



Ricerca di Sistema elettrico

Prova vita su modulo batterie litio-ione sottoposto a carica rapida

Giovanni Pedè, Francesco Vellucci

PROVA VITA SU MODULO BATTERIE LITIO-IONE SOTTOPOSTO A CARICA RAPIDA

Giovanni Pedè, Francesco Vellucci (ENEA)

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: Mobilità elettrica sostenibile

Obiettivo: Trasporto pubblico elettrico con ricarica rapida intermedia: effetti della ricarica rapida sul sistema di accumulo

Responsabile del Progetto: Antonino Genovese, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	6
2.1 DEFINIZIONE DI CARICA RAPIDA	6
2.2 PROGRAMMA DELLE ATTIVITÀ	6
2.3 APPARECCHIATURE UTILIZZATE.....	7
2.4 CONDIZIONI DI PROVA	8
2.4.1 <i>Grandezze misurate</i>	8
2.4.2 <i>Frequenza di campionamento</i>	9
2.4.3 <i>Accuratezza delle misure</i>	9
2.4.4 <i>Tolleranze di prova</i>	9
2.5 MODULO BATTERIE.....	9
2.6 PROFILO DI PROVA.....	13
2.6.1 <i>Riscontro applicativo del profilo di lavoro adottato per l'esecuzione della prova vita</i>	14
3 RISULTATI	16
3.1 RIEPILOGO RISULTATI DELLA PRECEDENTE ANNUALITÀ	16
3.2 RISULTATI DELLA PRESENTE ANNUALITÀ	17
3.2.1 <i>Grandezze elettriche e termiche</i>	17
3.2.2 <i>Check periodico delle prestazioni di capacità ed energia</i>	20
3.2.3 <i>Resistenza interna</i>	22
3.2.4 <i>Valore massimo della corrente di carica</i>	24
3.2.5 <i>Variazione delle soglie di lavoro</i>	25
3.2.6 <i>Equilibrio della quantità di carica elettrica</i>	25
3.3 PREVISIONE VITA	28
3.4 ANALISI DEI COSTI A FINE VITA.....	29
3.5 RISCONTRI APPLICATIVI: ULTERIORE INDAGINE PER MISSIONE CON TEMPI DI CARICA/SCARICA RADDOPPIATI	30
3.5.1 <i>Profilo impostato al ciclatore</i>	31
3.5.2 <i>Comportamento del modulo</i>	31
3.5.3 <i>Prestazioni</i>	33
3.5.4 <i>Caratterizzazione prima e dopo l'esecuzione della prova</i>	33
4 CONCLUSIONI.....	36
5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	38
6 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	39

Sommario

Il lavoro descritto nel presente documento è la prosecuzione della prova vita su un modulo batterie litio-ione, iniziata nella precedente annualità.

Esso si inquadra nello studio generale del comportamento dei sistemi d'accumulo elettrochimici sottoposti a carica rapida e gli effetti da questa prodotti su:

- 1) la capacità di eseguire profili di lavoro che includono fasi di carica rapida, senza incorrere nei limiti elettrici e termici,
- 2) la vita del sistema d'accumulo stesso.

Nella precedente annualità, è stata condotta una prova vita dapprima a livello di singola cella, elemento di base nell'architettura dei sistemi d'accumulo e, successivamente, una prova analoga è stata avviata su un modulo batterie. Sia le celle che il modulo testati sono del tipo litio-ione, con tecnologia catodica litio – ferro – fosfato. Il profilo di lavoro include una fase di carica ad un rate di corrente pari a 3C (tre volte il valore di capacità nominale della cella) ed ha riscontro applicativo in una tipologia di missione richiesta dal trasporto pubblico locale per veicoli tipo minibus. Nella prova a livello di cella, sono stati eseguiti circa 2000 cicli che non hanno determinato un decadimento delle prestazioni. L'esito positivo della prova ha indotto a ripeterla su un modulo batterie: la scorsa annualità si è conclusa con l'esecuzione di 1'000 cicli. Pur se, a differenza della cella, il modulo batterie ha evidenziato alcune problematiche, tipiche dei sistemi con più celle, ma notevolmente accentuate dalla carica rapida, anche in questo caso non si è verificato un decadimento delle prestazioni. Ciò ha consentito di dare risposta alla richiesta del punto 1, definendo i requisiti che il sistema d'accumulo deve possedere per sopportare la carica rapida mentre, relativamente al punto 2, si è giunti ad acquisire informazioni solo per il livello di singola cella.

Nella presente annualità, è stata proseguita la prova sul modulo batterie. In questo elaborato viene illustrato l'avanzamento delle prove, evidenziando alcune ulteriori problematiche che si sono manifestate con il progredire dell'invecchiamento e gli accorgimenti che di tanto in tanto è stato necessario adottare (sempre garantendo la parità di risultato, cioè di servizio compiuto dal minibus) per proseguire l'attività. Il sistema elettronico di controllo del modulo batterie, grazie al bilanciamento ed alla gestione del raffreddamento, fa sì che tensione e temperatura delle celle si mantengano all'interno del range di normale funzionamento ed il modulo continui a resistere all'applicazione della carica rapida. Allo stato attuale, sono state eseguiti 3'000 cicli: nei controlli dello stato di salute, effettuati interrompendo periodicamente l'iterazione della procedura di prova vita ed eseguendo dei cicli standard per la misura dei valori di capacità ed energia, il modulo batterie non ha ancora manifestato un significativo decadimento prestazionale. E' emerso, invece, un certo aumento della resistenza interna, che al procedere dell'invecchiamento può condurre il modulo batterie all'incapacità di eseguire il profilo di carica/scarica richiesto dalla procedura di prova vita, cioè alla perdita di operatività con riferimento alla missione corrispondente per il minibus: questa situazione può verificarsi prima ancora della riduzione di capacità, condizione classicamente assunta per decretare la fine della vita dei sistemi d'accumulo per uso veicolare (capacità/energia erogata nei cicli standard di controllo periodico della prestazioni minore o uguale all'80% del valore nominale iniziale).

1 Introduzione

L'attività descritta nel presente documento si inquadra nell'Obiettivo a.2 "Trasporto pubblico elettrico con ricarica rapida intermedia: effetti della ricarica rapida sul sistema di accumulo" del Progetto D.8 "Mobilità elettrica sostenibile", a sua volta collocato nell'Area "Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici" dell'Accordo di Programma tra il Ministero dello Sviluppo Economico e l'ENEA, Piano Annuale di Realizzazione 2015.

Esso illustra la prosecuzione ed i risultati di una prova vita, avviata nella scorsa annualità, che viene eseguita sottoponendo un modulo batterie ad un profilo di lavoro che:

- include una fase di carica rapida,
- ha una particolare rispondenza con una tipologia di missione di trasporto pubblico locale per un minibus in servizio di linea su una tratta di breve lunghezza, con ricarica rapida nei pochi minuti di sosta al capolinea.

L'influenza delle correnti elevate in fase di carica sulla durata della batteria è ancora poco nota. I limiti di corrente "in carica" posti dai costruttori di batterie sono piuttosto bassi. La letteratura scientifica è abbastanza carente a riguardo: ai molti studi di modellistica, caratterizzazione e confronto tra le varie tipologie di batterie, non fanno riscontro altrettanti studi e ricerche sui cicli vita, in particolari quelli che includono fasi di carica rapida. Se da un lato qualcosa è stato fatto a livello di singola cella (elemento di base del sistema d'accumulo elettrochimico) dall'altro ben poco si conosce circa la vita e gli effetti della carica rapida a livello di sistema complesso (modulo o sistema batterie, dotato di più celle, opportunamente connesse) [1], [2], [3], [4]. Nella sperimentazione della precedente annualità, condotta prima a livello di cella e poi di modulo, sono stati condotti migliaia di cicli (per l'esattezza 2'000 a livello di singola cella e 1'000 a livello di modulo) di scarica e carica rapida, senza registrare un decadimento significativo delle prestazioni. Mentre nella prova a livello di singola cella, concepita solamente per dare un primo inquadramento alla tematica della carica rapida, non è stato necessario portare a morte il campione, nella prova sul modulo batterie bisogna raggiungere la condizione di fine vita. E' parso perciò importante proseguire la prova iniziata lo scorso anno. Scopo della prova è indagare sugli effetti prodotti dalla carica rapida sui sistemi d'accumulo, valutarne la fattibilità tecnica in termini di impatto sulle prestazioni, sulla vita e, conseguentemente, la fruibilità nell'ambito applicativo. Tutto ciò si colloca nell'ottica generale di cercare di rispondere all'esigenza pratica e psicologica di avvicinare il più possibile le modalità d'uso del veicolo elettrico a quello convenzionale e, in particolare, nel cercare di trarre le informazioni indispensabili alla definizione del costo a fine vita delle batterie per un autobus soggetto a questo tipo di servizio.

