità dell'energia, può essere legata anche ai costi della stessa, che sono diversi nella varie fasce orarie della giornata e nei giorni della settimana. Il "time shift" risulta quindi utile nel tentativo di ottimizzare il fattore disponibilità/costi dell'energia.

Di seguito sono illustrati i risultati della prova di "power balancing" e "time shift" eseguite sui moduli batterie in esame. Dette prove sono state eseguite applicando le procedure elaborate dal Gruppo di Coordinamento CNR-ENEA-RSE nell'ambito dell'Accordo di Programma con il Ministero dello Sviluppo Economico per le attività di ricerca e sviluppo di interesse generale per il sistema elettrico nazionale, in merito alla stesura di una procedura di prova comune per la caratterizzazione di batterie al litio e supercondensatori in applicazioni stazionarie e veicolari (RdS/2013/243 e RdS/2013/244).

3.2.1 Prova di "power balancing"

Descrizione della prova di "power balancing"

La prova di power balancing ha come scopo la determinazione di alcuni parametri prestazionali delle batterie, nel caso in cui l'accumulatore elettrochimico è accoppiato a fonti rinnovabili o convertitori con funzione di power balancing. Il test si basa sul profilo di Figura 6, riportato anche in forma di tabella in Allegato 11. Esso è costituito da gradini di carica e scarica a potenza costante di diversa ampiezza. I set-up di potenza indicati nella Figura sono validi per una batteria standard (batteria da 15kWh alla potenza nominale); per effettuare prove su batterie più piccole si devono dividere tali valori di potenza per un opportuno fattore di scala (fs), pari al rapporto tra l'energia nominale della batteria standard e quella della batteria effettivamente in prova. La Tabella 3 riporta il calcolo del fattore di scala relativamente ai moduli batterie in esame.

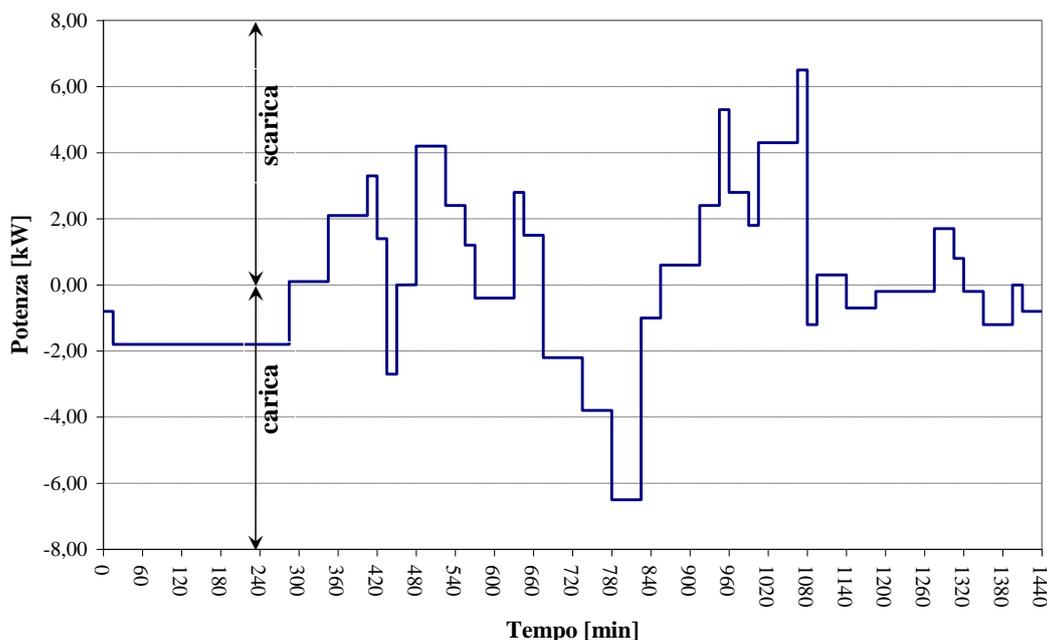


Figura 6. Profilo di carica/scarica per la prova di power balancing con batteria standard

Tabella 3. Calcolo del fattore di scala

| Taglia modulo | Tensione nominale [V] | Capacità nominale [Ah] | Energia alla potenza nominale [kWh] | Fattore di scala |
|---------------|-----------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------|
| piccola | 12,8 | 30 | 0,384 | 39,06250 |
| media | 12,8 | 60 | 0,768 | 19,53125 |
| grande | 12,8 | 100 | 1,280 | 11,71875 |

Prima della prova la batteria deve essere sottoposta a un ciclo standard ed inoltre deve essere mantenuta a temperatura controllata per un tempo necessario al raggiungimento della temperatura di prova.

La prova è stata eseguita sottoponendo il modulo batterie all’applicazione del profilo di carica/scarica riportato in Figura 6: per ogni tipo di modulo sono state eseguite cinque ripetizioni del profilo.

Durante la prova sono state registrate la tensione e la temperatura delle singole celle, la tensione di modulo, la corrente e la temperatura dell’ambiente di prova con un tempo di campionamento pari a 60 s.

L’attitudine della batteria a lavorare in tale applicazione viene determinata attraverso la rilevazione o il calcolo dei seguenti parametri: capacità, energia, rendimento coulombico, rendimento energetico.

Risultati della prova di power balancing

La Figura 7 in cui si riporta, a titolo di esempio, l’andamento tipico dei valori registrati durante l’applicazione del profilo⁴ di prova “power balancing” al modulo da 30 Ah, mostra come i valori di tensione e temperatura delle celle e del modulo si siano mantenuti all’interno dell’intervallo di esercizio consentito dal Costruttore delle celle. In particolare, durante l’applicazione del profilo la temperatura sale dal valore di temperatura ambiente a cui è stata eseguita la prova, +30°C, fino al valore massimo di +37°C: in queste

⁴ La successione di gradini a potenza costante è stata trasformata in una successione di gradini a corrente costante, usando come fattore di proporzionalità il valore di tensione nominale del modulo: ciò perché il calcolo dei valori effettivi di potenza da applicare al modulo, eseguito secondo il fattore di scala, conduce a valori che sono inferiori al valore minimo impostabile al ciclatore nelle fasi di carica/scarica a potenza costante. D’altro canto, invece, il ciclatore accetta qualunque valore di corrente purché maggiore o uguale ad 1 A ed inferiore, ovviamente, al suo limite massimo operativo.

condizioni, la ventilazione non interviene. In Allegato 15 e 17 sono riportati i diagrammi relativi rispettivamente al modulo da 60Ah e da 100Ah.

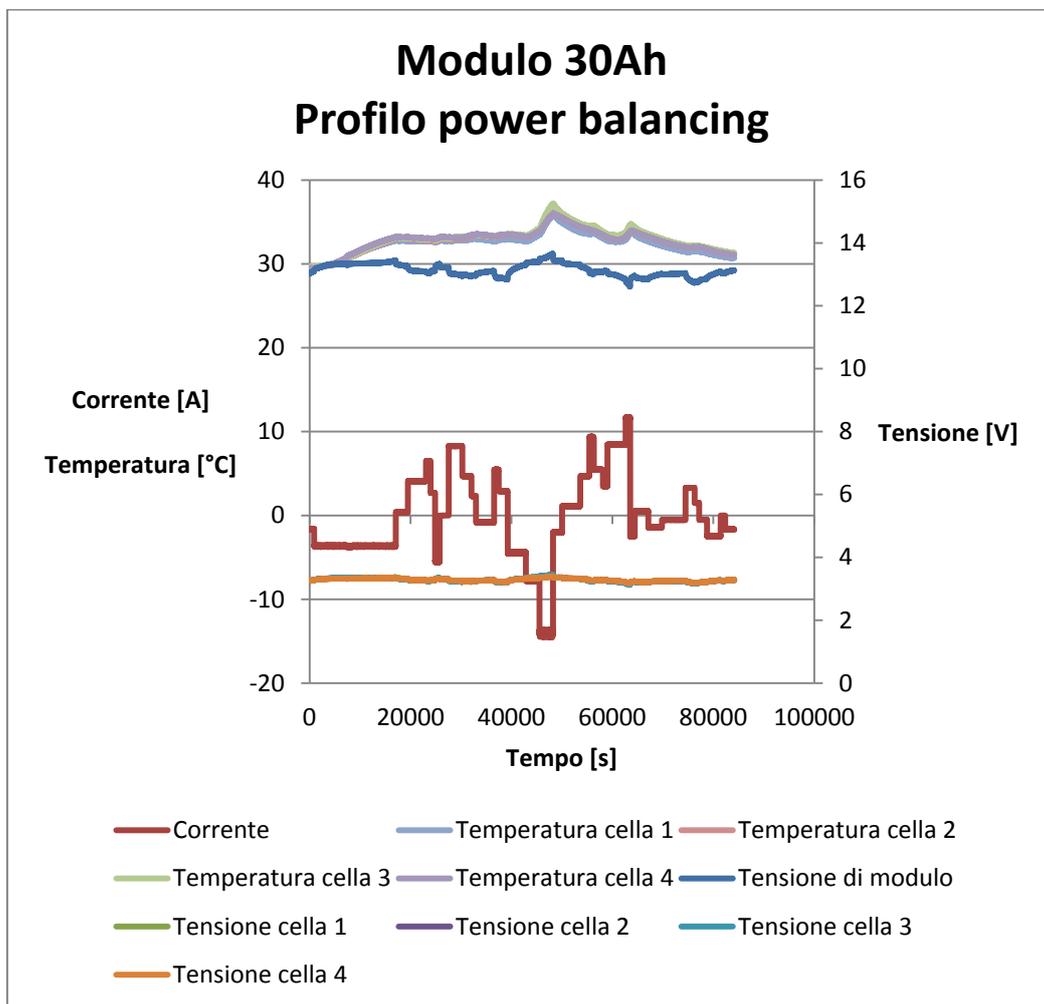


Figura 7. Prova di “power balancing” (modulo da 30 Ah)

La determinazione dei parametri energetici relativi al singolo profilo, ha condotto ai risultati riportati in Tabella 4.

Tabella 4. Capacità ed energia nel profilo “power balancing”

| Taglia modulo | Capacità scaricata [Ah] | Capacità caricata [Ah] | Rendimento coulombico | Energia scaricata [Wh] | Energia caricata [Wh] | Rendimento energetico |
|---------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Piccola | 43,41 | 44,09 | 0,98 | 564,30 | 589,87 | 0,95 |
| Media | 86,83 | 88,19 | 0,98 | 1128,60 | 1179,74 | 0,95 |
| Grande | 144,55 | 146,79 | 0,98 | 1869,39 | 1972,40 | 0,94 |

3.2.2 Prova di time shift

Descrizione della prova

La prova ha come scopo la determinazione di alcuni parametri prestazionali delle batterie, nel caso in cui l'accumulatore elettrochimico è connesso alla rete elettrica con funzione di “time shift”. Il profilo di prova, illustrato in Figura 8 e riportato in forma di tabella in Allegato 12, è costituito da una successione di gradini di carica e scarica a potenza costante, di diversa ampiezza. I set-up di potenza indicati nella Figura 8.8 sono validi per una batteria standard (batteria da 15kWh alla potenza nominale). Per effettuare prove su batterie

più piccole si possono dividere tali valori di potenza per un opportuno fattore di scala (f_s), pari al rapporto tra l'energia nominale della batteria standard e quella della batteria effettivamente in prova: nel caso dei moduli in esame, i risultati del calcolo del fattore di scala sono riportati in Tabella 3.

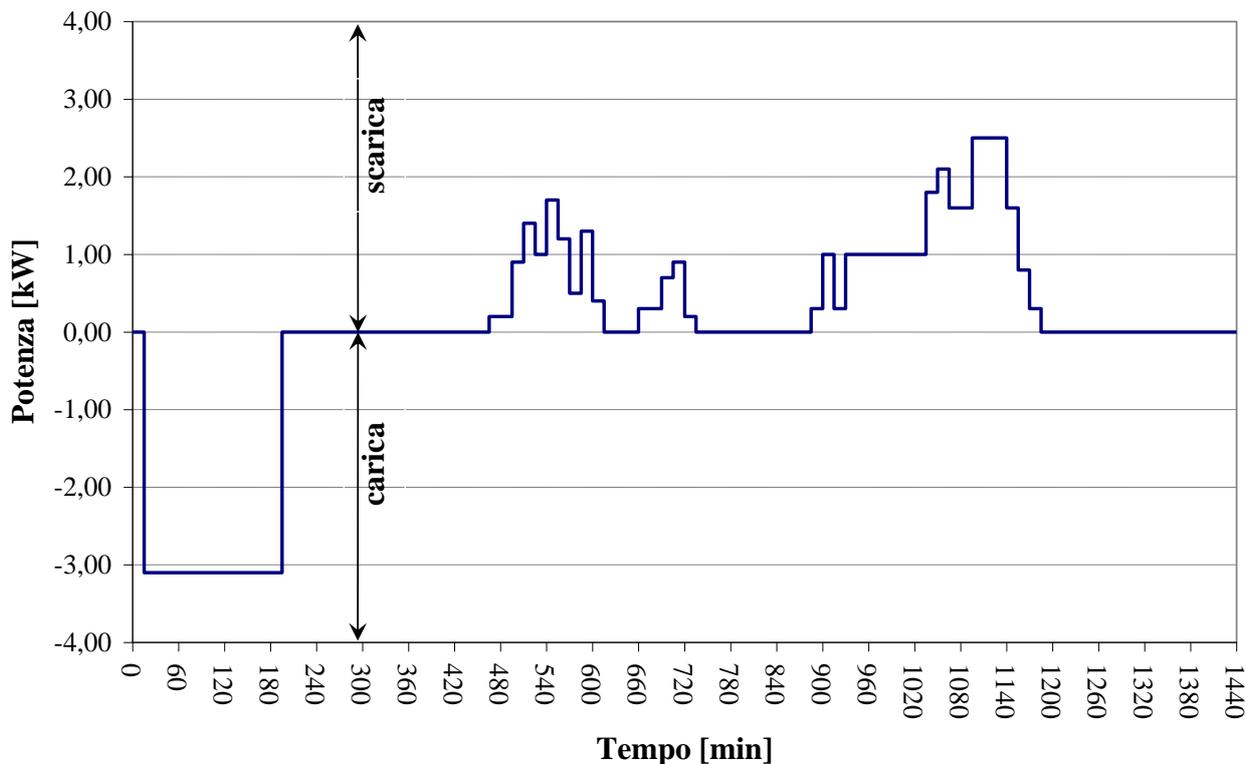


Figura 8. Profilo di carica/scarica per la prova di “time shift” con batteria standard

Prima della prova la batteria deve essere sottoposta a un ciclo standard ed inoltre deve essere mantenuta a temperatura controllata per un tempo necessario al raggiungimento della temperatura di prova.

La prova è stata eseguita sottoponendo il modulo batterie all'applicazione del profilo di carica/scarica riportato in Figura 8: per ogni tipo di modulo sono state eseguite cinque ripetizioni del profilo.

Durante la prova sono state registrate le tensioni e la temperatura delle singole celle, la tensione di batteria, la corrente e la temperatura dell'ambiente di prova, con un tempo di campionamento pari a 60 s. L'attitudine della batteria a lavorare in tale applicazione viene valutata attraverso la rilevazione o il calcolo dei seguenti parametri: capacità, energia, rendimento coulombico, rendimento energetico.

Risultati della prova di time shift

Per la prova di time shift, si possono ripetere contenuti analoghi a quelli descritti a proposito della prova di power balancing. La Figura 9, in cui si riporta, a titolo di esempio, l'andamento tipico dei valori registrati durante l'applicazione del profilo⁵ di prova “time shift” al modulo da 60Ah, mostra come i valori di tensione e temperatura delle celle e del modulo si siano mantenuti all'interno dell'intervallo di esercizio consentito dal Costruttore delle celle. In particolare, durante l'applicazione del profilo la temperatura sale dal valore di temperatura ambiente a cui è stata eseguita la prova, +32°C, fino al valore massimo di +35°C: in queste condizioni, la ventilazione non interviene. In Allegato 14 e 18 sono riportati i diagrammi relativi rispettivamente all'esecuzione della prova sul modulo da 30Ah e da 100Ah.

⁵ La successione di gradini a potenza costante è stata trasformata in una successione di gradini a corrente costante, usando come fattore di proporzionalità il valore di tensione nominale del modulo: ciò perché il calcolo dei valori effettivi di potenza da applicare al modulo, eseguito secondo il fattore di scala, conduce a valori che sono inferiori al valore minimo impostabile al ciclatore nelle fasi di carica/scarica a potenza costante. D'altro canto, invece, il ciclatore accetta qualunque valore di corrente purché maggiore o uguale ad 1 A ed inferiore, ovviamente, al suo limite massimo operativo.

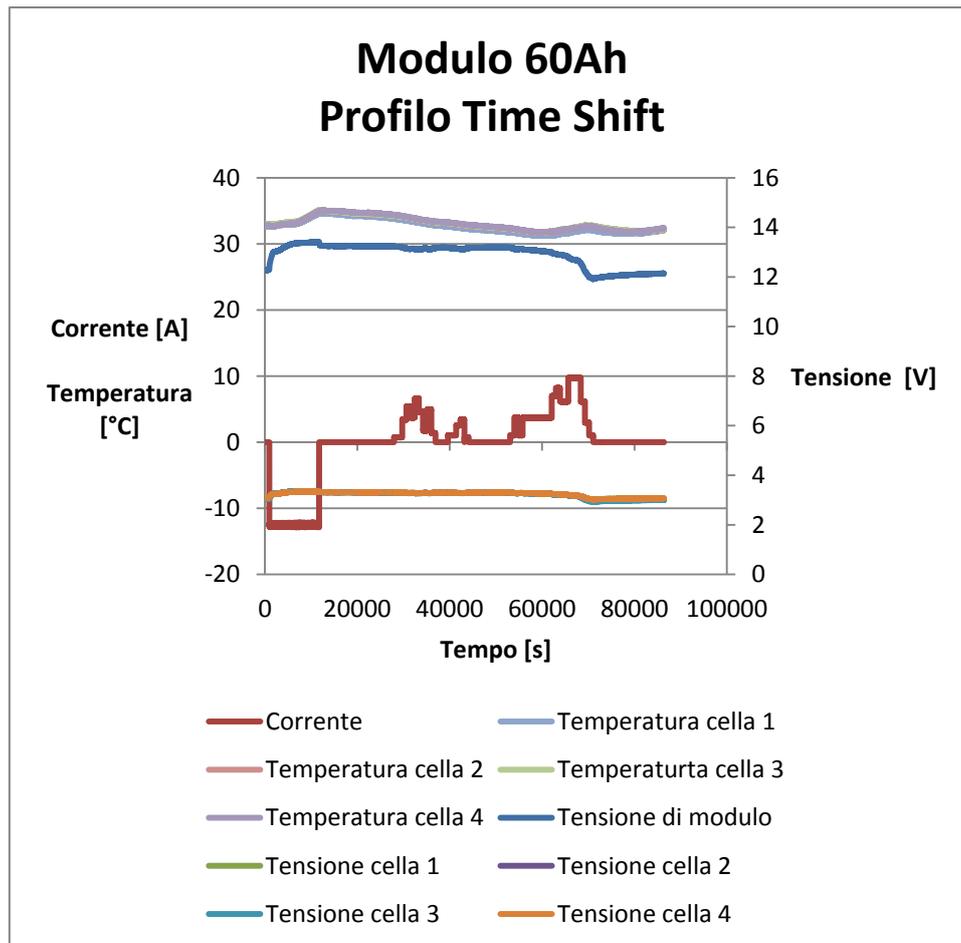


Figura 9. Prova di “time shift” (modulo da 60Ah)

La determinazione dei parametri energetici relativi ad una singola applicazione del profilo, ha condotto ai risultati riportati in Tabella 5.

Tabella 5. Capacità ed energia nel profilo “time shift”

| Taglia modulo | Capacità scaricata [Ah] | Capacità caricata [Ah] | Rendimento coulombico | Energia scaricata [Wh] | Energia caricata [Wh] | Rendimento energetico |
|---------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Piccola | 18,46 | 18,49 | 0,99 | 238,76 | 245,67 | 0,97 |
| Media | 36,92 | 36,99 | 0,99 | 477,52 | 491,35 | 0,97 |
| Grande | 61,24 | 61,57 | 0,99 | 787,12 | 831,19 | 0,95 |

4 Ottimizzazione del sistema elettronico di gestione e controllo

4.1 Riconfigurabilità dinamica

In risposta a quanto previsto dal Piano Annuale di Realizzazione circa l’ottimizzazione della scheda elettronica BMS per specializzarla all’impiego in ambito stazionario, è stata introdotta la riconfigurabilità dinamica: nel caso di sistemi batterie complessi, composti dalla serie di più stringhe multi modulo, la riconfigurazione dinamica consente l’esclusione di una sezione del sistema (che si è reso inutilizzabile ad es.

per causa guasti o manutenzione) compatibilmente con la finestra della tensione di lavoro accettabile dall’utenza, senza interruzione del servizio. Come primo step, ci si è limitati al caso di applicazioni stazionarie a bassa tensione, 400V, con prospettiva di estendere il campo applicativo ai sistemi in media tensione, sino al kV.

L’argomento è trattato in dettaglio nel Report RdS/2013/246 “Ottimizzazione di sistemi di controllo BMS per moduli batterie al litio da utilizzare in applicazioni stazionarie” prodotto dal Dipartimento di Ingegneria dell’Informazione dell’Università di Pisa, che ha svolto questa parte di attività.

4.2 Ottimizzazione della posizione della scheda elettronica all’interno del modulo

Nella configurazione adottata nel precedente Piano Annuale di Realizzazione, la scheda elettronica era disposta verticalmente, tra le batterie, come mostrato nella Figura 10. La soluzione preferita, per esigenza di riduzione degli spazi, era quella in cui la scheda elettronica porta a bordo i ventilatori e giace al di sopra delle celle, consentendo una riduzione delle dimensioni in pianta, senza comportare apprezzabili variazioni in altezza. Si veda in proposito ancora la Figura 10. Questa esigenza è fortemente vincolante nel campo automotive, meno in quello stazionario, ove comunque è sempre importante, giacché anche in questo caso sussistono problemi di ingombro (ad esempio, nel caso di alloggiamento delle batterie all’interno di convertitori/compensatori). I tempi di realizzazione della scheda elettronica siffatta, non compatibili con il termine delle attività annuali, non hanno consentito di attuare quest’ottimizzazione che, pertanto, è stata eseguita nell’ambito della presente annualità.

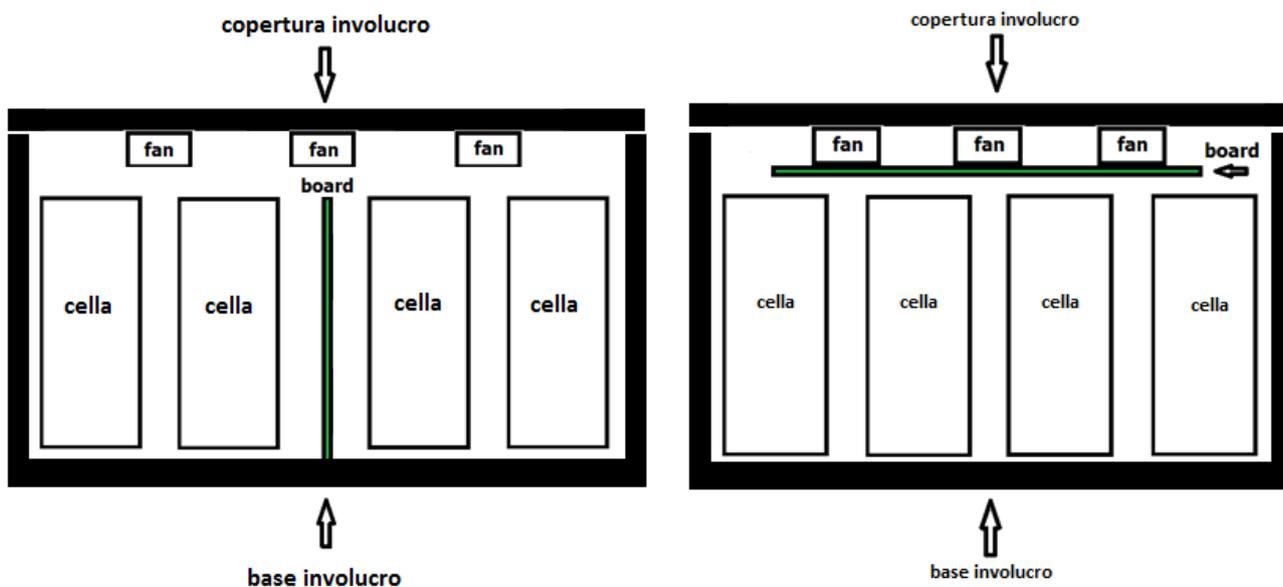


Figura 10. Posizione della scheda elettronica: vecchia versione (sinistra), nuova versione (destra)

La presenza sulla scheda elettronica dei fori per il passaggio dell’aria attraverso i ventilatori, ha determinato la necessità di ridisegnare il circuito, con una nuova disposizione dei componenti su una superficie minore rispetto alla soluzione precedente, anche tenendo conto del fatto che in questa situazione le dimensioni globali della scheda elettronica sono influenzate dalle dimensioni in pianta del modulo⁶ e dal passaggio dei cilindri terminali che portano all’esterno la tensione del modulo.

⁶ Siccome tutti i moduli montano la stessa scheda elettronica, per tener fede al carattere della modularità, è il modulo di piccola taglia ad influenzare in maniera determinante la misura in lunghezza e larghezza della scheda elettronica.

Anche questo studio è stato svolto dal Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione dell'Università di Pisa, per cui si rimanda al relativo Report RdS/2013/246 "Ottimizzazione di sistemi di controllo BMS per moduli batterie al litio da utilizzare in applicazioni stazionarie".

4.3 Altri miglioramenti relativi alla scheda elettronica

L'esperienza di montaggio ed uso dei moduli realizzati nella precedente annualità, ha suggerito di apportare altri miglioramenti:

- impiegare mosfet potenziati, per consentire l'impiego dei moduli in stringhe da 150 V anziché 48 V,
- inglobare il pilotaggio dei ventilatori nella scheda elettronica, evitando il ricorso ad un'apposita scheda "fan driver",
- spostare i terminali (polo positivo e polo negativo) del modulo verso il bordo del contenitore, così da lasciare maggiore spazio per la scheda elettronica,
- sostituire i cablaggi filari tra scheda elettronica e celle con una scheda di interconnessione, per semplificare e velocizzare l'operazione di montaggio,
- montare il connettore da pannello direttamente a bordo della scheda elettronica anziché sul coperchio, risparmiando il cablaggio tra quest'ultimo e la scheda elettronica stessa.

Gli argomenti suddetti, uniti alla riconfigurabilità dinamica, l'installazione delle ventole a bordo della scheda elettronica ed il fissaggio di questa al coperchio dell'involucro del modulo, hanno costituito la specifica tecnica per il conferimento dell'incarico di progettazione al cobeneficiario Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione dell'Università di Pisa. Tutti questi aspetti sono trattati in dettaglio nel Report RdS/2013/246 "Ottimizzazione di sistemi di controllo BMS per moduli batterie al litio da utilizzare in applicazioni stazionarie". La Figura 11 illustra la nuova scheda elettronica e, per confronto, la Figura 12 mostra la vecchia versione. Come nell'esecuzione precedente, la scheda elettronica è la stessa per tutti i moduli, sempre per mantenere il carattere della standardizzazione.



Figura 11. Nuova versione della scheda elettronica: top (sinistra) e bottom (destra)

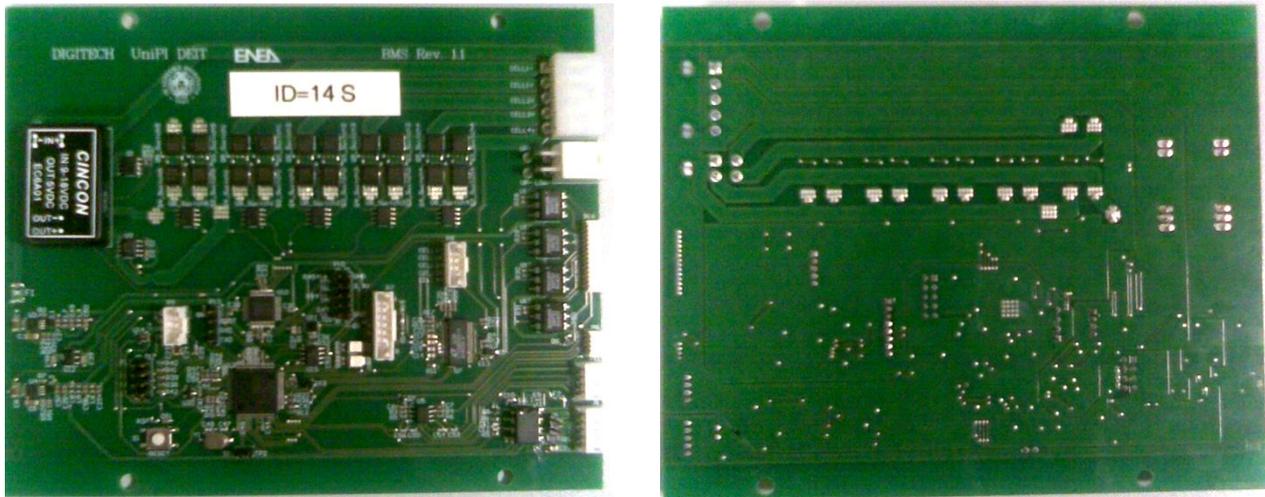


Figura 12. Vecchia versione della scheda elettronica: top (sinistra) e bottom (destra)

A seguito della progettazione della nuova versione della scheda elettronica operata dal Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione dell'Università di Pisa, l'ENEA si è occupata della realizzazione ed approvvigionamento di alcuni esemplari della suddetta scheda elettronica, affidando la fornitura alla ditta Digitech S.r.l. di Peccioli (PI).

4.4 Miglioramenti meccanici

La meccanica ha subito le modifiche conseguenti alle migliorie apportate alla scheda elettronica, a cui si aggiungono alcune ottimizzazioni suggerite dall'esperienza d'uso dei moduli batterie precedenti. Tali modifiche consistono sostanzialmente ne:

- la riduzione delle dimensioni in pianta dei moduli,
- la variazione della foratura sul coperchio in corrispondenza del nuovo connettore di modulo,
- la variazione della posizione dei fori sul coperchio per l'uscita dei poli del modulo,
- la realizzazione dei cilindri terminali (polo positivo e polo negativo) più alti rispetto alla soluzione precedente, che fuoriescono dal coperchio ed hanno una terminazione di tipo maschio, per consentire un più agevole collegamento del modulo batterie all'apparato utilizzatore (o altri moduli, nel caso di sistemi batterie multi modulo),
- il miglioramento del serraggio delle maniglie.

L'ENEA si è occupata della produzione dei nuovi disegni tecnici, riportati in Allegato 29, 30 31, e, successivamente, della realizzazione di alcuni esemplari dei nuovi contenitori: la fornitura degli involucri (completi dei ventilatori, dei collegamenti interni di potenza e degli elementi di fissaggio) è stata affidata alla ditta R.M.P. S.r.l., con sede in Roma.

Le Figure 13 e 14 illustrano i risultati raggiunti in termini di ottimizzazione della configurazione geometrica interna e nuovo posizionamento della scheda elettronica BMS.



Figura 13. Vista interna dei nuovi moduli batterie: 30 Ah e 60 Ah (sinistra), 100 Ah (destra)



Figura 14. Nuova posizione della scheda elettronica BMS

La Tabella 6 riporta un confronto tra le dimensioni dei moduli nella vecchia e nella nuova versione.

Tabella 6. Confronto dimensionale tra vecchia e nuova versione dei moduli

| Modulo | Lunghezza [dm] | Profondità [dm] | Altezza [dm] | Volume [dm ³] | Δ Lunghezza [dm] | Δ Lunghezza% | Δ Volume% |
|------------|----------------|-----------------|--------------|---------------------------|-------------------------|---------------------|------------------|
| 30 Ah old | 2,77 | 1,60 | 2,08 | 9,21856 | -0,26 | -9,39 | -4,15857 |
| 30 Ah new | 2,51 | 1,60 | 2,20 | 8,8352 | | | |
| 60 Ah old | 2,97 | 1,66 | 2,36 | 11,63527 | -0,20 | -6,73401 | +1,16989 |
| 60 Ah new | 2,77 | 1,66 | 2,56 | 11,77139 | | | |
| 100 Ah old | 3,10 | 1,98 | 3,18 | 19,51884 | -0,31 | -10 | -4,62264 |
| 100 Ah new | 2,79 | 1,98 | 3,37 | 18,61655 | | | |

Il confronto dimensionale mostra la significativa riduzione delle dimensioni in pianta dei moduli, resa possibile dal nuovo posizionamento della scheda elettronica.

Il corrispondente aumento in altezza è dovuto, in realtà, più all'esigenza di creare maggiore spazio da dedicare alle connessioni interne di potenza e di segnale, in virtù dell'esperienza fatta sul montaggio e l'esercizio dei moduli della versione precedente, che alla posizione della scheda elettronica la quale, da parte sua, non richiederebbe incrementi di altezza. L'aumento di altezza comunque non altera in maniera tangibile il volume dei moduli, che rimane circa invariato nel caso del modulo da 60Ah, mentre si riduce di quasi il 5% nel caso del modulo da 30Ah e da 100Ah. Tra l'altro, specie nelle applicazioni stazionarie, la riduzione delle dimensioni in pianta è un vincolo più stringente rispetto a quello in altezza.

Nella Figura 15 sono illustrati i nuovi moduli batterie realizzati.



Figura 15. Nuovi moduli batterie realizzati: 30 Ah (destra), 60 Ah (centro), 100 Ah (sinistra)

5 Conclusioni

I risultati delle prove di caratterizzazione, eseguite ai massimi regimi di corrente in carica e scarica consentiti dal Costruttore delle celle, e l'applicazione dei profili di "power balancing" e "time shift", hanno dimostrato la fattibilità d'impiego dei moduli batterie in applicazioni stazionarie. L'introduzione della riconfigurabilità dinamica come uno dei fattori di ottimizzazione del BMS, ha ancor più specializzato i moduli per questo tipo di applicazioni. Lo studio in tal senso, per ora limitato ad applicazioni in bassa tensione, 400V, può proseguire per applicazioni di media tensione, fino ad 1 kV.