Per redigere un rapporto a sé stante, che non costringa il lettore a continui rinvii al documento della precedente annualità [5], al quale comunque si rimanda per i dettagli, alcuni paragrafi (strumentazione utilizzata, condizioni di prova, descrizione del dispositivo testato) sono stati ripresi/richiamati, corredati delle dovute integrazioni/precisazioni relative alla presente annualità, ove necessarie.

2 Descrizione delle attività svolte

2.1 Definizione di carica rapida

Una delle problematiche legate alla diffusione del veicolo elettrico è la scarsa autonomia e quindi la necessità della carica, in termini di disponibilità dell’infrastruttura sul territorio e di velocità.

Uno dei fattori considerati per la definizione di carica rapida è la potenza: secondo la “Direttiva del parlamento Europeo e del Consiglio sullo sviluppo dell’infrastruttura per combustibili alternativi” viene considerata “rapida” la carica per veicoli a motore (esclusi autobus e mezzi pesanti) eseguita con una potenza superiore a 22 kW. Il tempo di carica dipende dall’energia accumulabile nel sistema batterie del veicolo: ad esempio, alla potenza di 22 kW un veicolo con sistema batterie da 22 kWh (auto di media taglia) si carica teoricamente in un’ora, mentre un veicolo con sistema batterie da 220 kWh (autobus) si carica teoricamente in dieci ore. Il vero fattore discriminante circa la velocità di carica è il tempo: una carica viene definita “rapida” se di durata pari od inferiore ad un’ora, “ultrarapida” se di durata pari od inferiore a venti minuti. La Figura 1 illustra questo concetto.

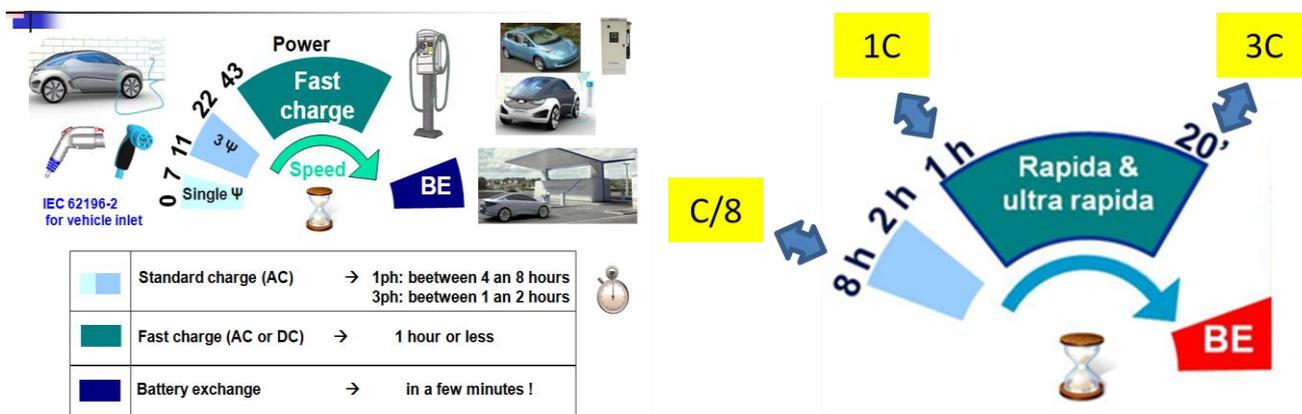


Figura 1. Definizione di carica rapida con riferimento alla potenza (sinistra) ed al tempo (destra)

Nella parte destra della figura viene mostrata (evidenziata in giallo) la velocità di carica usando il gergo tecnico secondo cui il valore della corrente è espresso come multiplo (nC) o sottomultiplo (C/n) del valore di capacità nominale del sistema d’accumulo (C). Ad esempio, con carica a 3C si intende una carica eseguita ad una corrente pari a 3 volte il valore di capacità nominale delle batterie: tale corrente ricaricherebbe teoricamente le batterie in un terzo d’ora, cioè venti minuti.

2.2 Programma delle attività

Le schede tecniche fornite dai costruttori di batterie e la letteratura scientifica abbondano di dati relativi alle celle (prestazioni in carica e scarica, vita nel ciclo standard¹) ma ben poco è disponibile a livello di assieme batterie (modulo, sistema completo) in particolare con riferimento alla vita di tali dispositivi quando sono sottoposti ad un profilo di lavoro che include la carica rapida. Quando più celle sono collegate per formare un’unità complessa (modulo, sistema batterie) le prestazioni dell’assieme sono inferiori alla

¹ Il ciclo standard è un ciclo di carica/scarica in cui le fasi di carica/scarica sono eseguite a regimi di corrente suggeriti dal costruttore delle batterie, e quindi non impegnativi per le stesse: solitamente, scarica a corrente costante C/2 o C/3 fino al raggiungimento della tensione minima di lavoro della batteria, carica a corrente costante con valore C/2 o C/3 fino al raggiungimento della tensione massima di lavoro della batteria, proseguimento della carica a tensione costante e corrente decrescente fino al valore C/100. Il ciclo viene eseguito a partire dallo stato di riferimento di batteria completamente carica, quindi viene svolta la fase di scarica completa della batteria e poi quella di carica completa fino a tornare nuovamente allo stato di riferimento iniziale. Carica e scarica sono separate da una pausa di durata opportuna per il riassetto della temperatura, solitamente non inferiore a mezz’ora/un’ora.

somma delle prestazioni dei singoli elementi, in quanto intervengono problematiche di gestione termica e bilanciamento dello stato di carica delle celle. Inoltre, la vita di un sistema d'accumulo, sia esso a livello di cella, sia di unità complessa (modulo, sistema batterie) sottoposto al ciclo standard, è diversa da quella relativa ad un profilo di lavoro che non sia il ciclo standard, soprattutto se tale profilo include fasi impegnative per il sistema d'accumulo, come può essere la carica rapida. Sulla base di queste motivazioni è stata proseguita la prova vita iniziata nella precedente annualità. Questo lavoro si aggiunge a diversi altri svolti dall'ENEA nella tematica delle prove vita su batterie, dapprima a riguardo degli accumulatori al piombo e, successivamente, al litio.

Il profilo di lavoro utilizzato per le prova vita relazionata in questo documento è compatibile con una tipologia di missione per minibus richiesta dal trasporto pubblico locale (TPL): nei pochi minuti di sosta al capolinea, il mezzo accumula la quantità di carica elettrica di cui necessita per eseguire il percorso di servizio. Il concetto di carica rapida considerato in questo ambito è diverso da quello legato in senso assoluto al valore della potenza o del tempo di carica: si tratta, infatti, di carica rapida legata alla missione del veicolo, in cui il mezzo in pochi minuti si carica parzialmente (20÷30%, quindi non si tratta di carica completa) della sola energia di cui ha bisogno per eseguire la missione.

2.3 Apparecchiature utilizzate

Le prove sono state condotte utilizzando dei convertitori AC/DC bidirezionali (ciclatori) in dotazione al Laboratorio Prova Batterie dell'Unità "Sistemi e Tecnologie per la Mobilità e l'Accumulo" dell'ENEA, sito presso il Centro Ricerche Casaccia. Esigenze tecniche e logistiche hanno reso necessario l'impiego di più ciclatori per coprire la durata dell'intera annualità.