Oltre alla riconfigurabilità dinamica, è stato effettuato il nuovo posizionamento della scheda elettronica, che ha consentito una notevole riduzione delle dimensioni in pianta dei moduli, senza alterarne in maniera significativa l'altezza: quest'ultimo aspetto, anche se meno vincolante rispetto alle applicazioni veicolari, è comunque utile anche nelle applicazioni stazionarie. Il tutto si unisce poi all'esperienza d'uso dei moduli della versione precedente, che ha suggerito l'adozione degli altri piccoli miglioramenti dianzi descritti, per cui la nuova release dei moduli che ne è scaturita ha portato a dei moduli batterie disponibili per una successiva fase di ingegnerizzazione, da condurre con eventuali Industrie interessate. Rispettando i deliverable del Piano Annuale di Realizzazione, è stato prodotto un esemplare per ciascuna tipologia di modulo: piccola, media, grande taglia.

6 Riferimenti bibliografici

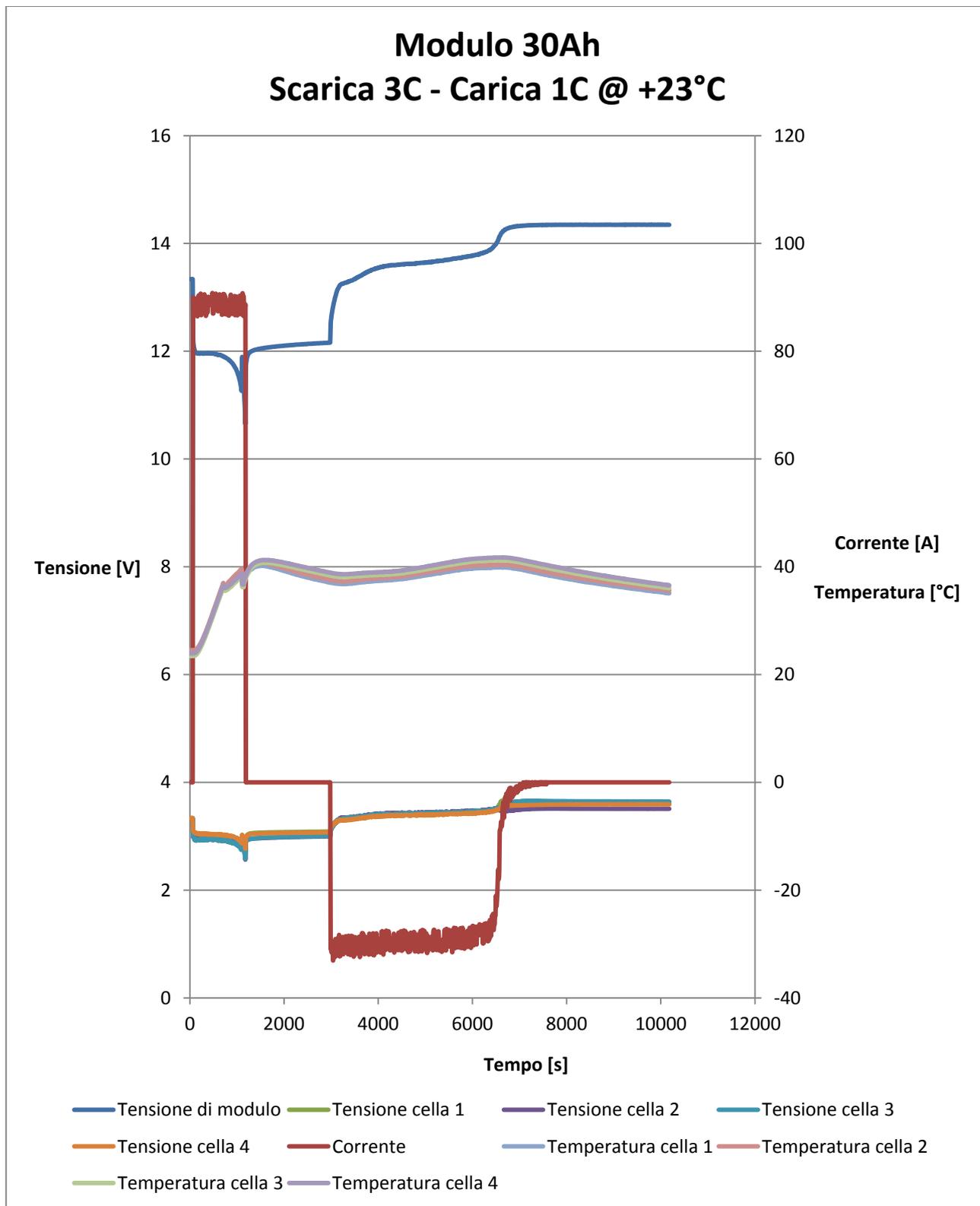
1. F. Vellucci, G. Pede, " Sviluppo di moduli batterie litio-ioni per avviamento e trazione non automotive", Report Ricerca di Sistema 2011/27
2. M. Ceraolo, T. Huria, C. Zappacosta, "Sviluppo di moduli integrati, completi di BMS", Report Ricerca di Sistema 2011/318
3. Sviluppo e realizzazione di moduli batterie litio-ioni per avviamento e trazione non auto motive F. Vellucci, G. Pede, A. Mariani, F. D'Annibale Report RdS/2012/087
4. F. Baronti, G. Fantechi, R. Roncella, R. Saletti, "Sviluppo di un BMS (Battery Management System) con sistema di bilanciamento attivo per sistema batterie al LiFePO4 da 48Vn – 100Ah", Report RdS/2012/088

5. F. Baronti, G. Fantechi, R. Roncella, R. Saletti, “Progettazione definitiva del BMS per batterie d’avviamento e trazione non automotive”, Report RdS/2012/089
6. ISO 12405-1 “Electrically propelled road vehicles – Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems – Part 1: High power application”
7. ISO 12405-2 “Electrically propelled road vehicles – Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems – Part 1: High energy application”

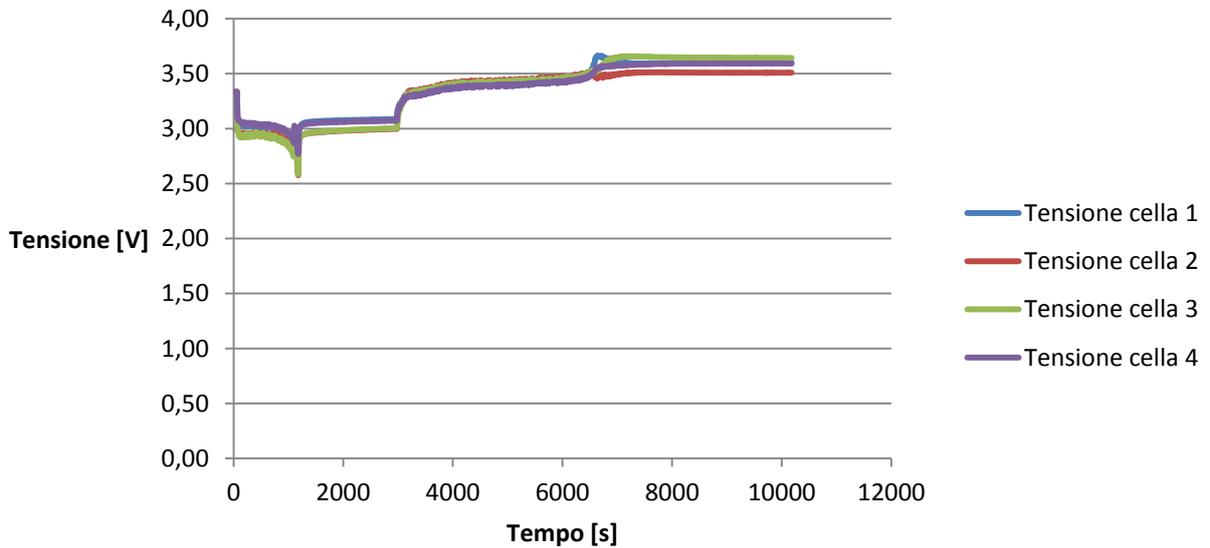
7 Abbreviazioni ed acronimi

| | |
|-----------|--|
| BMS | Battery Management System, sistema elettronico di gestione e controllo |
| nC | Valore di corrente pari ad n volte il valore della capacità nominale C |
| C/n | Valore di corrente pari al valore della capacità nominale C diviso per n |
| CC/CV | Carica di tipo corrente costante - tensione costante |
| I_{max} | Valore massimo di corrente |
| fs | Fattore di scala |

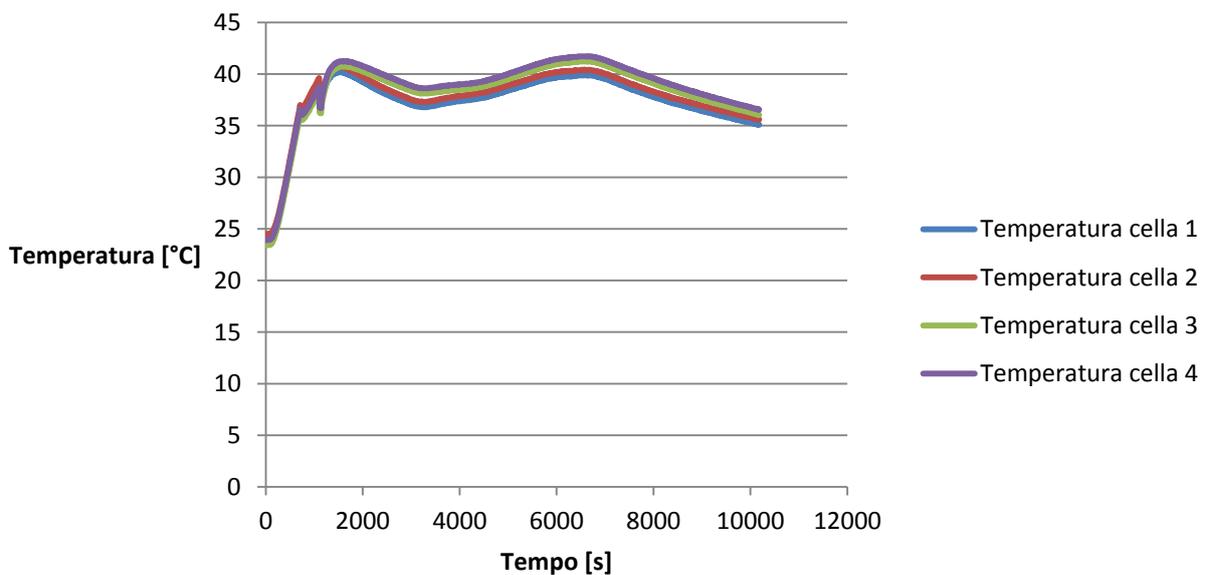
8 Allegato 1 – Diagrammi relativi alle prove di caratterizzazione per il modulo da 30Ah @ +23°C



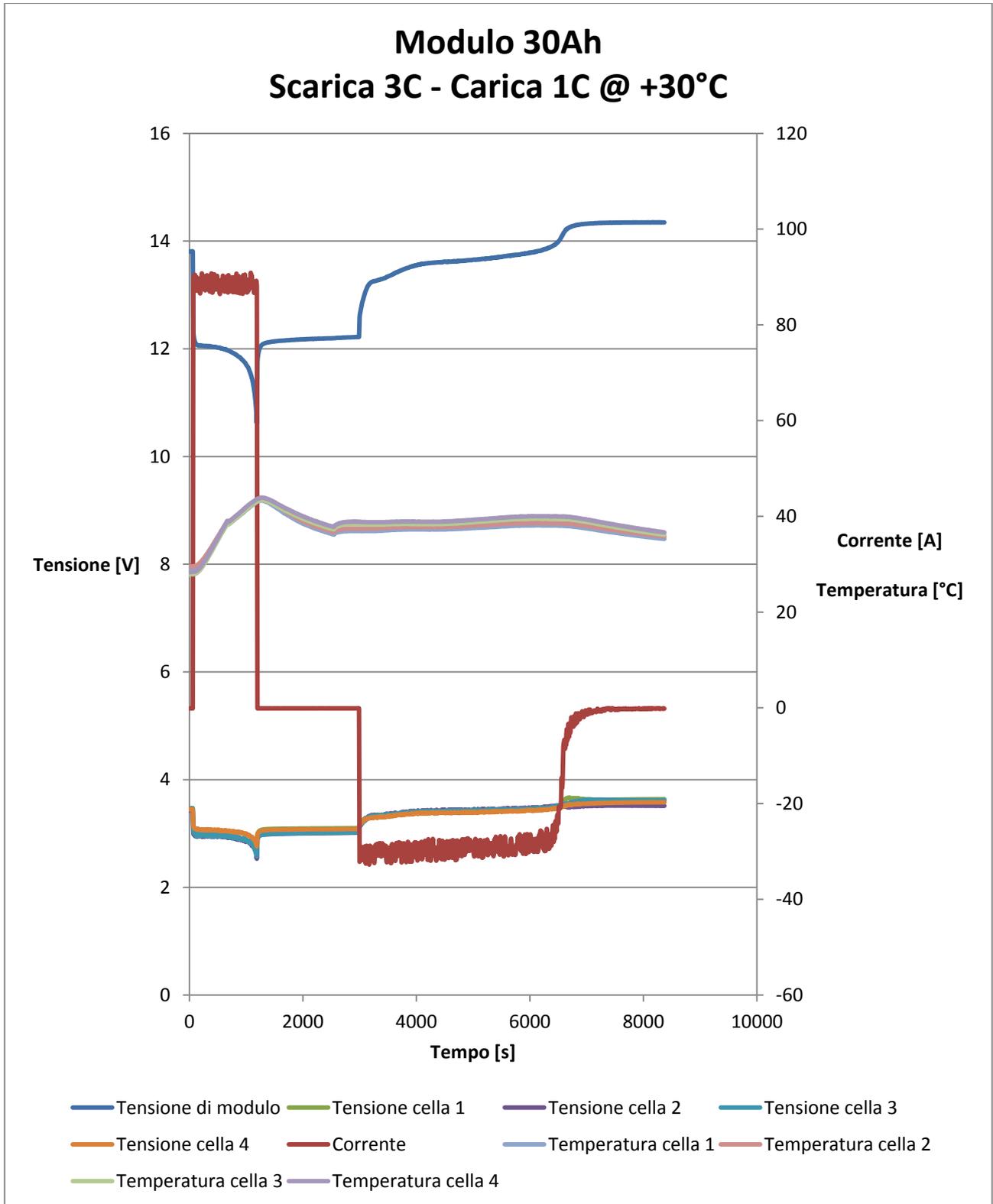
Modulo 30Ah
Scarica 3C - Carica 1C @ +23°C
Tensioni parziali



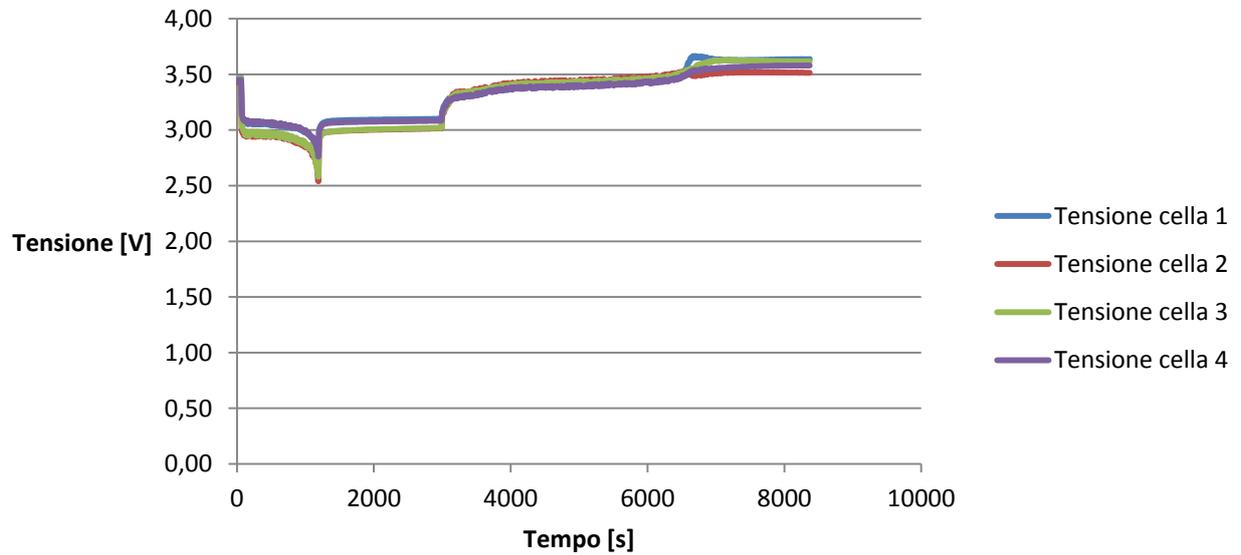
Modulo 30Ah
Scarica 3C - Carica 1C @ +23°C
Temperature delle celle



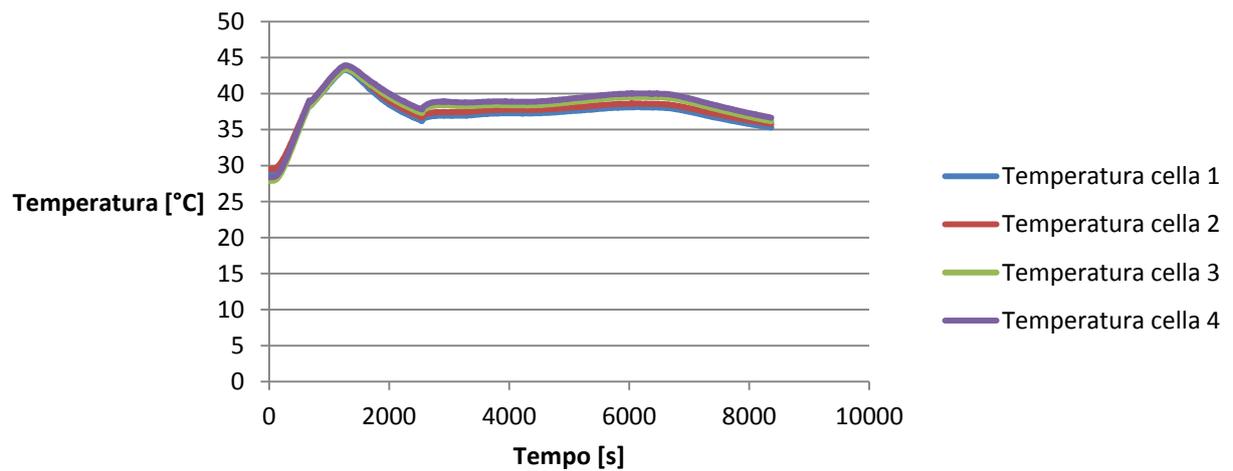
9 Allegato 2 – Diagrammi relativi alle prove di caratterizzazione per il modulo da 30Ah @ +30°C



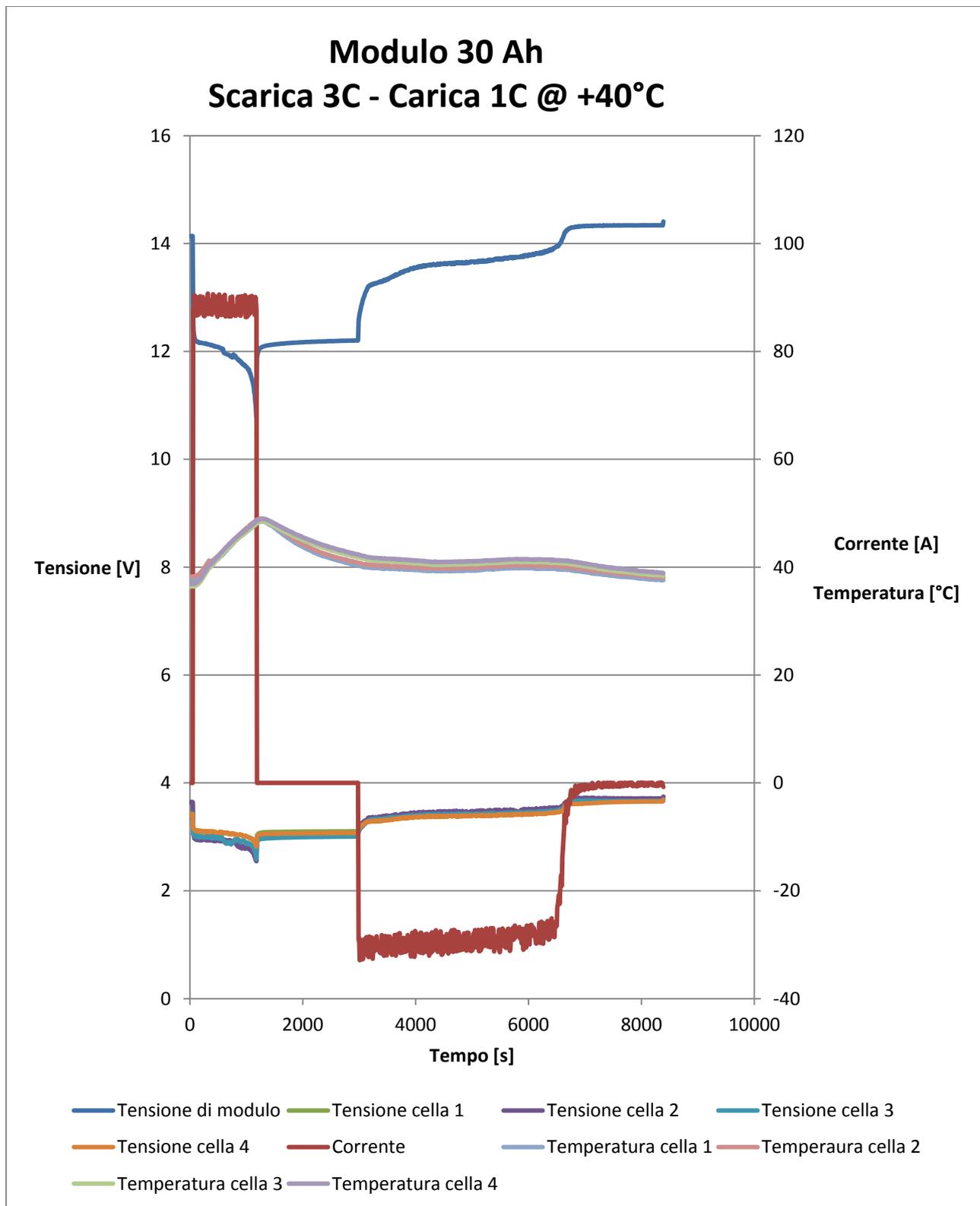
Modulo 30Ah Scarica 3C - Carica 1C @ +30°C Tensioni parziali



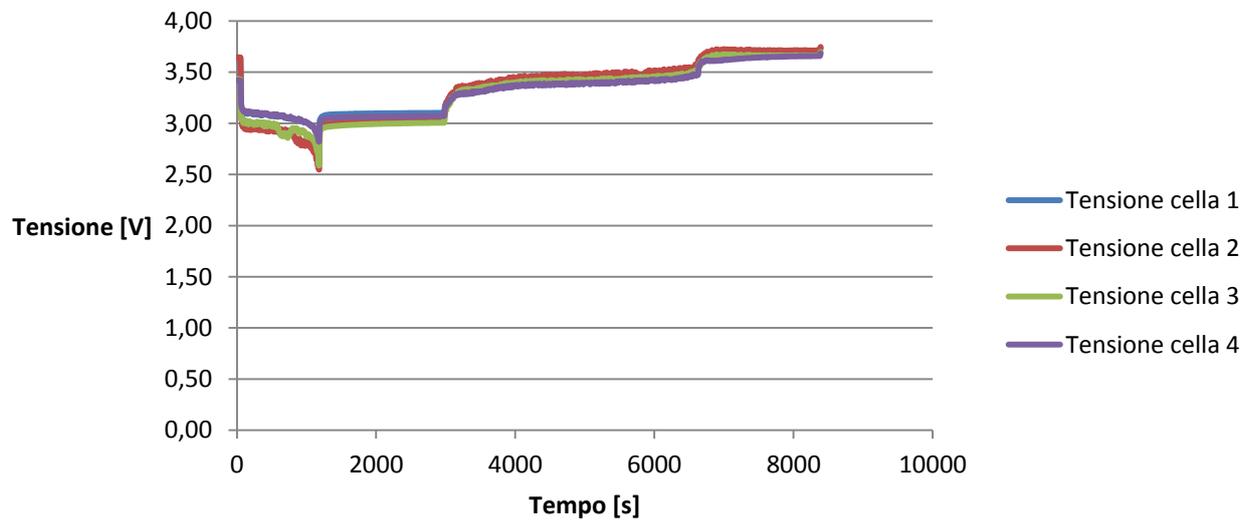
Modulo 30Ah Scarica 3C - Carica 1C @ +30°C Temperature delle celle



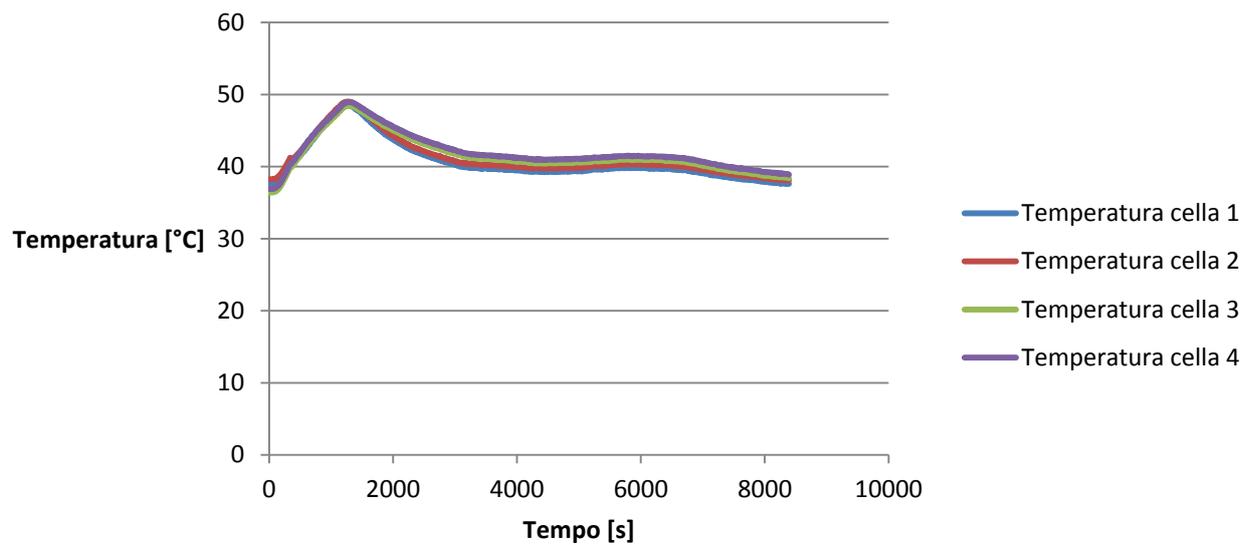
10 Allegato 3 – Diagrammi relativi alle prove di caratterizzazione per il modulo da 30Ah @ +40°C



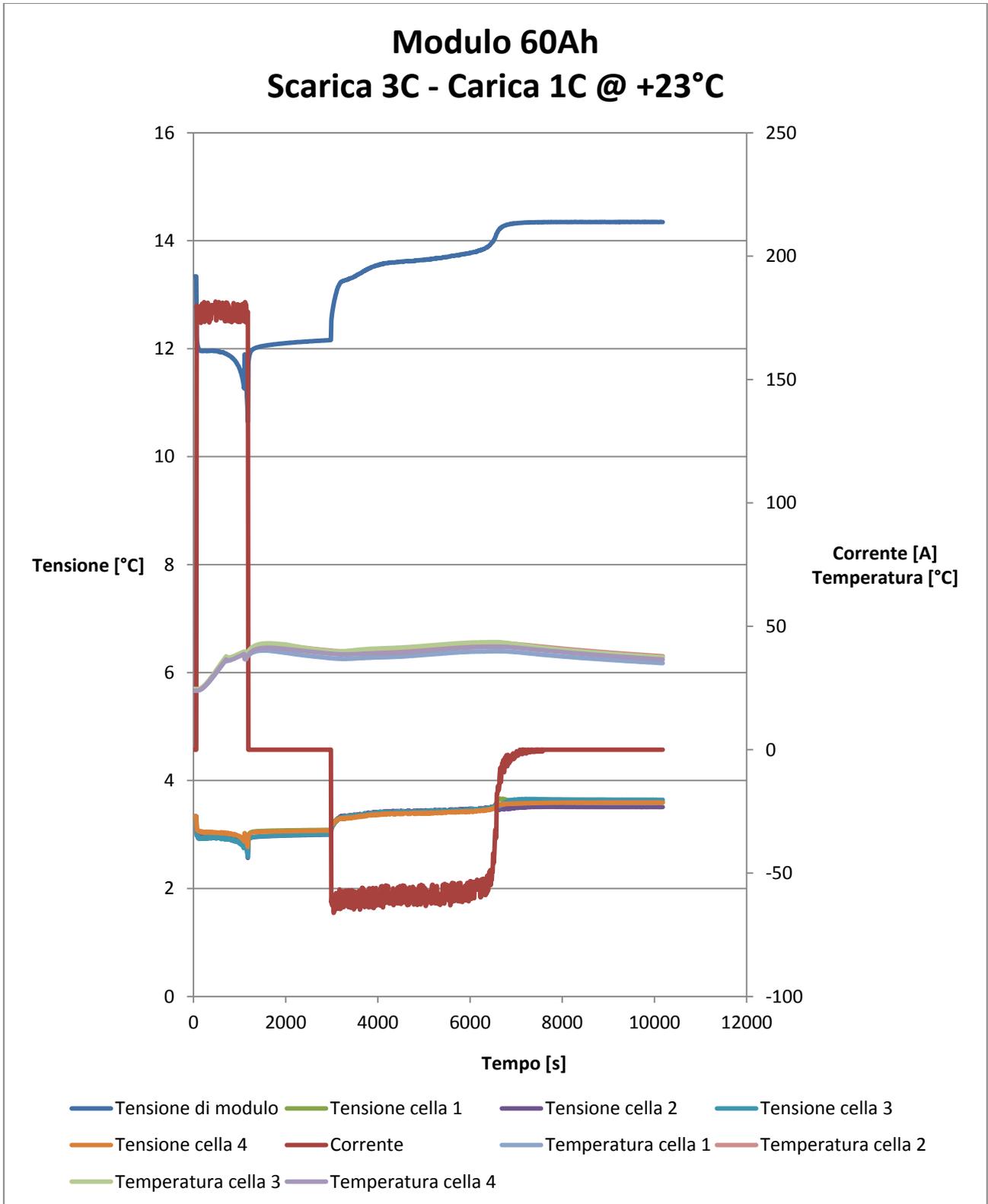
Modulo 30Ah Scarica 3C - Carica 1C @ +40°C Tensioni parziali



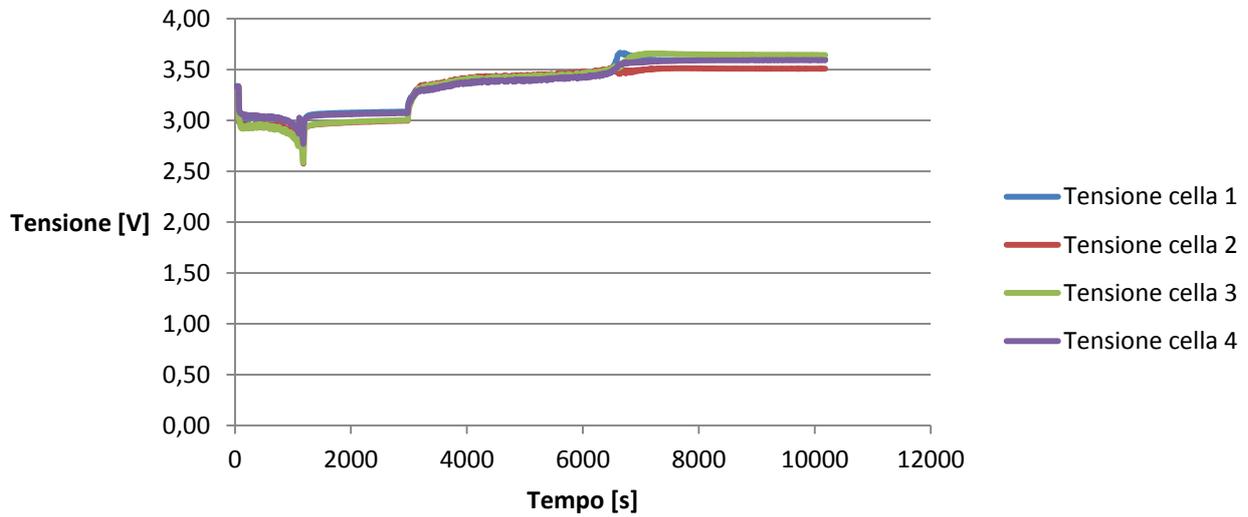
Modulo 30Ah Scarica 3C - Carica 1C @ +40°C Temperatura delle celle



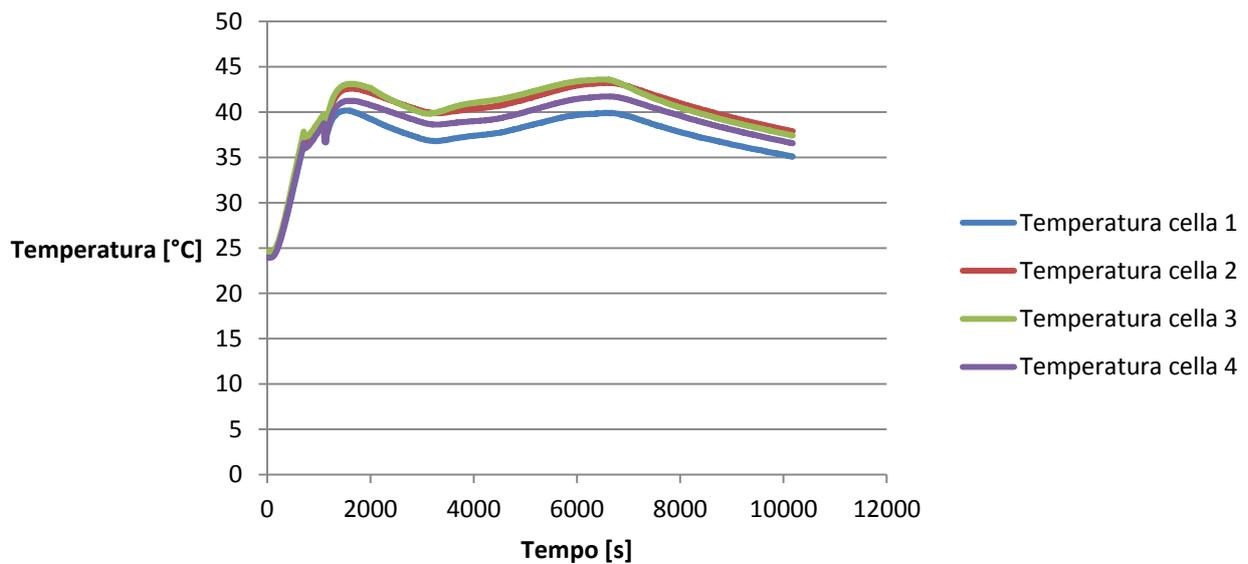
11 Allegato 4 – Diagrammi relativi alle prove di caratterizzazione per il modulo da 60Ah @ +23°C