Il ciclatore è un dispositivo elettronico in grado di eseguire fasi di carica e scarica del sistema d'accumulo in condizioni programmate (impostazione della modalità di carica/scarica, intensità della corrente, condizioni di fine fase) e controllate, comportandosi da alimentatore nelle fasi di carica e da carico in quelle di scarica. L'energia estratta dalle batterie durante le fasi di scarica viene immessa in rete. Un'immagine delle macchine utilizzate e le relative caratteristiche tecniche principali sono riportate rispettivamente in Figura 2 e Tabella 1.



Figura 2. Ciclatori utilizzati per l'esecuzione delle prove: E-8094 (sinistra), E-8376 (centro), E-8619 (destra)

In corrispondenza di ogni prova eseguita, il ciclatore rilascia un file di tipo .csv in cui sono riportati i valori (acquisiti e registrati) delle grandezze misurate durante l'esecuzione del test (Tabella 2).

La frequenza di acquisizione è impostabile durante la configurazione della prova, fino ad un valore massimo di 10 Hz. E' possibile impostare valori diversi del tempo di acquisizione in fasi diverse dello stesso profilo di lavoro.

Le prove sono state eseguite alla temperatura di +25 °C assicurata dal sistema di condizionamento installato nella sala prove dell'edificio.

Tabella 1. Caratteristiche tecniche principali dei ciclatori

Costruttore			Eltra Elettromeccanica S.r.l.		
Modello			E-8094	E-8376	E-8619
Tensione	Campo di lavoro "basso"	Nominale	3.6 ÷ 6 V	/	/
		Minima	2V	/	/
		Massima	8 V	/	/
	Campo di lavoro "alto"	Nominale	8 ÷ 36 V	6 ÷ 330 V	6 ÷ 560
		Minima	8 V	2 V	3 V
		Massima	60 V	400 V	600 V
Corrente	Minima		0 A	0 A	0 A
	Massima continuativa		±280 A	±400 A	±175 A
	Massima di picco per 1'		±400 A	±600 A	±250 A

Tabella 2. Stringa dei dati registrati dal ciclatore

Data ora	Ciclo	Fase	Micro ciclo	Tempo di fase	Tensione di pacco	Corrente	Capacità di fase	Energia di fase	Capacità totale caricata	Energia totale caricata	Capacità totale scaricata	Energia totale scaricata	Temp. K	Temp. Pt100
				[s]	[V]	[A]	[Ah]	[Wh]	[Ah]	[Wh]	[Ah]	[Wh]	[°C]	[°C]

La temperatura del campione durante la prova è stata misurata attraverso dei sensori NTC applicati sulle celle del modulo, un sensore per ogni cella. I valori misurati da questi sensori vengono inviati al Battery Management System (BMS) che li memorizza ed allo stesso tempo li gestisce per verificare che le temperature del modulo batterie si mantengano nel campo di funzionamento normale, attivando il sistema di ventilazione, se necessario. Inoltre, all'interno del modulo (nello spazio tra due celle, al centro) è stato inserito il sensore della termocoppia tipo K in dotazione al ciclatore, mentre l'altro sensore di temperatura, Pt100, di cui è corredato il ciclatore, è stato posizionato esternamente al modulo batterie ed in prossimità di esso, per registrare il valore della temperatura nell'ambiente di prova: la differenza tra i valori registrati dai due sensori permette di calcolare il riscaldamento che il modulo batterie subisce durante l'esecuzione del test.

2.4 Condizioni di prova

2.4.1 Grandezze misurate

Nel corso delle prove sono stati misurati e registrati i valori delle grandezze seguenti:

- Data ed ora (acquisita con il BMS e con il ciclatore)
- Tempo di prova (acquisito con il ciclatore)
- Tensione batteria (acquisita con il BMS e con il ciclatore)
- Tensione delle singole celle, identificazione della cella a tensione minima e di quella a tensione massima (acquisita con il BMS)
- Corrente batteria (acquisita con il BMS e con il ciclatore)
- Capacità (acquisita con il ciclatore)
- Energia (acquisita con il ciclatore)
- Temperatura dell'ambiente di prova (acquisita con il ciclatore)
- Temperatura all'interno del modulo batterie (acquisita con il ciclatore)
- Temperatura delle singole celle (acquisita con il BMS).

2.4.2 Frequenza di campionamento

I suddetti parametri sono stati misurati e registrati con un tempo di acquisizione variabile, a seconda dei casi, da 1 a 60 secondi. Il valore della frequenza di acquisizione è stato opportunamente scelto in modo da acquisire tutte le variazioni rilevanti e renderle disponibili per l'ulteriore elaborazione dei dati, senza compromettere eccessivamente la lunghezza del file di registrazione dati.

2.4.3 Accuratezza delle misure

Gli strumenti di misura dei ciclatori presentano i valori di precisione riportati in Tabella 3:

Tabella 3. Accuratezza di misura

Parametro	Accuratezza
Tensione	< 1% della lettura
Corrente	< 1% della lettura
Temperatura	$\pm 1^{\circ}\text{C}$

2.4.4 Tolleranze di prova

I ciclatori impiegati hanno le seguenti tolleranze di lavoro:

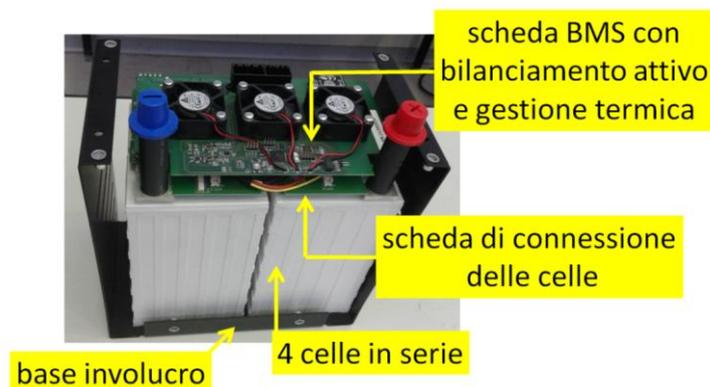
- Corrente
 - Durante la scarica e carica a corrente costante: $\pm 1\%$
 - Durante la scarica e carica a corrente variabile: $\pm 2\%$ ($\pm 4\%$ durante i primi 2 secondi)
- Tensione
 - Durante la carica a tensione costante: $\pm 1\%$

I valori percentuali sono riferiti ai valori impostati in ciascun regime di carica/scarica.

2.5 Modulo batterie

L'attività sperimentale della presente annualità è la prosecuzione di quella dell'annualità precedente. Pertanto, essa è stata svolta sul medesimo campione.

Il modulo batterie, rappresentato in Figura 3, è stato interamente sviluppato dal Laboratorio "Sistemi e Tecnologie per la Mobilità e l'Accumulo" dell'ENEA in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione dell'Università di Pisa, nell'ambito dei finanziamenti per la Ricerca di Sistema Elettrico (si vedano in bibliografia i riferimenti da [5] a [12]). Esso è costituito da 4 celle litio-ione con tecnologia catodica del tipo litio – ferro - fosfato (LFP), ciascuna avente tensione nominale 3.2 V - capacità 60 Ah, collegate in serie². Il modulo batterie risulta così avere tensione nominale 12.8 V e capacità 60 Ah.



² Sono 4 unità dello stesso tipo di quelle usate nella precedente annualità per la prova a livello di singola cella.

Figura 3. Modulo batterie litio-ione LFP 12.8 V – 60 Ah

Il collegamento di potenza tra le celle viene effettuato mediante barrette in alluminio giacenti su una scheda elettronica, detta “scheda di connessione”, Figura 4, che si fissa ai terminali delle celle. Una delle barrette è configurata come shunt, per consentire, oltre il collegamento tra le celle, anche la misura della corrente. La stessa scheda reca a bordo la sede per l’alloggiamento dei sensori per la misura della tensione di ognuna delle celle ed il posizionamento dei terminali utilizzati per il bilanciamento dello stato di carica delle celle.