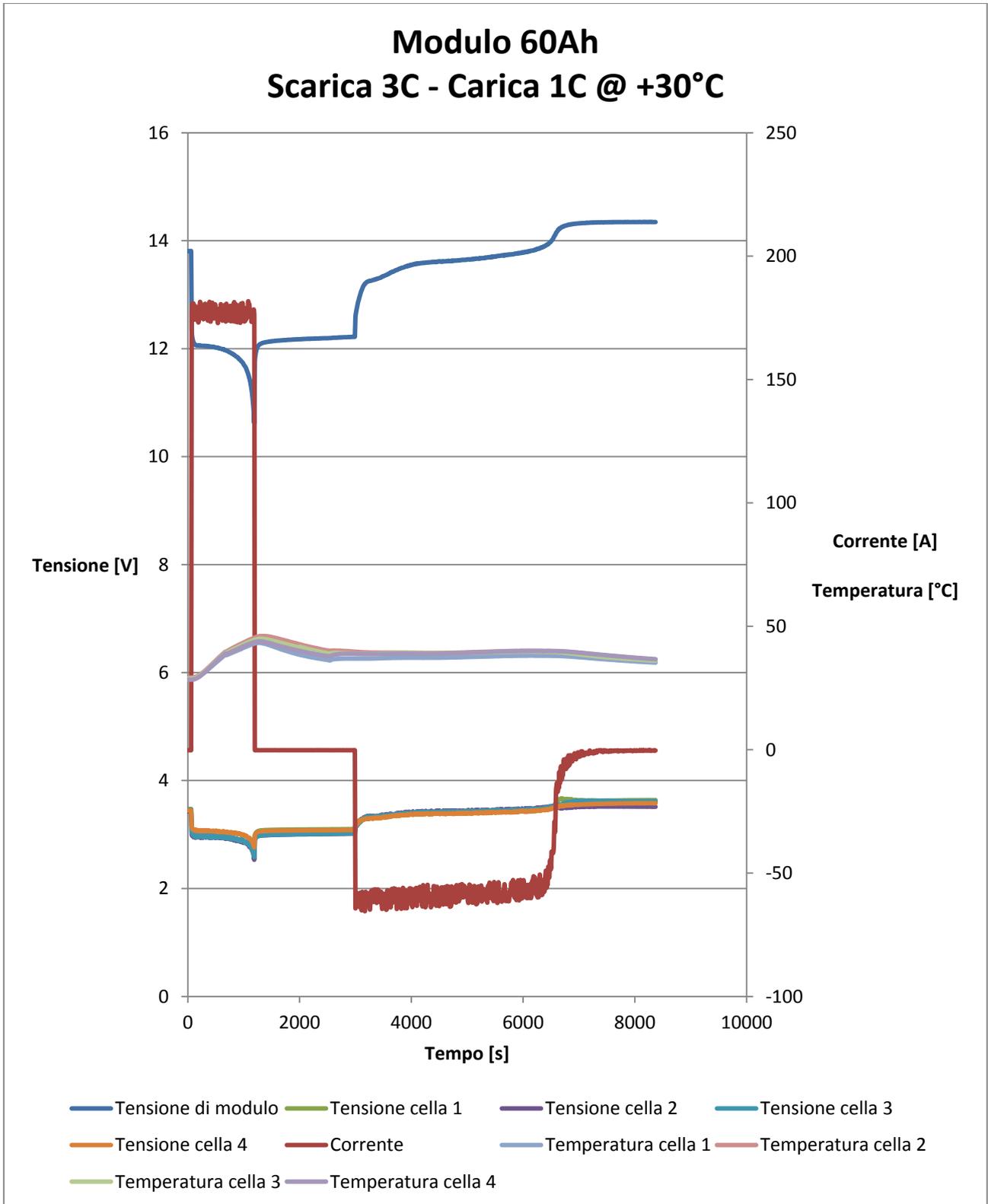
Modulo 60Ah Scarica 3C - Carica 1C @ +23°C Tensioni parziali



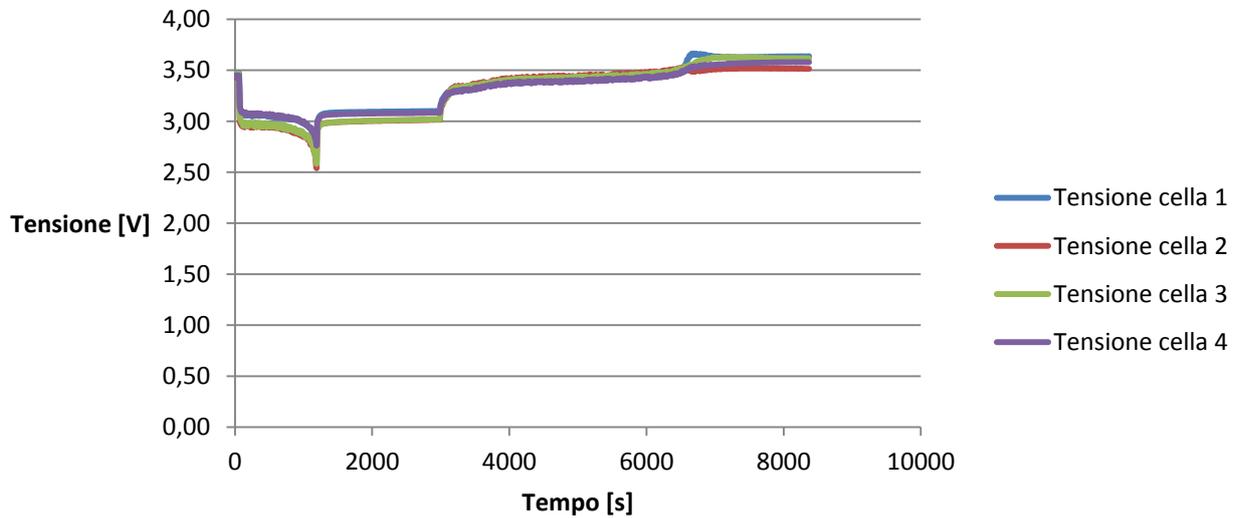
Modulo 60Ah Scarica 3C - Carica 1C @ +23°C Temperature delle celle



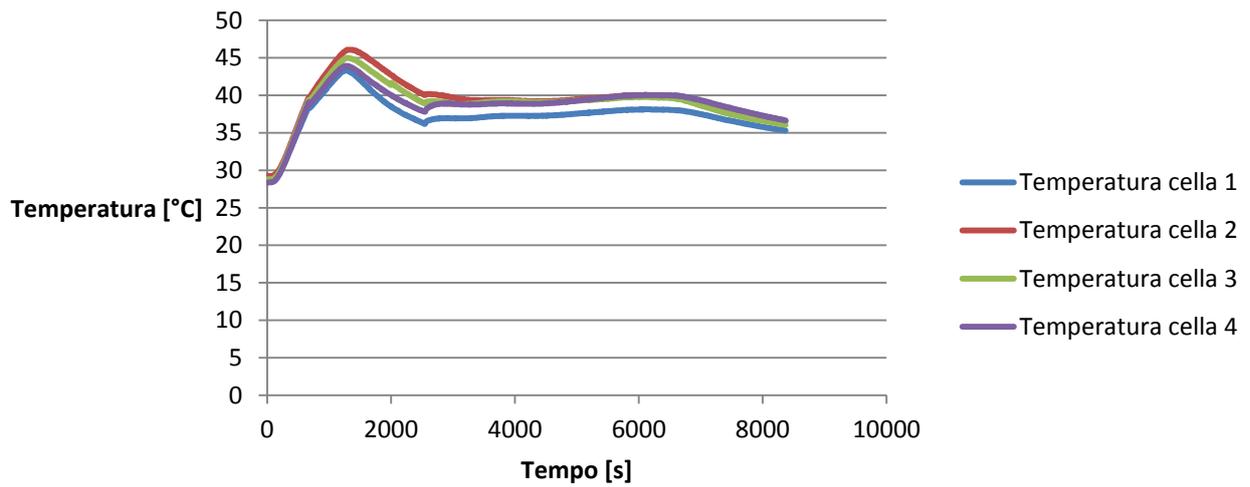
12 Allegato 5 – Diagrammi relativi alle prove di caratterizzazione per il modulo da 60Ah @ +30°C



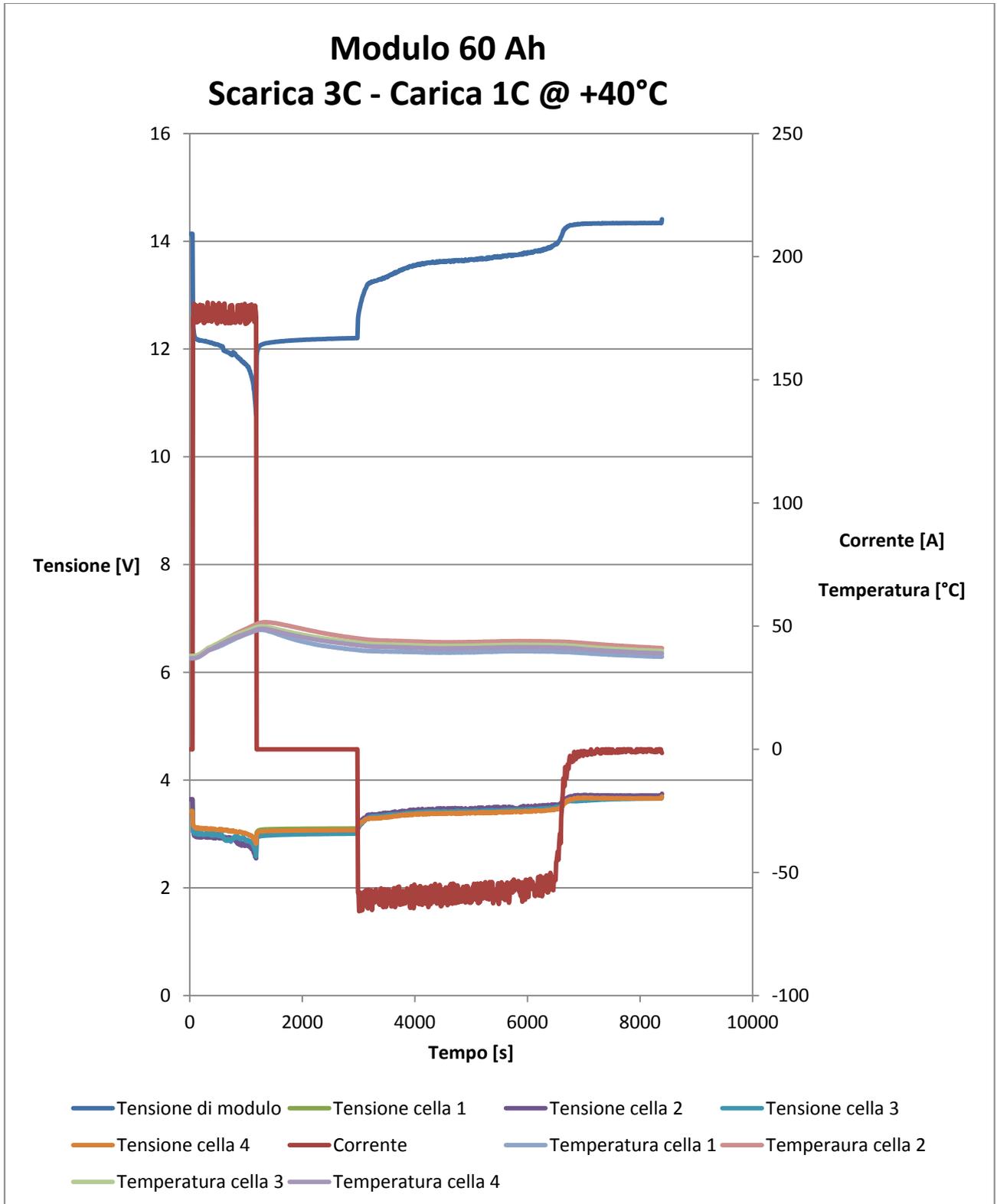
Modulo 60Ah Scarica 3C - Carica 1C @ +30°C Tensioni parziali



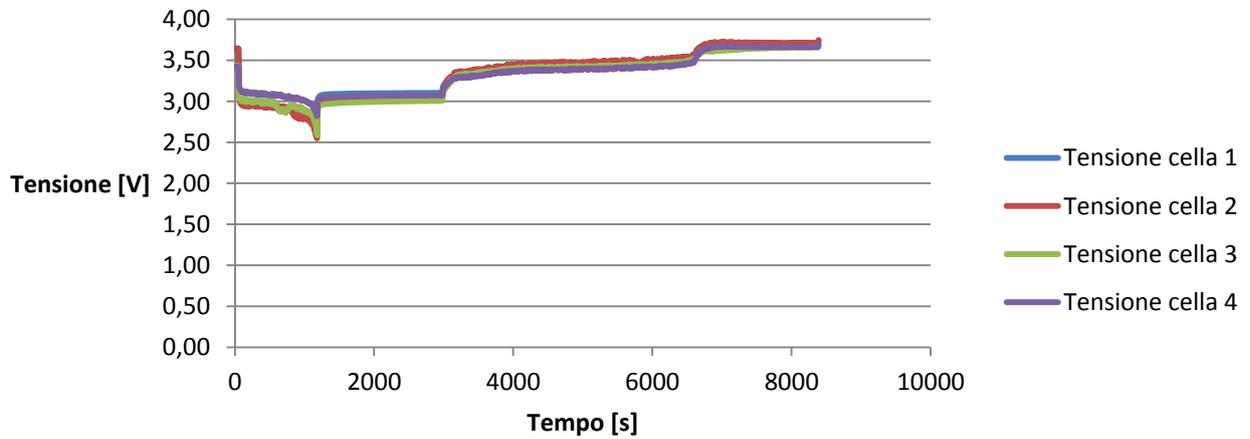
Modulo 60Ah Scarica 3C - Carica 1C @ +30°C Temperature delle celle



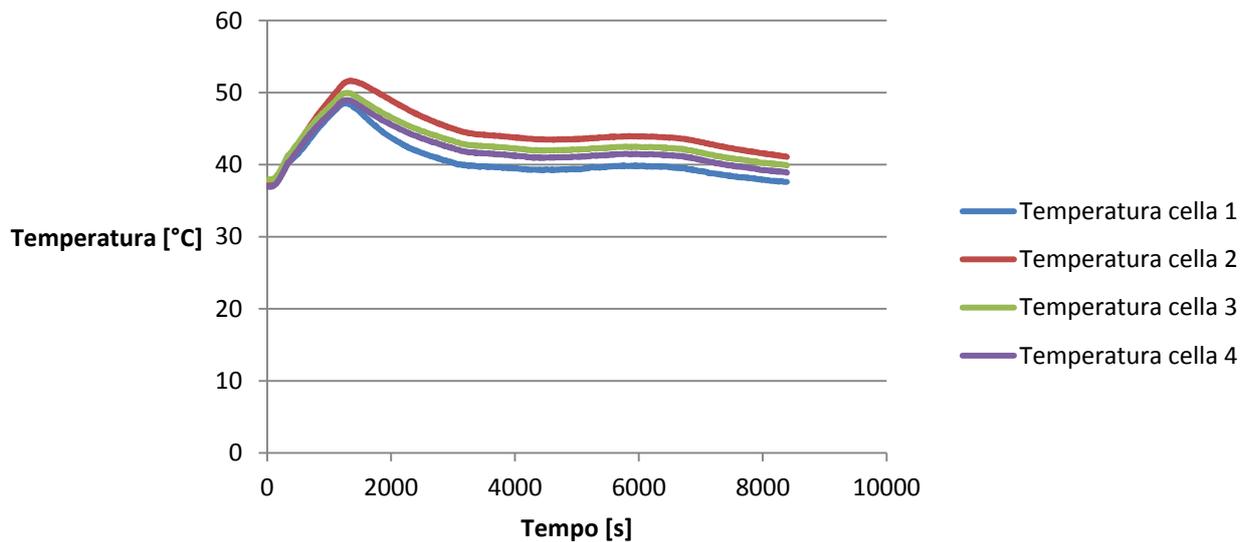
13 Allegato 6 – Diagrammi relativi alle prove di caratterizzazione per il modulo da 60Ah @ +40°C



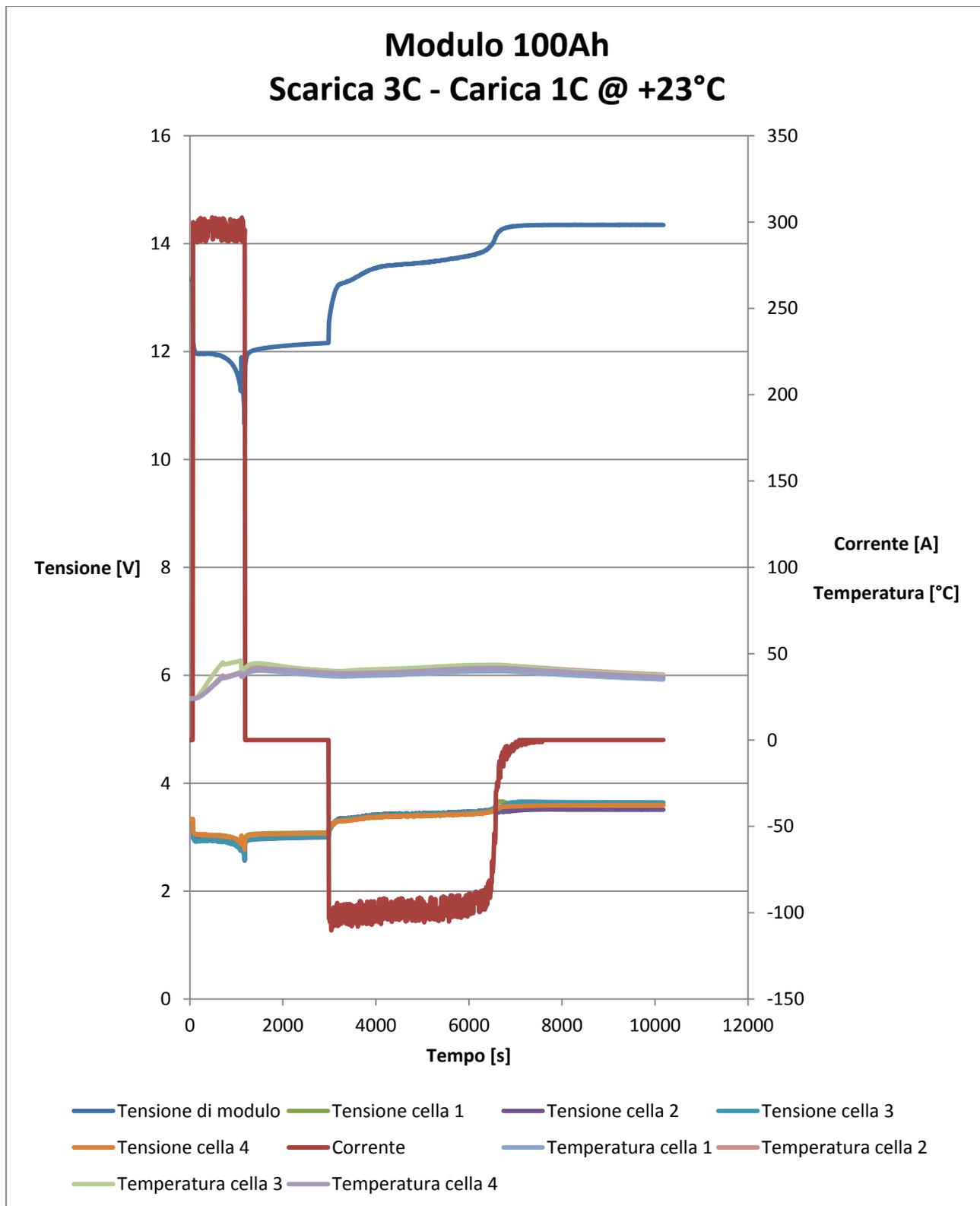
Modulo 60Ah Scarica 3C - Carica 1C @ +40°C Tensioni parziali



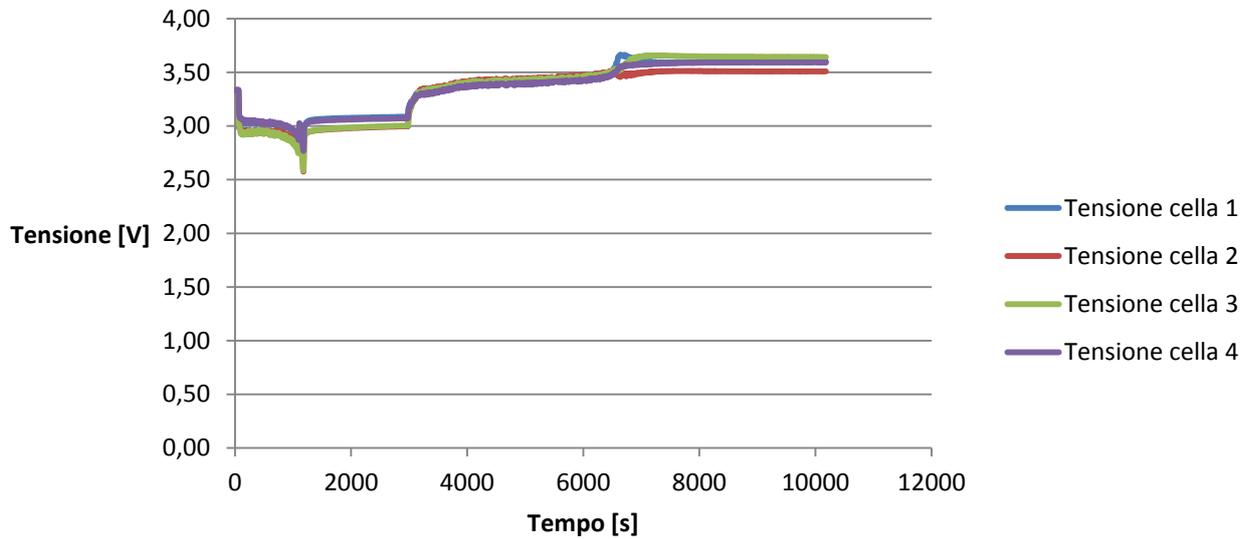
Modulo 60Ah Scarica 3C - Carica 1C @ +40°C Temperatura delle celle



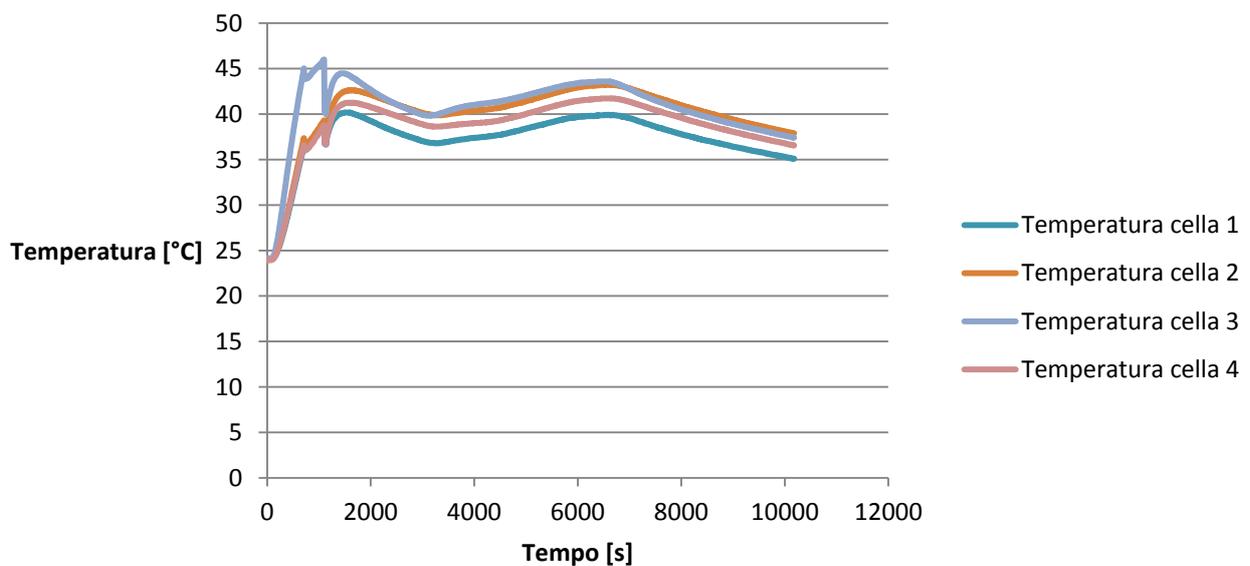
14 Allegato 7 – Diagrammi relativi alle prove di caratterizzazione per il modulo da 100Ah @ +23°C



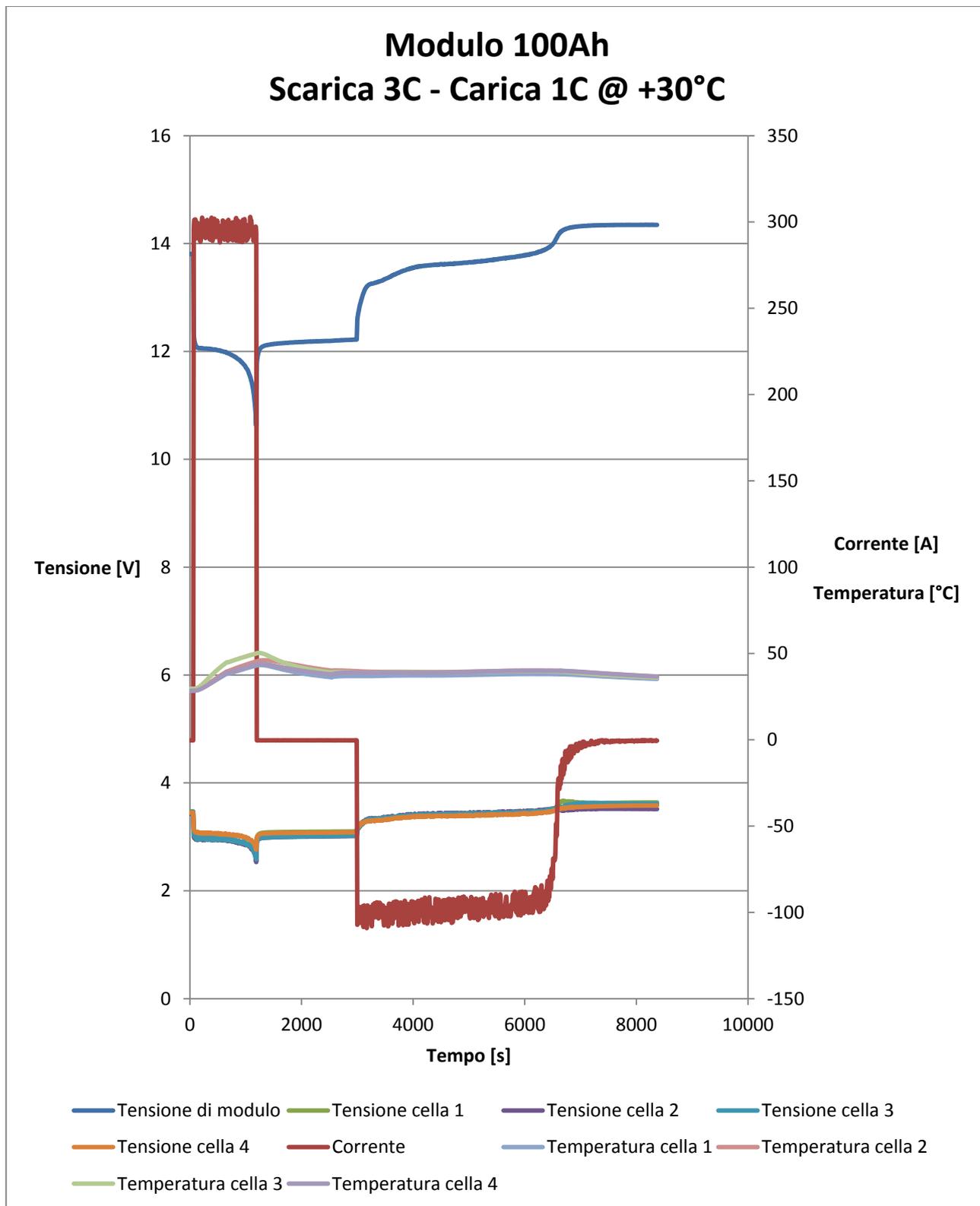
Modulo 100Ah Scarica 3C - Carica 1C @ +23°C Tensioni parziali



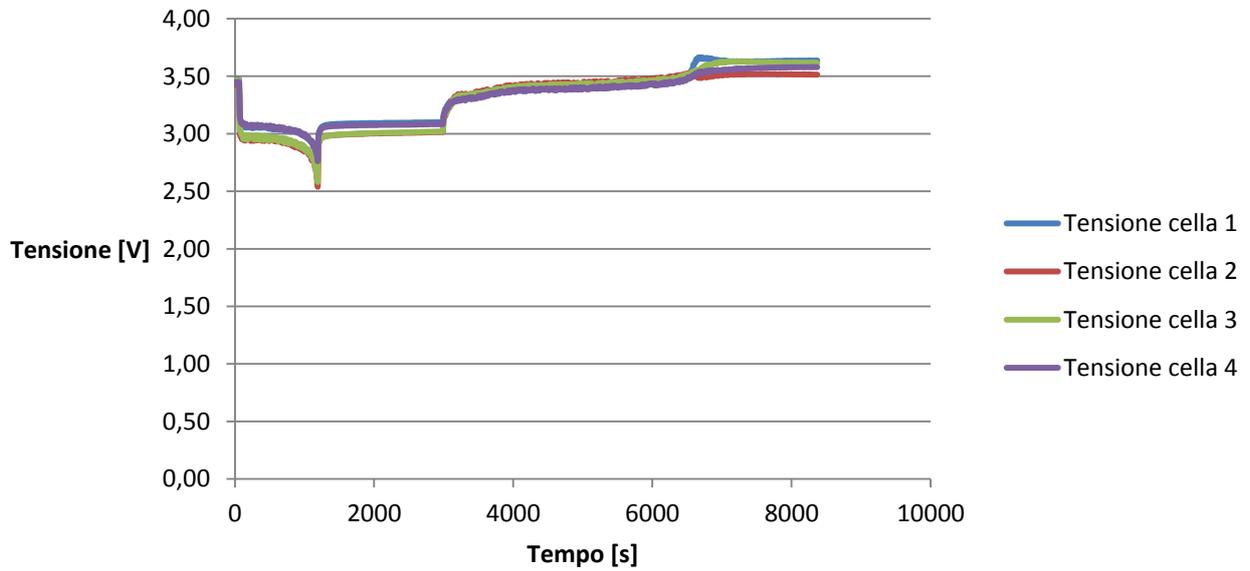
Modulo 100Ah Scarica 3C - Carica 1C @ +23°C Temperatura delle celle



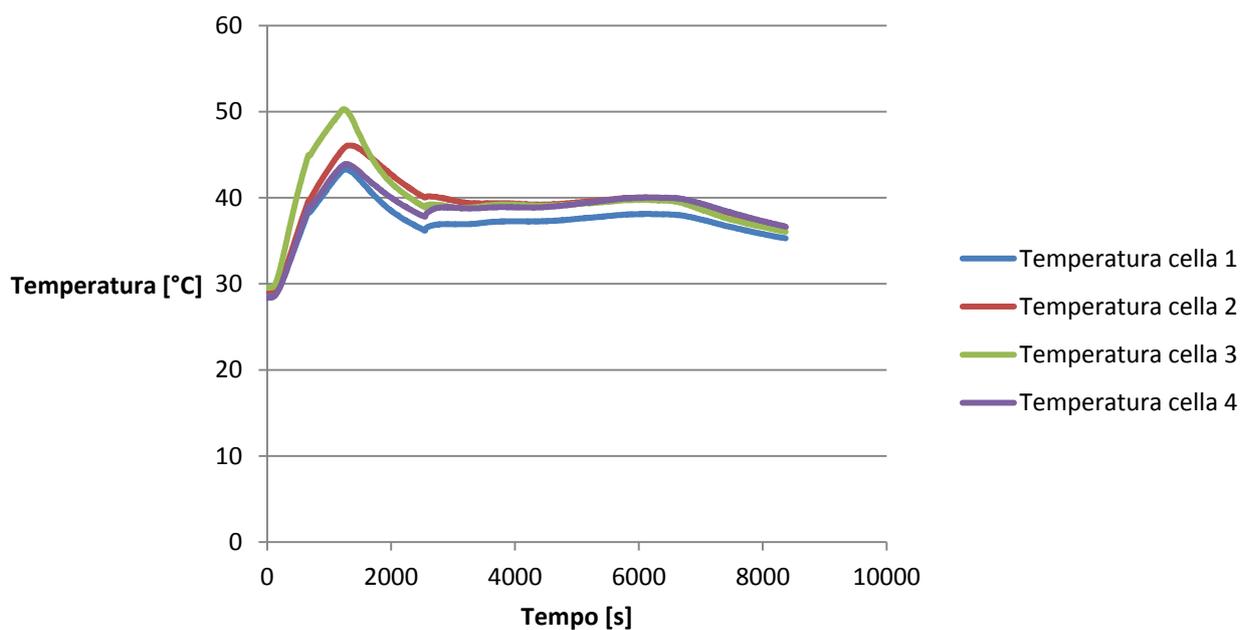
15 Allegato 8 – Diagrammi relativi alle prove di caratterizzazione per il modulo da 100Ah @ +30°C