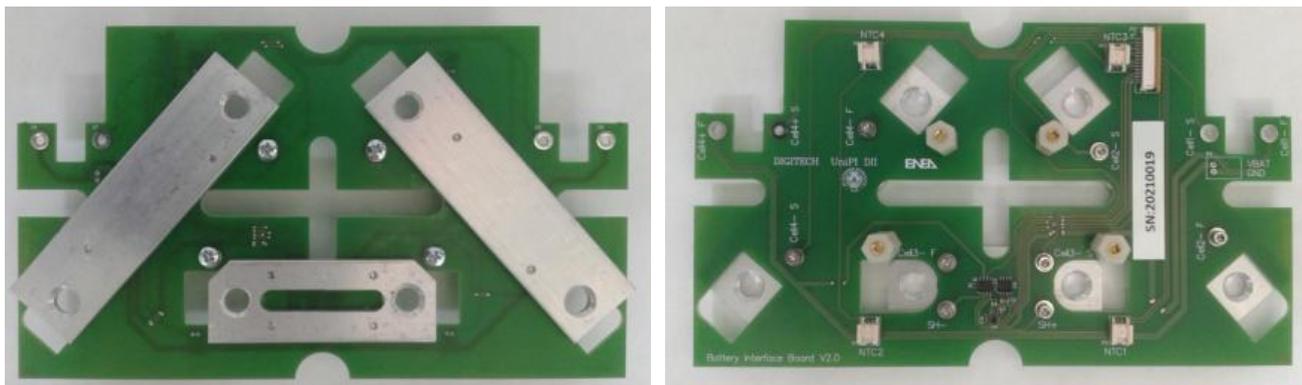


Figura 4. Scheda di connessione, faccia inferiore (lato celle, sinistra) e faccia superiore (destra)

Il controllo e la gestione del sistema batterie avviene tramite una scheda elettronica BMS “Battery Management System”, Figura 5, che esegue le funzioni di:

- monitoraggio (visualizzazione e registrazione dei valori) di tensione, temperatura, stato di carica delle singole celle,
- monitoraggio (visualizzazione e registrazione dei valori) di tensione e stato di carica del modulo batterie e della corrente che esso sta erogando/accumulando,
- protezione, a due livelli: 1) livello “alert”, cui corrisponde l’attivazione di un segnale di allarme (messaggio) al raggiungimento e permanenza per un tempo “Time Alarm On” delle condizioni di allarme (tensione/temperatura minima/massima delle celle, corrente massima di alert), 2) livello “error”, cui corrisponde l’apertura del contattore e conseguente disconnessione del modulo batterie dal ciclatore al raggiungimento delle condizioni di errore (tensione/temperatura minima/massima delle celle, corrente massima di errore),
- bilanciamento automatico delle celle alla fine della carica completa (selezionabile l’opzione bilanciamento dello stato di carica o bilanciamento con riferimento ai valori di tensione delle celle) di tipo attivo, mediante convertitore DC/DC che preleva energia dall’intero modulo e, attraverso una matrice di interruttori, la distribuisce alla cella di volta in volta più scarica, fino a raggiungere l’equalizzazione di tutte le celle,
- gestione termica mediante il comando di tre ventole, ciascuna da 12 V – 34.5 Nm³/h – 75.5 Pa @ 7000 giri/1’, che il BMS aziona, singolarmente o contemporaneamente, a seconda della necessità, quando i sensori di temperatura montati su ciascuna cella ed a bordo della scheda elettronica BMS stessa, rilevano il raggiungimento del valore massimo “T_CELL_FAN_ON” (su almeno una delle celle) o “T_BOARD_FAN_ON” (sulla scheda elettronica).

Il valore di “Time Alarm On”, delle soglie di “alert” ed “error”, e delle temperature di accensione delle ventole “T_CELL_FAN_ON” e “T_BOARD_FAN_ON”, sono impostabili (entro un certo range) in fase di configurazione. In tal modo l’utente ha a disposizione dei parametri per poter modulare il livello di protezione con cui intende operare, sia per l’esecuzione di test, sia in ambito applicativo. Per l’esecuzione della prova riportata nel presente documento, in coerenza con il profilo di lavoro che verrà mostrato più avanti, è stata utilizzata l’impostazione dei parametri configurabili riportata in Tabella 4.



Figura 5. Scheda elettronica BMS, lato superiore (sinistra) e lato inferiore (destra)

Tabella 4. Configurazione dei parametri del BMS

Condizione	Parametro	Funzione	Valore	Valore fornito dal costruttore delle celle
Allarme	TIME_ALARM_ON	Tempo di attivazione dello stato di "alert"	5 s	/
	V_MAX_ALERT	Allarme per tensione massima di cella	3.55 V	3.65 V
	V_MIN_ALERT	Allarme per tensione minima di cella	2.85 V	2.50 V
	T_MAX_ALERT	Allarme per temperatura massima di cella	+45 °C	+60 °C
	T_MIN_ALERT	Allarme per temperatura minima di cella	0 °C	-20 °C
	I_MAX_CHARGE_ALERT	Allarme per corrente massima in carica	190 A	>60 A
	I_MAX_DISCHARGE_ALERT	Allarme per corrente massima in scarica	70 A	>180 A
Errore	V_MAX_ERROR	Errore per tensione massima di cella	3.60 V	3.85 V
	V_MIN_ERROR	Errore per tensione minima di cella	2.80 V	2.00 V
	T_MAX_ERROR	Errore per temperatura massima di cella	+60 °C	+60 °C
	T_MIN_ERROR	Errore per tensione minima di cella	0 °C	-20 °C
	I_MAX_CHARGE_ERROR	Errore per corrente massima in carica	200 A	>60 A
	I_MAX_DISCHARGE_ERROR	Errore per corrente massima in scarica	80 A	>180 A
Accensione spegnimento ventole	T_CELL_FAN_ON	Temperatura di cella per accensione ventole	+ 35 °C	/
	T_CELL_FAN_OFF	Temperatura di cella per spegnimento ventole	+ 30 °C	/
	T_BOARD_FAN_ON	Temperatura sulla scheda per accensione ventole	+ 33 °C	/
	T_BOARD_FAN_OFF	Temperatura sulla scheda per spegnimento ventole	+ 30 °C	/

L'ultima colonna a destra riporta i valori limite delle varie grandezze forniti dal costruttore delle celle: come si vede, il BMS è impostato per poter lavorare ad un rate di corrente, 3C, ben superiore a quello consentito dal costruttore. Questa scelta è stata fatta per accentuare gli effetti della carica rapida.

La Figura 6 illustra la finestra di interfaccia del BMS, ove sono visibili i valori di tensione, temperatura e stato di carica delle singole celle, nonché la tensione totale, la corrente e lo stato di carica del modulo, lo stato del contattore, i messaggi di errore/allarme, lo stato dei ventilatori.