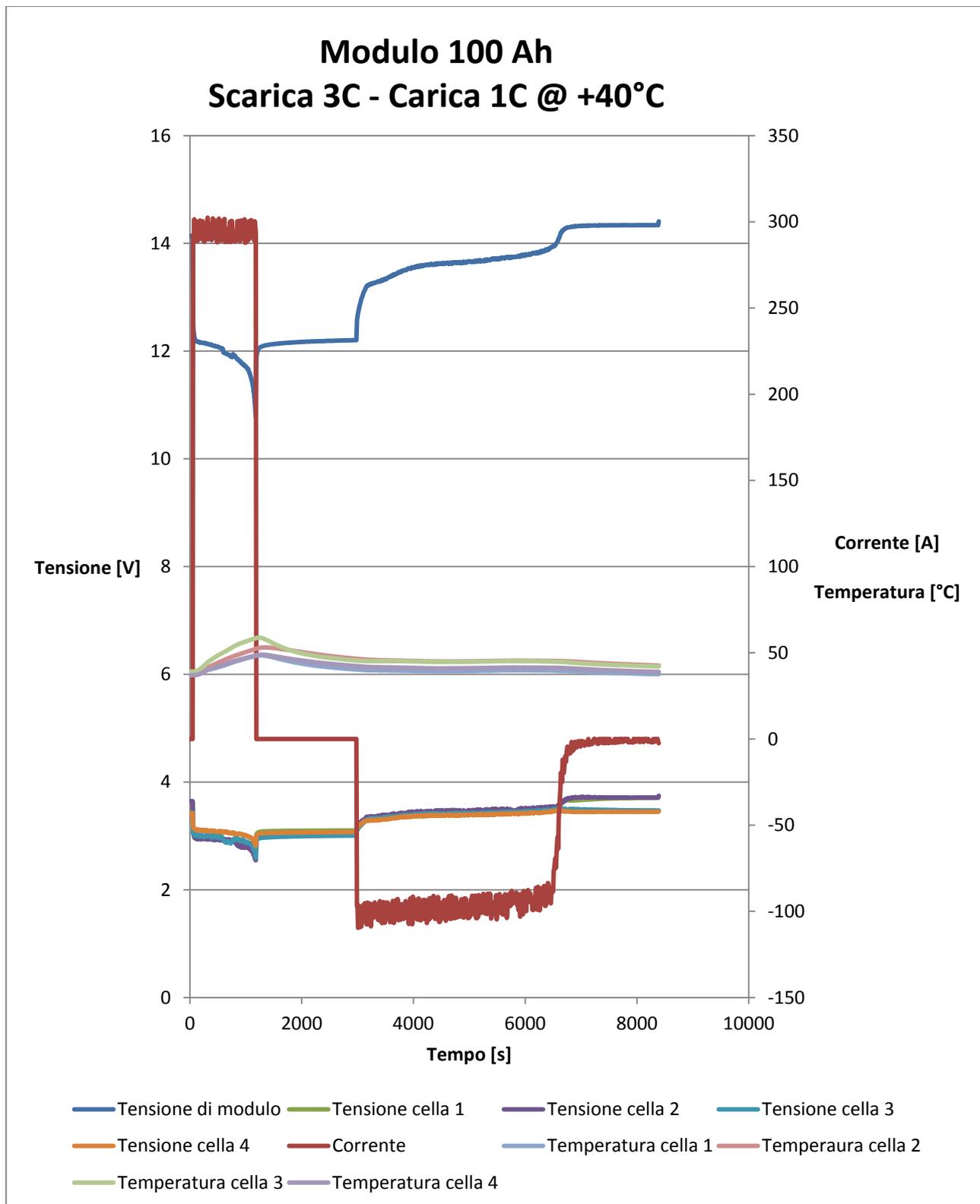
Modulo 100Ah Scarica 3C - Carica 1C @ +30°C Tensioni parziali



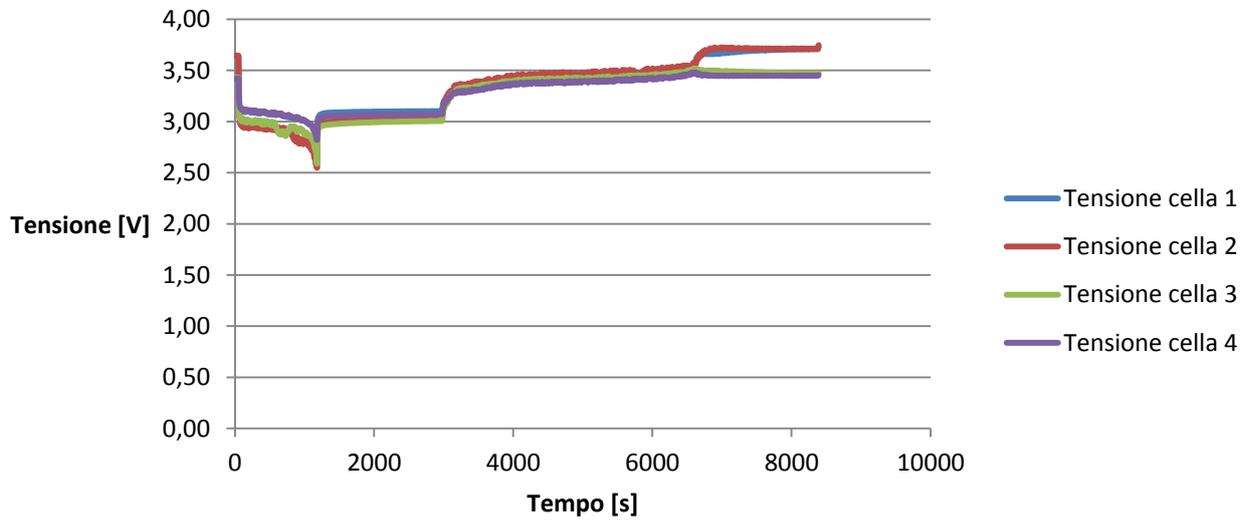
Modulo 100Ah Scarica 3C - Carica 1C @ +30°C Temperatura delle celle



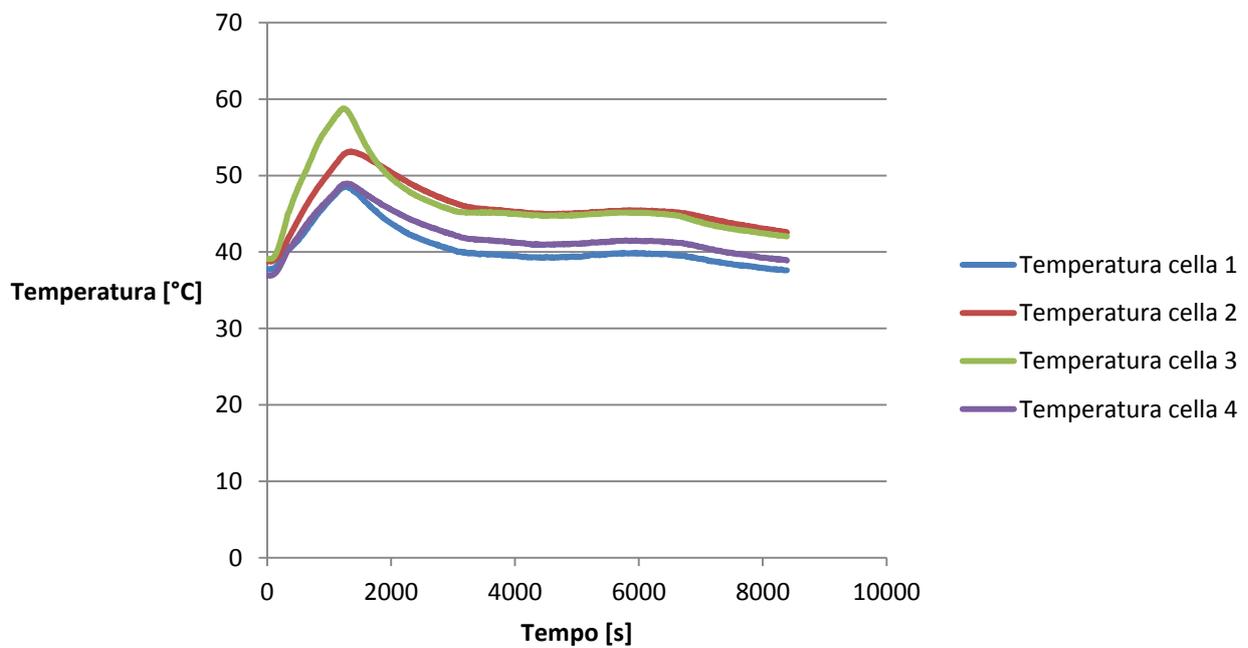
16 Allegato 9 – Diagrammi relativi alle prove di caratterizzazione per il modulo da 100Ah @ +40°C



Modulo 100Ah
Scarica 3C - Carica 1C @ +40°C
Tensioni parziali



Modulo 100Ah
Scarica 3C - Carica 1C @ +40°C
Temperatura delle celle



17 Allegato 10 – Tabella riepilogo prova di scarica 3C – carica 1C

Tabella . Prova di scarica 3C – carica 1C (parte 1^)

| Capacità del modulo [Ah] | Temperatura ambiente di prova [°C] | Tensione minima di modulo [V] | Tensione massima di modulo [V] | Tensione minima cella 1 [V] | Tensione massima cella 1 [V] | Temperatura massima cella 1 [°C] | Tensione minima cella 2 [V] | Tensione massima cella 2 [V] | Temperatura massima cella 2 [°C] | Tensione minima cella 3 [V] | Tensione massima cella 3 [V] |
|--------------------------|------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 30 | +23 | 10,7 | 14,3 | 2,7 | 3,7 | +40 | 2,6 | 3,5 | +41 | 2,6 | 3,7 |
| | +30 | 10,6 | 14,3 | 2,7 | 3,7 | +43 | 2,5 | 3,5 | +44 | 2,6 | 3,6 |
| | +40 | 10,8 | 14,4 | 2,8 | 3,7 | +48 | 2,5 | 3,7 | +49 | 2,6 | 3,7 |
| 60 | +23 | 10,7 | 14,3 | 2,7 | 3,7 | +40 | 2,6 | 3,5 | +43 | 2,6 | 3,7 |
| | +30 | 10,6 | 14,3 | 2,7 | 3,7 | +43 | 2,5 | 3,5 | +46 | 2,6 | 3,6 |
| | +40 | 10,8 | 14,4 | 2,8 | 3,7 | +48 | 2,5 | 3,7 | +52 | 2,6 | 3,7 |
| 100 | +23 | 10,7 | 14,3 | 2,7 | 3,7 | +40 | 2,6 | 3,5 | +43 | 2,5 | 3,7 |
| | +30 | 10,6 | 14,3 | 2,7 | 3,7 | +43 | 2,5 | 3,5 | +46 | 2,6 | 3,6 |
| | +40 | 10,8 | 14,4 | 2,8 | 3,7 | +48 | 2,5 | 3,7 | +53 | 2,5 | 3,5 |

Tabella . Prova di scarica 3C – carica 1C (parte 2^)

| Capacità del modulo [Ah] | Temperatura ambiente di prova [°C] | Temperatura massima cella 3 [°C] | Tensione minima cella 4 [V] | Tensione massima cella 4 [V] | Temperatura massima cella 4 [°C] | Capacità scaricata [Ah] | Capacità caricata [Ah] | Rendimento coulombico | Energia scaricata [Wh] | Energia caricata [Wh] | Rendimento energetico |
|--------------------------|------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 30 | +23 | +41 | 2,8 | 3,6 | +42 | 27,8 | 28,4 | 0,98 | 282,6 | 390,7 | 0,73 |
| | +30 | +43 | 2,8 | 3,6 | +43 | 28,2 | 28,5 | 0,99 | 289,1 | 392,4 | 0,74 |
| | +40 | +48 | 2,8 | 3,5 | +49 | 28,2 | 28,5 | 0,99 | 289,1 | 392,4 | 0,74 |
| 60 | +23 | +43 | 2,8 | 3,6 | +42 | 55,6 | 56,8 | 0,98 | 565,2 | 781,4 | 0,73 |
| | +30 | +45 | 2,8 | 3,6 | +44 | 56,5 | 56,6 | 0,99 | 576,9 | 778,9 | 0,74 |
| | +40 | +50 | 2,8 | 3,7 | +49 | 56,4 | 57,0 | 0,99 | 578,3 | 784,8 | 0,74 |
| 100 | +23 | +46 | 2,8 | 3,6 | +42 | 92,5 | 94,8 | 0,98 | 1000 | 1300 | 0,77 |
| | +30 | +50 | 2,8 | 3,6 | +44 | 94,0 | 94,4 | 0,99 | 1000 | 1300 | 0,77 |
| | +40 | +58 | 2,8 | 3,5 | +49 | 93,8 | 95,1 | 0,98 | 1000 | 1300 | 0,77 |

18 Allegato 11 – Tabella profilo di prova “power balancing”

| Profilo prova di “power balancing” | | |
|------------------------------------|--------------|--------------|
| Gradino No. | Durata [min] | Potenza [kW] |
| 1 | 15 | -0,8/fs |
| 2 | 270 | -1,8/fs |
| 3 | 60 | 0,1/fs |
| 4 | 60 | 2,1/fs |
| 5 | 15 | 3,3/fs |
| 6 | 15 | 1,4/fs |
| 7 | 15 | -2,7/fs |
| 8 | 30 | 0 |
| 9 | 45 | 4,2/fs |
| 10 | 30 | 2,4/fs |
| 11 | 15 | 1,2/fs |
| 12 | 60 | -0,4/fs |
| 13 | 15 | 2,8/fs |
| 14 | 30 | 1,5/fs |
| 15 | 60 | -2,2/fs |
| 16 | 45 | -3,8/fs |
| 17 | 45 | -6,5/fs |
| 18 | 30 | -1/fs |
| 19 | 60 | 0,6/fs |
| 20 | 30 | 2,4/fs |
| 21 | 15 | 5,3/fs |
| 22 | 30 | 2,8/fs |
| 23 | 15 | 1,8/fs |
| 24 | 60 | 4,3/fs |
| 25 | 15 | 6,5/fs |
| 26 | 15 | -1,2/fs |
| 27 | 45 | 0,3/fs |
| 28 | 45 | -0,7/fs |
| 29 | 90 | -0,2/fs |
| 30 | 30 | 1,7/fs |
| 31 | 15 | 0,8/fs |
| 32 | 30 | -0,2/fs |
| 33 | 45 | -1,2/fs |
| 34 | 15 | 0 |
| 35 | 30 | -0,8/fs |

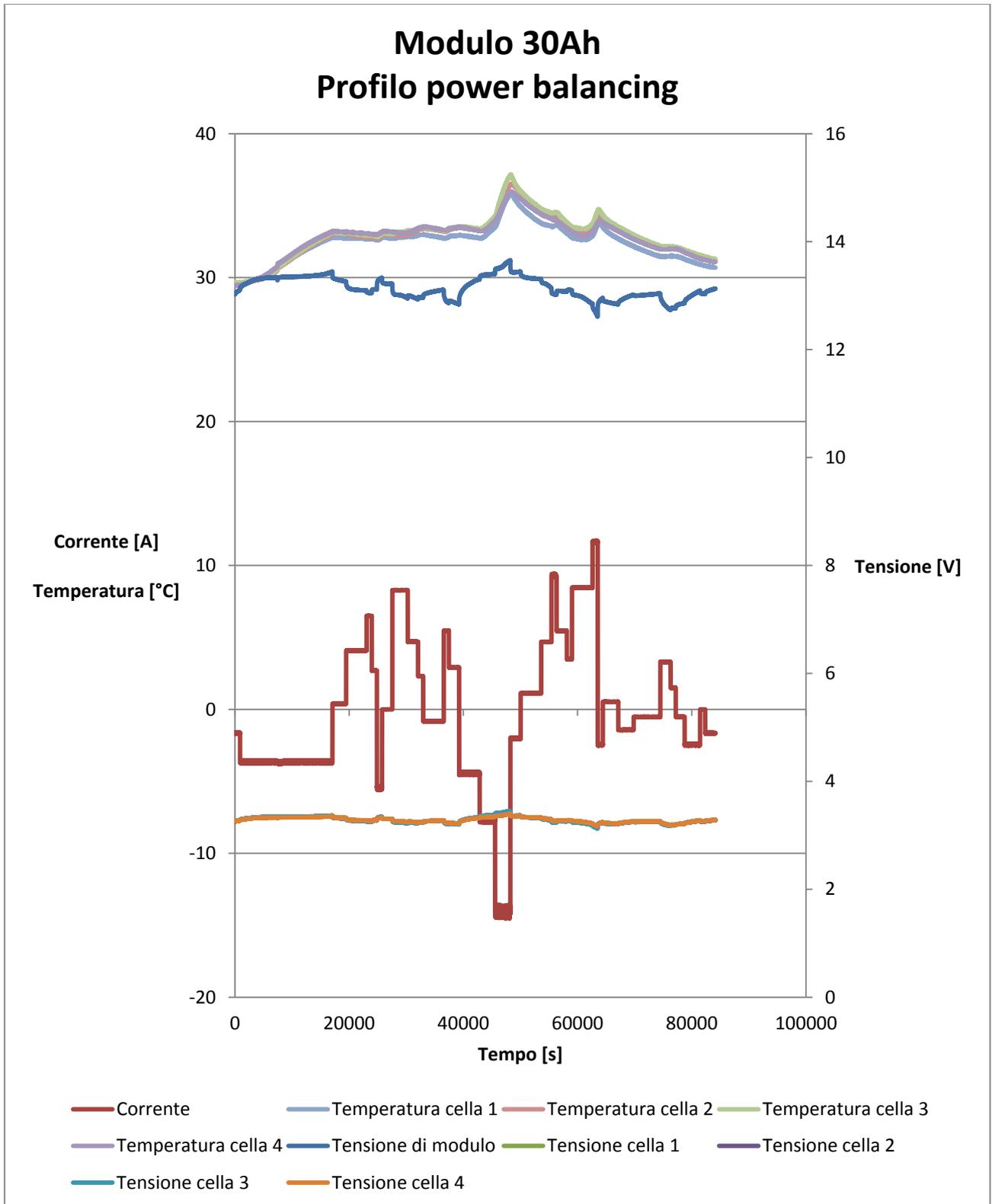
convenzione di segno: scarica > 0, carica < 0