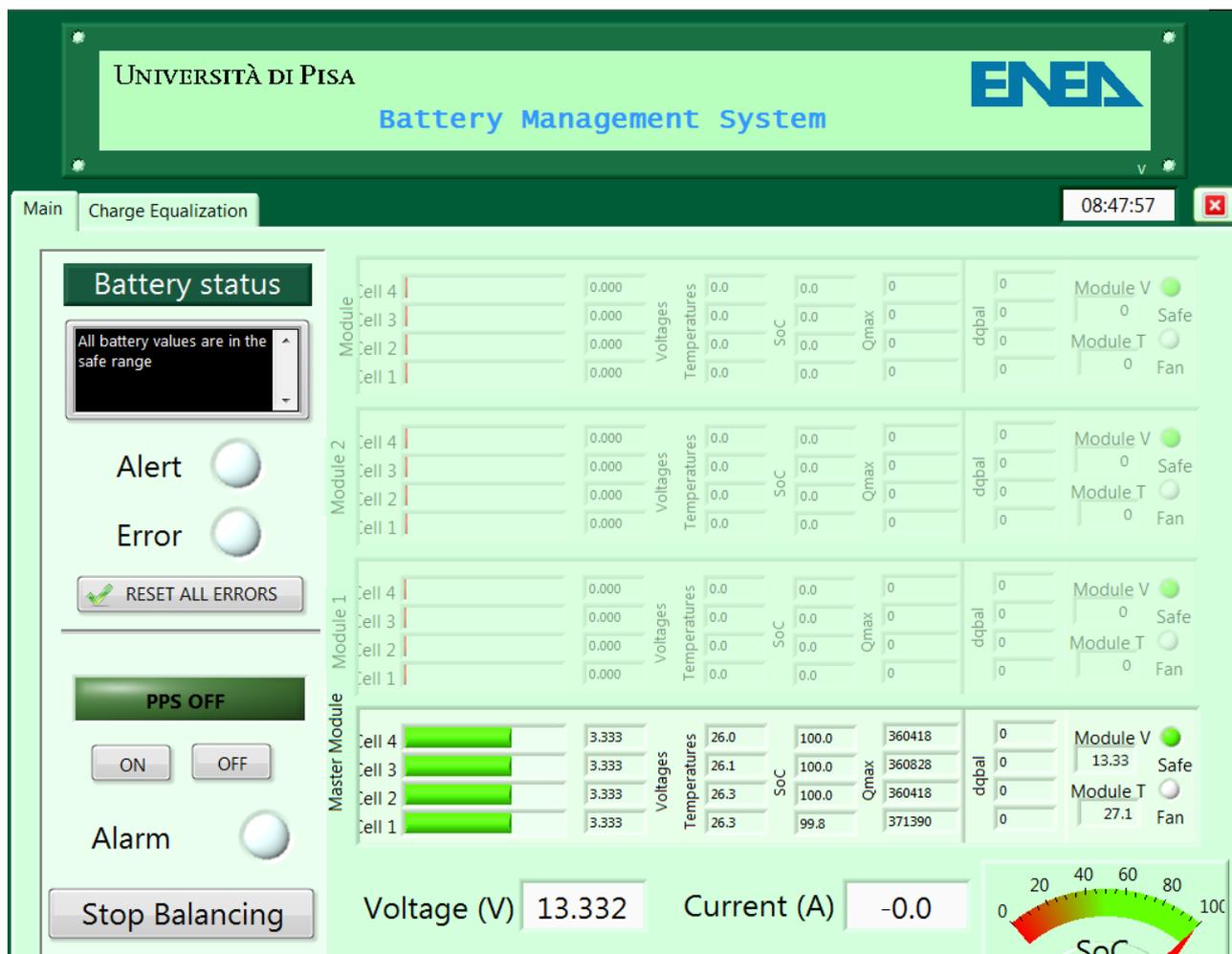


Figura 6. Interfaccia del BMS

I terminali del modulo batterie, realizzati come quelli delle batterie al piombo, sono montati direttamente sui poli delle celle che costituiscono l'inizio e la fine del collegamento in serie. L'insieme celle/schede viene collocato all'interno del case interponendo un pannello in neoprene alla base ed altri elementi (rigidi e semirigidi) all'interno che assolvono la funzione di bloccaggio in senso orizzontale (nelle due direzioni) e verticale. L'involucro è realizzato in lamiera di alluminio, anodizzata nera, spessa 2 mm, ed è costituito da due elementi a forma di U, che vanno a costituire rispettivamente la base ed il coperchio. Un doppio sistema di isolamento (cavo termo restringente più passacavi in gomma) ai terminali del modulo batterie, impedisce il corto circuito tra i terminali stessi tramite la lamiera del coperchio (seppur anodizzata). Per ulteriori informazioni e dettagli si rimanda ai report delle precedenti annualità della Ricerca di Sistema Elettrico [5] ÷ [12]. La Tabella 5 riporta le principali caratteristiche del modulo batterie, in base ai valori limite dichiarati dal costruttore delle celle.

Tabella 5. Principali caratteristiche del modulo batterie

Celle	Tipologia	LFP
	Numero	4
	Collegamento	serie
Capacità		60 Ah
Tensione	Nominale	12.80 V
	Minima	10.00 V
	Massima	14.60 V
Corrente max. continuativa	Scarica	180 A (3C)
	Carica	60 A (1C)
Temperatura di esercizio	Scarica	-20 ÷ +60°C
	Carica	0 ÷ +45°C

2.6 Profilo di prova

Il profilo di lavoro impostato al ciclatore per l'esecuzione della prova vita del modulo batterie è il seguente:

- Fase 0: stato di carica iniziale 100%.
- Fase 1: scarica a corrente costante di intensità 60 A (1C). Condizioni di fine fase: durata 900 s o raggiungimento della tensione minima di lavoro del modulo.
- Fase 2: pausa di durata 60 s.
- Fase 3: carica di tipo CC/CV costituita da una prima parte a corrente costante (fase CC) di intensità massima pari a 180 A (3C) fino al raggiungimento della tensione massima di lavoro del modulo, dopodiché mantenimento del valore di tensione e riduzione progressiva della corrente (fase CV). Condizioni di fine fase: durata 300 s.
- Fase 4: pausa, durata 60 s.
- Fase 5: ripetizione iterativa delle fasi da 1 a 4 per un periodo di tempo pari a 10 h (corrispondente a 30 ripetizioni/cicli) al giorno.
- Fase 6: carica lenta e completa notturna (carica standard, con bilanciamento delle celle) fino a ripristinare lo stato di carica iniziale 100%.

Tutto l'esercizio viene sorvegliato dal BMS il quale controlla che i parametri di tensione e temperatura della batteria (celle/modulo) rimangano nel campo di normale funzionamento ed interviene con apertura del contattore, e conseguente interruzione della prova, in caso di superamento dei limiti di errore prima definiti.

Nella Figura 7 il profilo di lavoro (fasi da 1 a 4) viene mostrato tramite un "print screen" del computer asservito al ciclatore, durante l'esecuzione della prova.



Figura 7. Profilo di lavoro utilizzato per la prova vita sul modulo

Come già evidenziato nella Tabella 4, la corrente massima continuativa in carica riportata nella specifica tecnica del Costruttore delle celle è 1C, mentre la fase di carica rapida utilizzata nel profilo di prova avviene ad un'intensità massima pari a 3C: ciò rende il modulo batterie impiegato particolarmente adatto ad evidenziare/esaltare le problematiche e gli effetti della carica rapida sui sistemi d'accumulo. Inoltre, il modulo batterie utilizzato per la prova vita è stato approntato con celle acquistate nelle precedenti annualità della Ricerca di Sistema Elettrico, e già sottoposte a cicli di caratterizzazione e profili di lavoro simili a quello attuale, anche se meno impegnativi in carica (C-rate massimo 1.5C): anche il fatto di utilizzare un modulo batterie non completamente nuovo, esalta ulteriormente gli effetti della carica rapida. La prova assume pertanto carattere conservativo.

2.6.1 Riscontro applicativo del profilo di lavoro adottato per l'esecuzione della prova vita

Nel report della precedente annualità, al quale si rimanda per i dettagli, è stata dimostrata la rispondenza del profilo di lavoro adottato per la prova vita con una tipologia di missione di trasporto pubblico locale. In sintesi, è possibile impostare un sistema di equazioni che, risolto prendendo a riferimento un minibus tipo il "Gulliver" della Tecnobus, i cui dati sono riportati in Tabella 6, ed una potenza di carica pari a 55 kW (valore tipico delle stazioni di carica in corrente continua) conduce ai risultati della Tabella 7.

Tabella 6. Dati di riferimento per minibus tipo "Gulliver"

Consumo chilometrico ³	500	Wh/Km
Velocità media	20	Km/h
Rendimento azionamento	0.8	



Tabella 7. Possibili missioni di trasporto pubblico locale

Numero di percorrenze orarie della tratta	Tempo di ciclo	Tempo di sosta	Tempo di marcia	Lunghezza della tratta
1	60'	13'	47'	15.73 km
2	30'	6.40'	23.60'	7.87 km
3	20'	4.27'	15.73'	5.24 km
4	15'	3.20'	11.80'	3.93 km

Fissato il numero di volte in cui si vuole percorrere la tratta in un'ora, la Tabella 7 definisce corrispondentemente il tempo di sosta, il tempo di marcia e la lunghezza della tratta.

La missione corrispondente alla terza riga, con 3 percorrenze orarie di una tratta di circa 5 km, ha una buona corrispondenza con il profilo di carica/scarica utilizzato per la prova vita. Infatti, nel profilo di lavoro utilizzato per la prova vita, i 15' di scarica simulano la marcia durante la quale il mezzo percorre la tratta su cui è in servizio sino ad arrivare al capolinea, il 1' di pausa dopo la scarica simula il collegamento alla struttura di carica, i 5' di carica simulano la carica rapida al capolinea (ripristino della quantità di carica necessaria a percorrere la tratta) ed il successivo 1' di pausa simula la disconnessione del veicolo dalla struttura di carica. Costruendo il sistema batterie del minibus attraverso uno schema modulare che impiega più unità del modulo come quello utilizzato per la prova vita (litio - ferro - fosfato 12.8 V_n - 60 Ah), si devono disporre i moduli a formare stringhe da 6 elementi in serie per raggiungere la tensione nominale di alimentazione del veicolo (72 V) e 4 stringhe in parallelo per soddisfare il valore della potenza di carica: in

³ Consumo chilometrico stimato per il minibus equipaggiato con 288 kg di batterie al litio (il mezzo nasce con 1'200 kg di batterie al piombo e consumo chilometrico 700 Wh/km).

tale configurazione, il sistema batterie è costituito da 24 moduli, ciascuno dei quali lavora ad un rate di corrente pari a 3C durante la fase di carica rapida.

Nell'ambito del "Progetto ENEA-CNR per lo sviluppo del tessuto produttivo del Mezzogiorno", il Laboratorio "Sistemi e Tecnologie per la Mobilità e l'Accumulo" dell'ENEA ha già realizzato (Figura 8) in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione dell'Università di Pisa, un siffatto sistema batterie: quest'ultima attività è stata concepita per studiare la realizzazione di sistemi complessi a partire da moduli standard (viene affrontata la problematica della connessione serie/parallelo dei moduli e dell'elettronica che gestisce i moduli stessi, singolarmente e nel loro insieme, con la questione del bilanciamento intra ed extra modulo, nella medesima stringa e tra stringhe diverse). Il sistema batterie è stato installato a bordo di un minibus "Gulliver" di proprietà del Centro Ricerche per il Trasporto e la Logistica dell'Università "La Sapienza" di Roma, è già in uso al banco a rulli e su percorsi interni al Centro Ricerche "Casaccia" dell'ENEA, e continuerà ad essere utilizzato per attività congiunte di ricerca e promozione industriale/commerciale. L'attività eseguita sul minibus è descritta in [13].

Il mezzo era originariamente equipaggiato con un sistema batterie al piombo 72 V – 585 Ah, che è stato sostituito dal sistema batterie al litio realizzato con le quattro stringhe di moduli standard 12 V, come dianzi spiegato. Il nuovo sistema batterie è alloggiato nei vani porta batterie del sistema precedente, due cassoni ciascuno dei quali contiene 2 stringhe (12 moduli), Figura 8.



Figura 8. Vano porta batteria completo di 12 moduli (sinistra) e sua installazione a bordo del minibus (destra)

3 Risultati

3.1 Riepilogo risultati della precedente annualità

La precedente annualità si era conclusa con l'esecuzione di 1'000 cicli di lavoro, a seguito dei quali il modulo batterie non ha mostrato un significativo decadimento delle prestazioni di capacità ed energia rilevate nei cicli standard di controllo periodici. La Figura 9, con la Tabella 8, illustrano la situazione finale della precedente annualità.

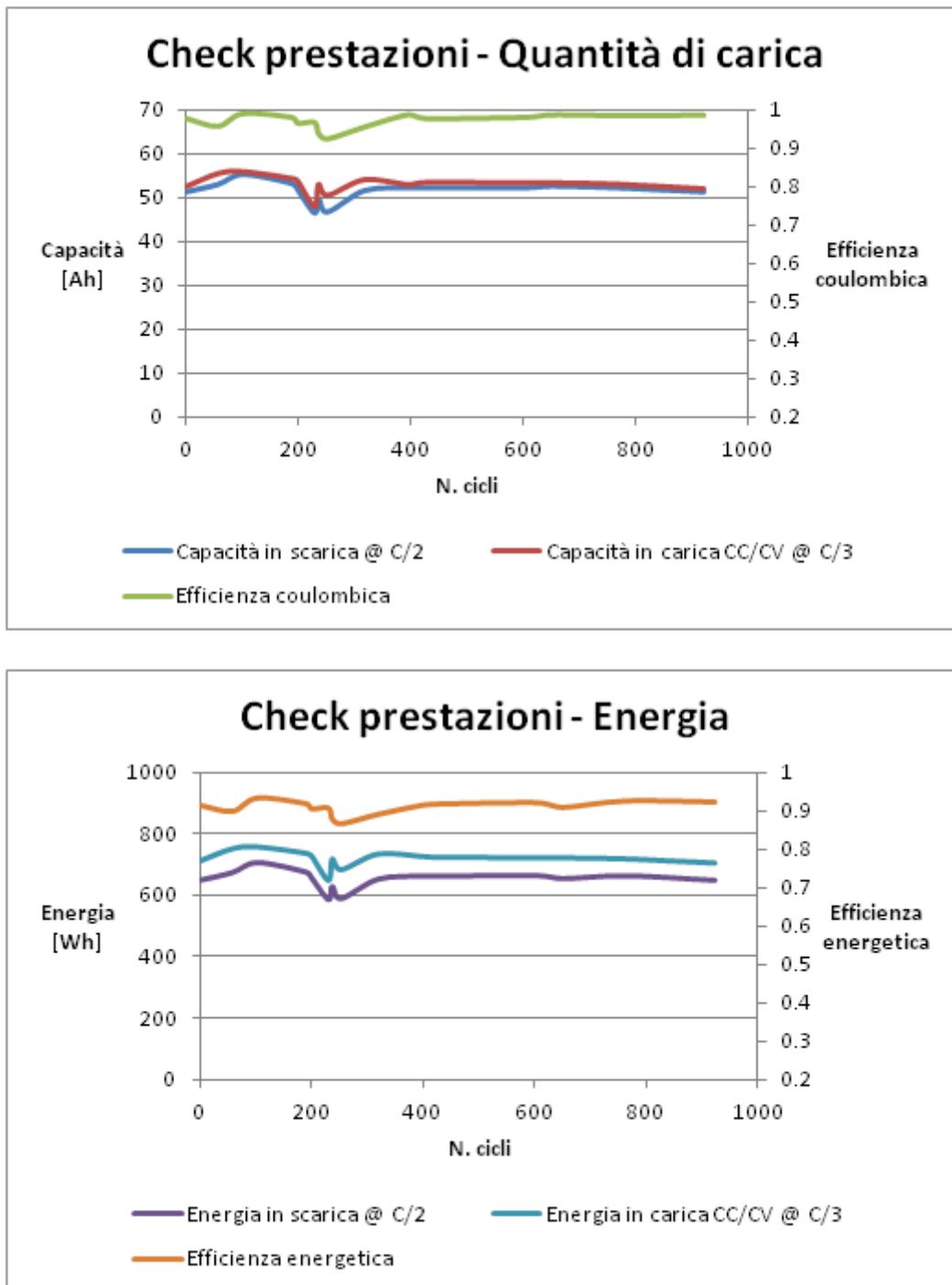


Figura 9. Check periodico delle prestazioni: capacità (alto) ed energia (basso)

Tabella 8. Check periodico delle prestazioni

N. cicli	Ah dsch	Ah ch	η_c	Wh dsch	Wh ch	η_e
0	51,349	52,620	0,975846	648,56	710,61	0,912681
57	53,063	55,582	0,95468	672,46	749,26	0,897499
102	55,398	56,068	0,98805	703,72	755,13	0,931919
189	53,285	54,485	0,977976	673,66	734,59	0,917056
199	51,874	53,9	0,962412	655,56	725,63	0,903436
229	46,415	48,091	0,965149	586,63	647,03	0,90665
236	49,705	53,126	0,935606	627,82	715,73	0,877174
252	46,685	50,657	0,92159	589,97	681,84	0,865262
318	51,65	54,205	0,952864	651,43	732,32	0,889543
396	52,314	53,079	0,985588	661,53	724,64	0,912908
426	52,278	53,604	0,975263	661,33	721,65	0,916414
604	52,317	53,483	0,978199	662,27	720,15	0,919628
648	52,669	53,491	0,984633	653,41	719,89	0,907653
761	52,311	53,21	0,983105	662,1	716,28	0,924359
921	51,346	52,181	0,983998	647,97	703,08	0,921616

3.2 Risultati della presente annualità

Nella presente annualità è stata proseguita l'esecuzione della prova vita sino a raggiungere 3'000 cicli.