19 Allegato 12 – Tabella profilo di prova “time shift”

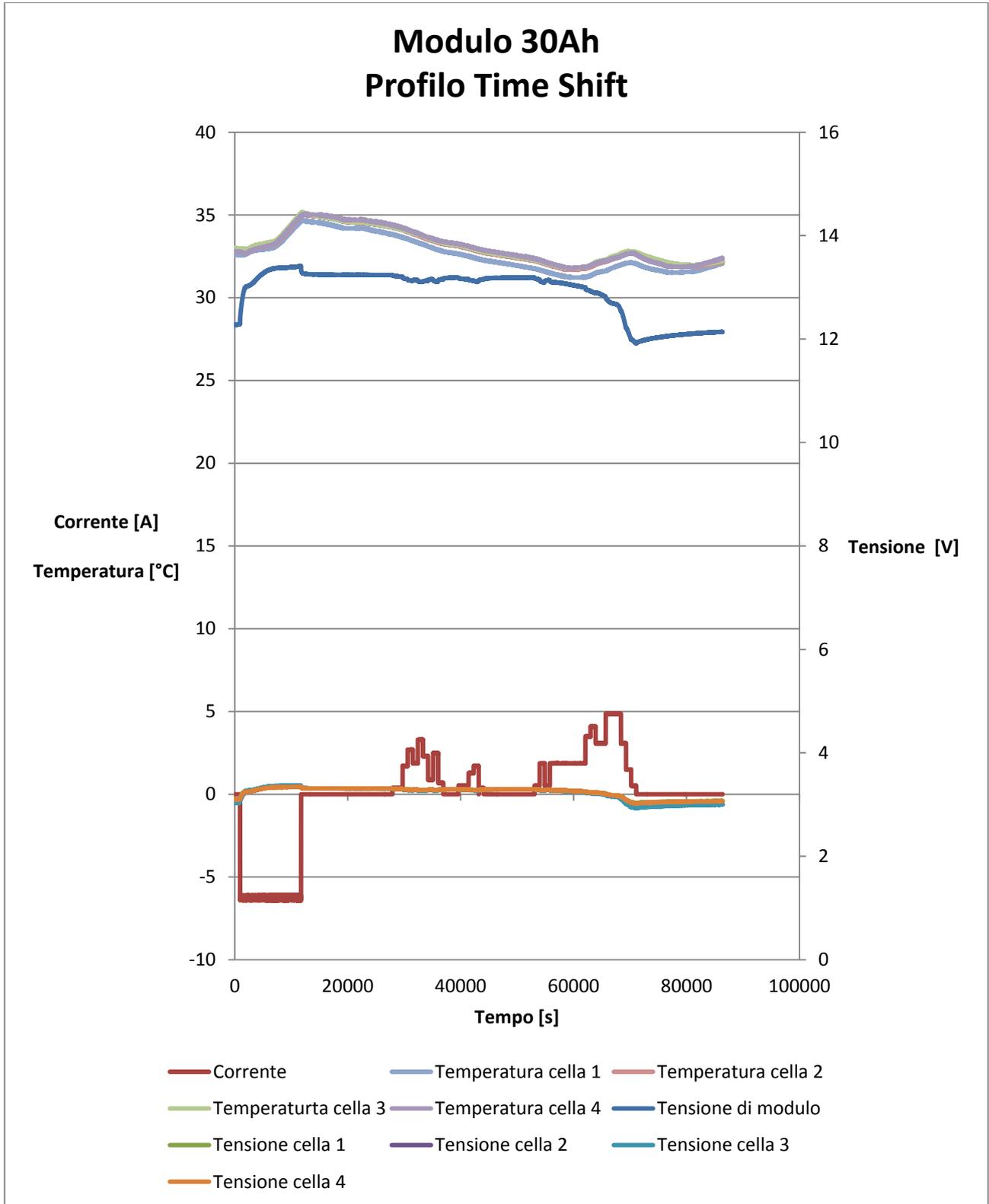
| Profilo prova di “time shift” | | |
|-------------------------------|--------------|--------------|
| Gradino No. | Durata [min] | Potenza [kW] |
| 1 | 15 | 0 |
| 2 | 180 | -3,1/fs |
| 3 | 270 | 0 |
| 4 | 30 | 0,2/fs |
| 5 | 15 | 0,9/fs |
| 6 | 15 | 1,4/fs |
| 7 | 15 | 1/fs |
| 8 | 15 | 1,7/fs |
| 9 | 15 | 1,2/fs |
| 10 | 15 | 0,5/fs |
| 11 | 15 | 1,3/fs |
| 12 | 15 | 0,4/fs |
| 13 | 45 | 0 |
| 14 | 30 | 0,3/fs |
| 15 | 15 | 0,7/fs |
| 16 | 15 | 0,9/fs |
| 17 | 15 | 0,2/fs |
| 18 | 150 | 0 |
| 19 | 15 | 0,3/fs |
| 20 | 15 | 1/fs |
| 21 | 15 | 0,3/fs |
| 22 | 105 | 1/fs |
| 23 | 15 | 1,8/fs |
| 24 | 15 | 2,1/fs |
| 25 | 30 | 1,6/fs |
| 26 | 45 | 2,5/fs |
| 27 | 15 | 1,6/fs |
| 28 | 15 | 0,8/fs |
| 29 | 15 | 0,3/fs |
| 30 | 255 | 0 |

convenzione di segno: scarica > 0, carica < 0

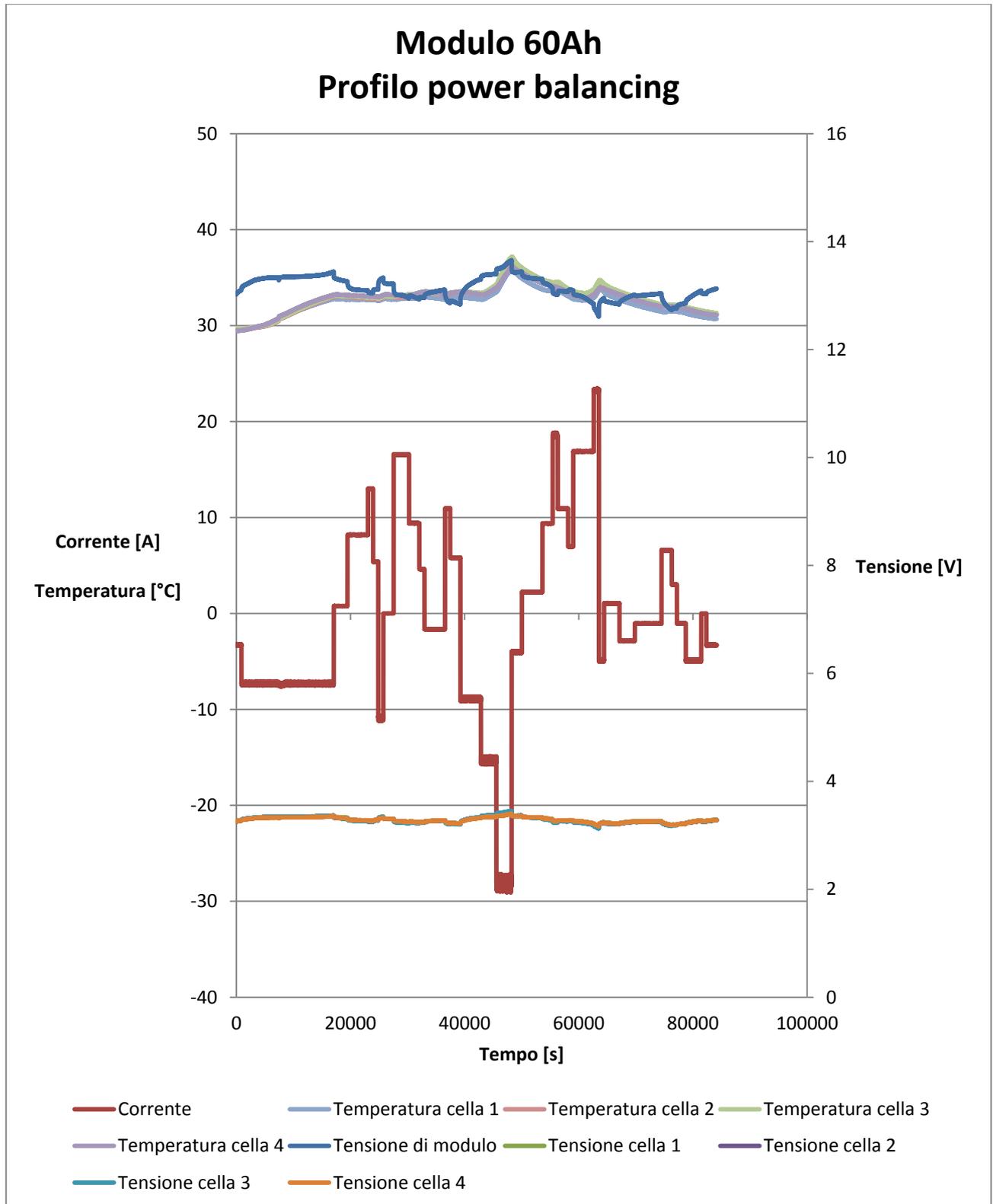
20 Allegato 13 – Prova di “power balancing” per il modulo da 30Ah



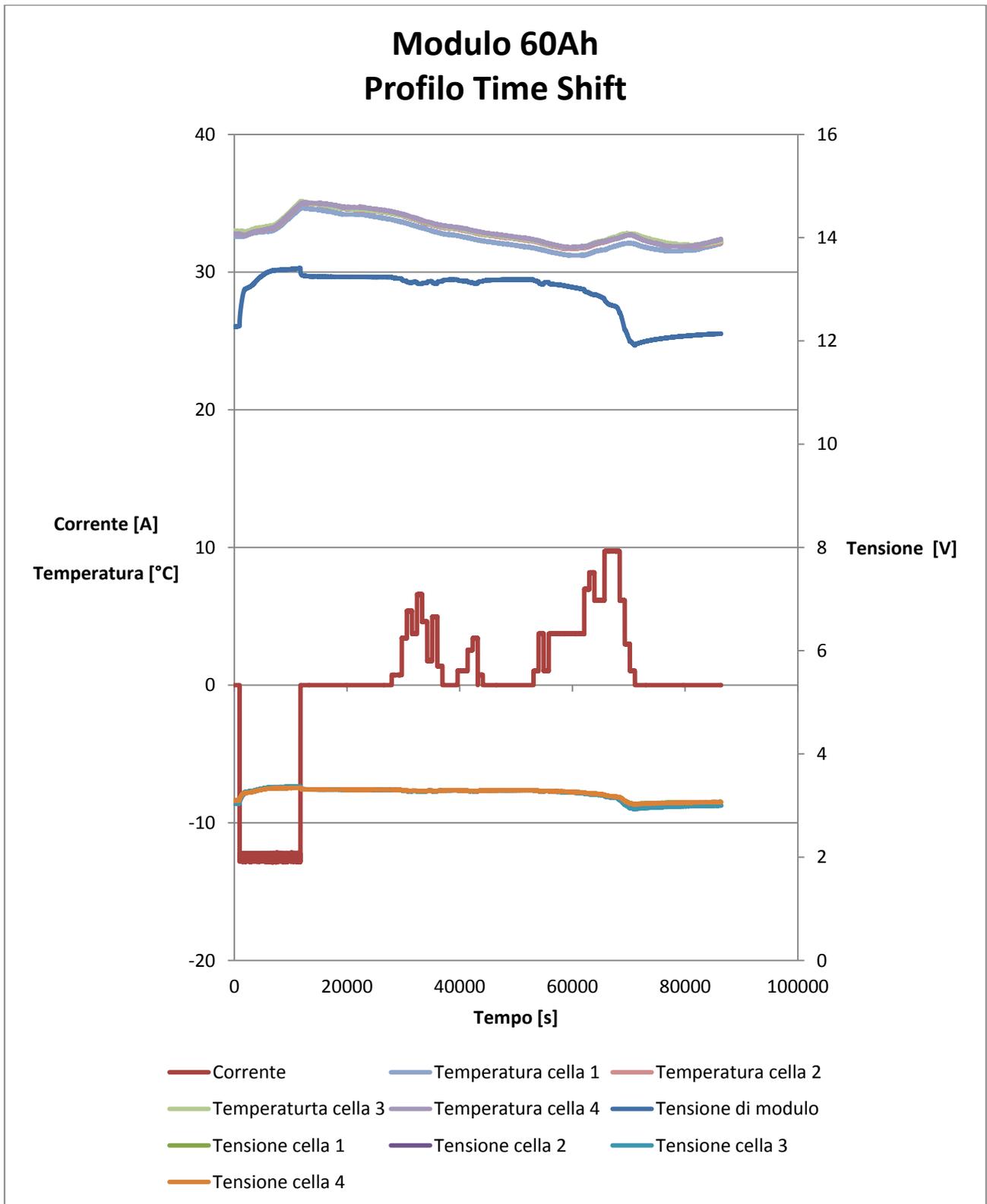
21 Allegato 14 – Prova di “time shift” per il modulo da 30Ah

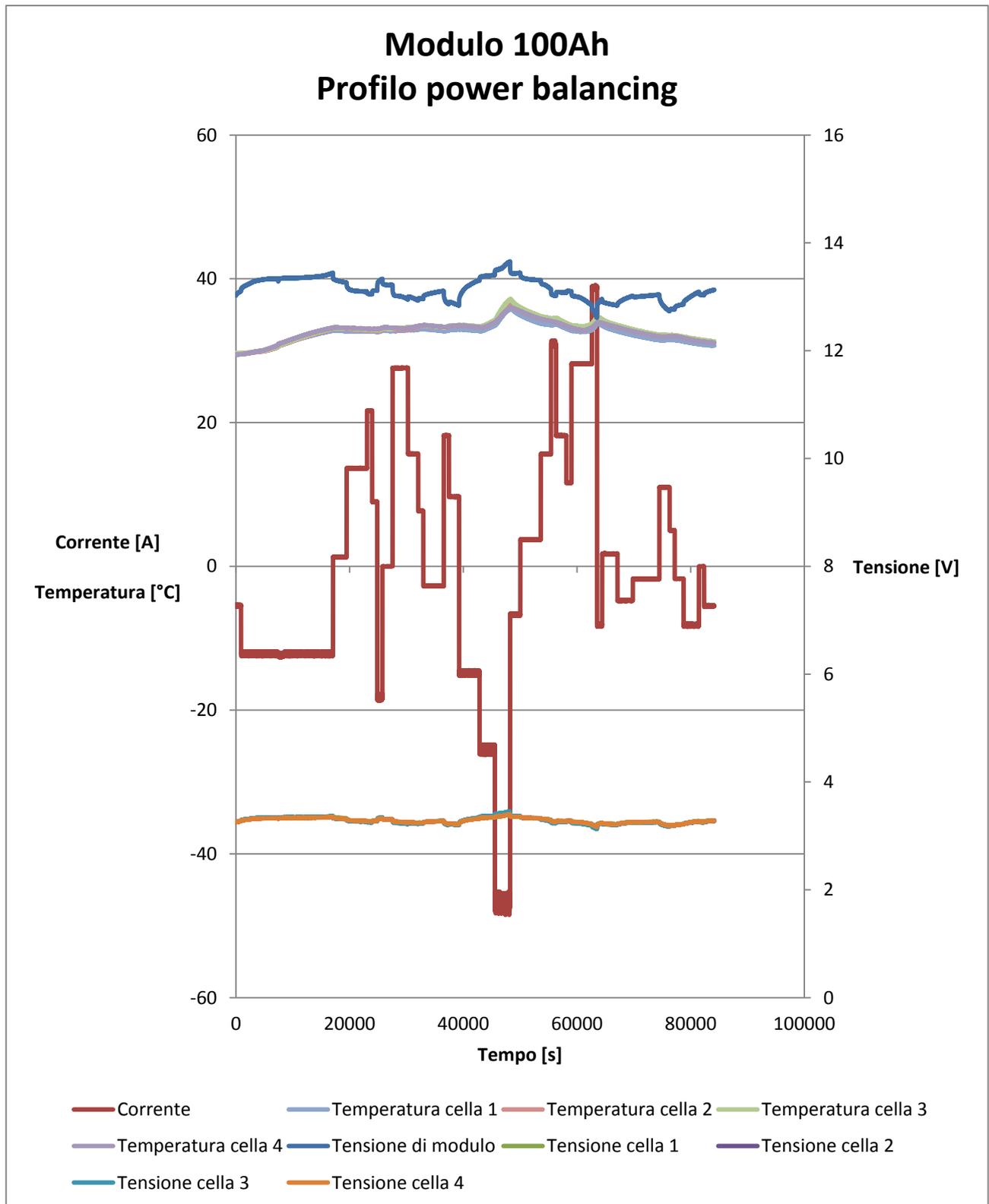


22 Allegato 15 – Prova di “power balancing” per il modulo da 60Ah



23 Allegato 16 – Prova di “time shift” per il modulo da 60Ah





25 Allegato 18 – Prova di “time shift” per il modulo da 100Ah