3.2.1 Grandezze elettriche e termiche

Il modulo batterie ha proseguito nel dimostrarsi capace di eseguire il profilo di lavoro: non sono emerse deformazioni (rigonfiamenti) dell'involucro delle celle, tensione e temperatura sono rimaste nei limiti di normale funzionamento. La Figura 10 ne illustra l'andamento tipico per una giornata di lavoro, 30 cicli giornalieri corrispondenti a 10 ore di esercizio, ed il confronto con l'andamento corrispondente registrato ad inizio prova. Nella parte in alto a sinistra, si evidenzia l'intervento delle ventole al raggiungimento della temperatura "T_CELL_FAN_ON" (valore impostato +35 °C) ed il mantenimento della temperatura a circa +33 °C per tutto il periodo di funzionamento rappresentato. Per maggior chiarezza, gli andamenti tipici a fine prova delle medesime grandezze sono rappresentati separatamente in Figura 11.

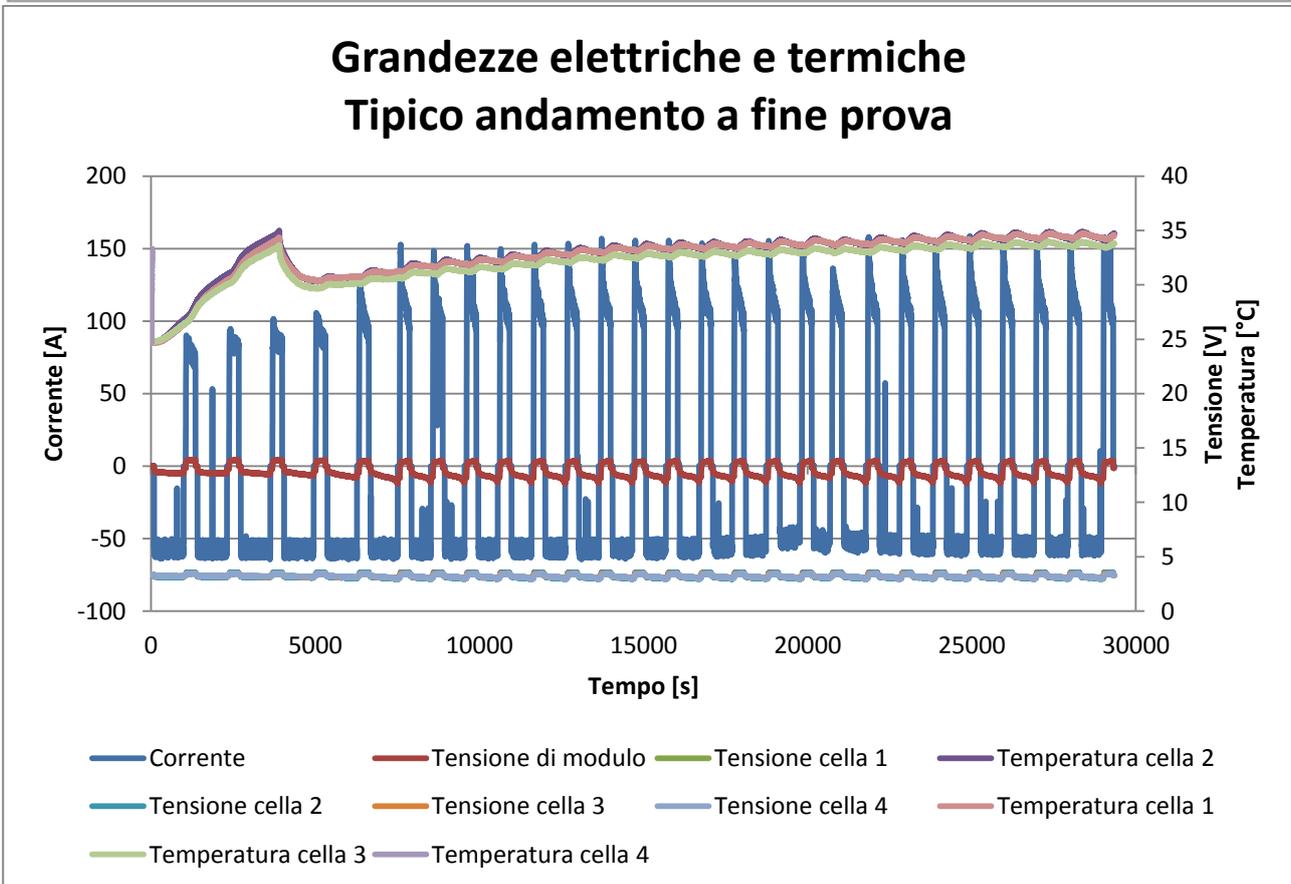
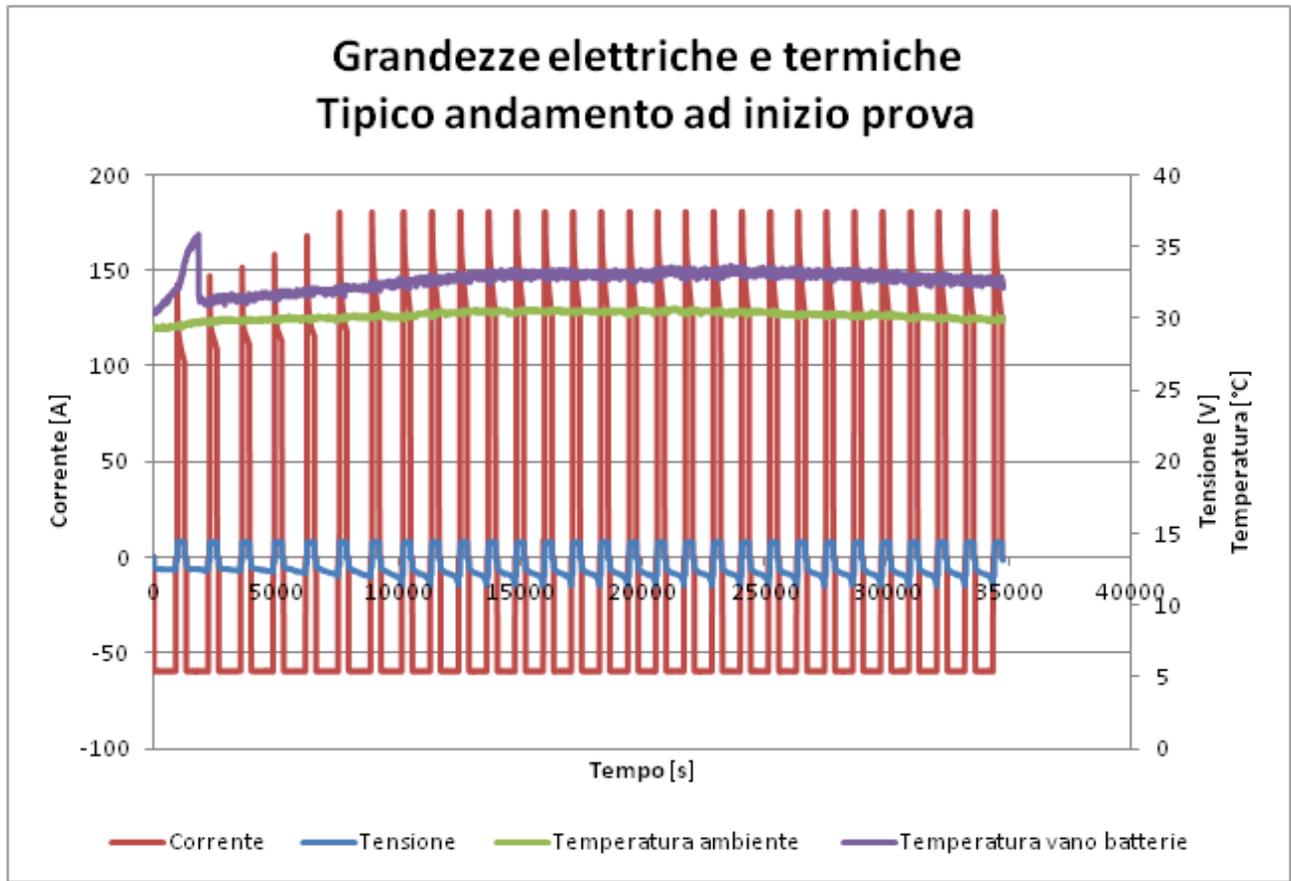


Figura 10. Andamento tipico delle grandezze elettriche e termiche durante la prova vita: situazione ad inizio prova (alto) ed a fine prova (basso)

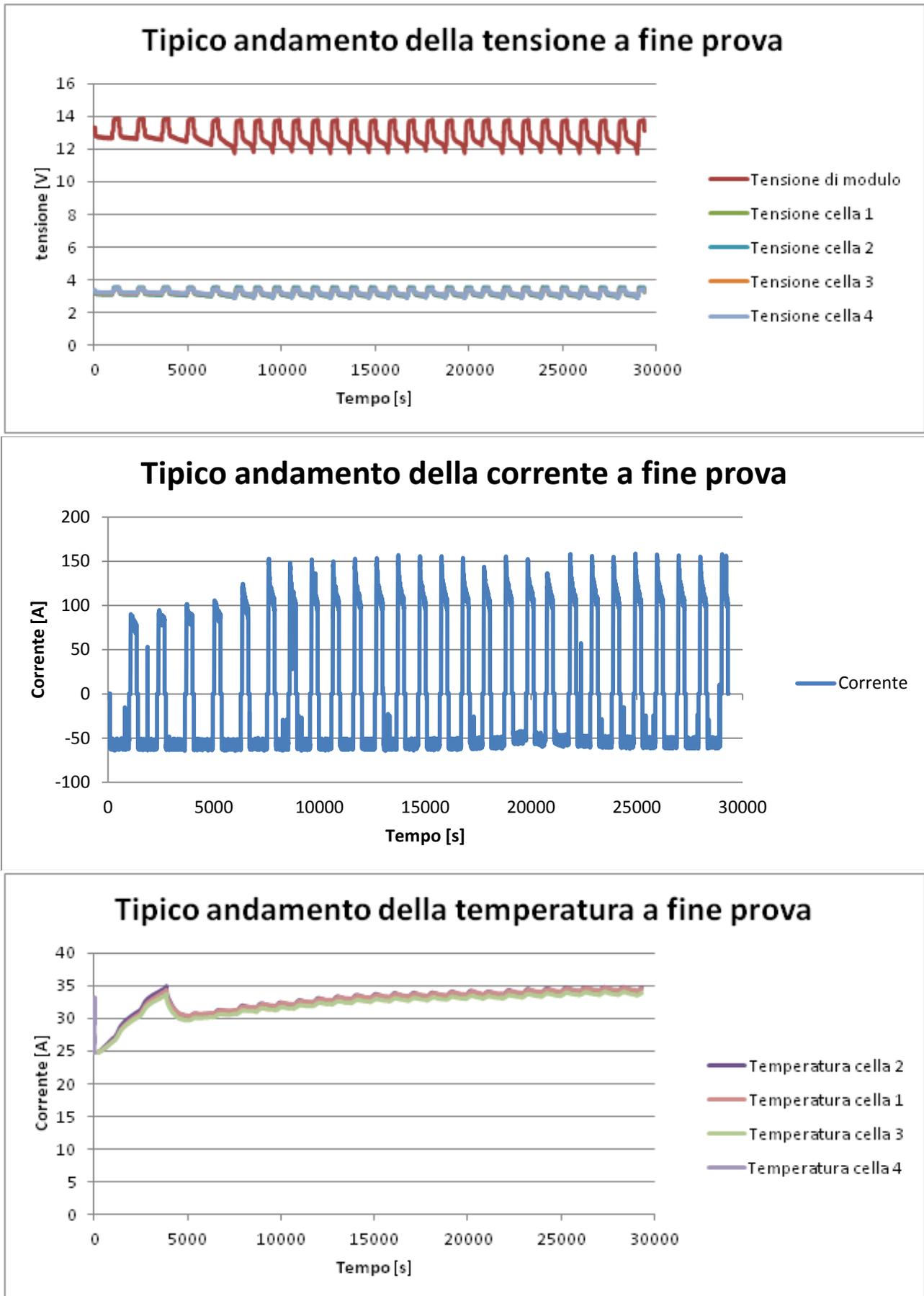


Figura 11. Andamento tipico della tensione (alto), corrente (centro) e temperatura (basso) a fine prova

3.2.2 Check periodico delle prestazioni di capacità ed energia

Il check delle prestazioni viene effettuato interrompendo periodicamente l’esecuzione iterativa del profilo di lavoro ed eseguendo dei cicli standard per la verifica dei valori di capacità/energia ed efficienza. Tale controllo ha mostrato che, nonostante siano stati eseguiti 3’000 cicli, in termini di capacità/energia non è emerso un decadimento significativo, come riportato in Tabella 9 e tradotto nei grafici delle Figure 12 e 13.

Tabella 9. Check periodico delle prestazioni

PAR	N. cicli totali	Valori rilevati nei check parametrici					
		Ah dsch	Ah ch	η_c	Wh dsch	Wh ch	η_e
2014	0	51.349	52.620	0.975846	648.56	710.61	0.912681
	57	53.063	55.582	0.95468	672.46	749.26	0.897499
	102	55.398	56.068	0.98805	703.72	755.13	0.931919
	189	53.285	54.485	0.977976	673.66	734.59	0.917056
	199	51.874	53.9	0.962412	655.56	725.63	0.903436
	229	46.415	48.091	0.965149	586.63	647.03	0.90665
	236	49.705	53.126	0.935606	627.82	715.73	0.877174
	252	46.685	50.657	0.92159	589.97	681.84	0.865262
	318	51.65	54.205	0.952864	651.43	732.32	0.889543
	396	52.314	53.079	0.985588	661.53	724.64	0.912908
	426	52.278	53.604	0.975263	661.33	721.65	0.916414
	604	52.317	53.483	0.978199	662.27	720.15	0.919628
	648	52.669	53.491	0.984633	653.41	719.89	0.907653
	761	52.311	53.21	0.983105	662.10	716.28	0.924359
	921	51,346	52,181	0,983998	647,97	703,08	0,921616
2015	990	50.515	51.863	0.974008	637.48	699.88	0.910842
	1023	51.893	53.162	0.97613	653.95	718.34	0.910363
	1031	51.724	52.981	0.976275	652.42	714.95	0.912539
	1486	52.299	55.241	0.946742	664.85	762.34	0.872117
	1778	52.239	52.828	0.988851	667.69	732.75	0.911211
	1834	51.744	52.599	0.983745	663.29	729.63	0.909077
	1842	51.346	52.206	0.983527	655.10	721.22	0.908322
	2030	51.293	51.916	0.988000	658.28	717.75	0.917144
	2272	50.572	51.444	0.98305	641.96	711.24	0.902593
	2365	50.172	52.395	0.957572	644.81	726.5	0.887557
	2463	50.441	51.375	0.98182	648.13	712.07	0.910205
3000	49.811	50.522	0.985927	635.05	695.70	0.912822	

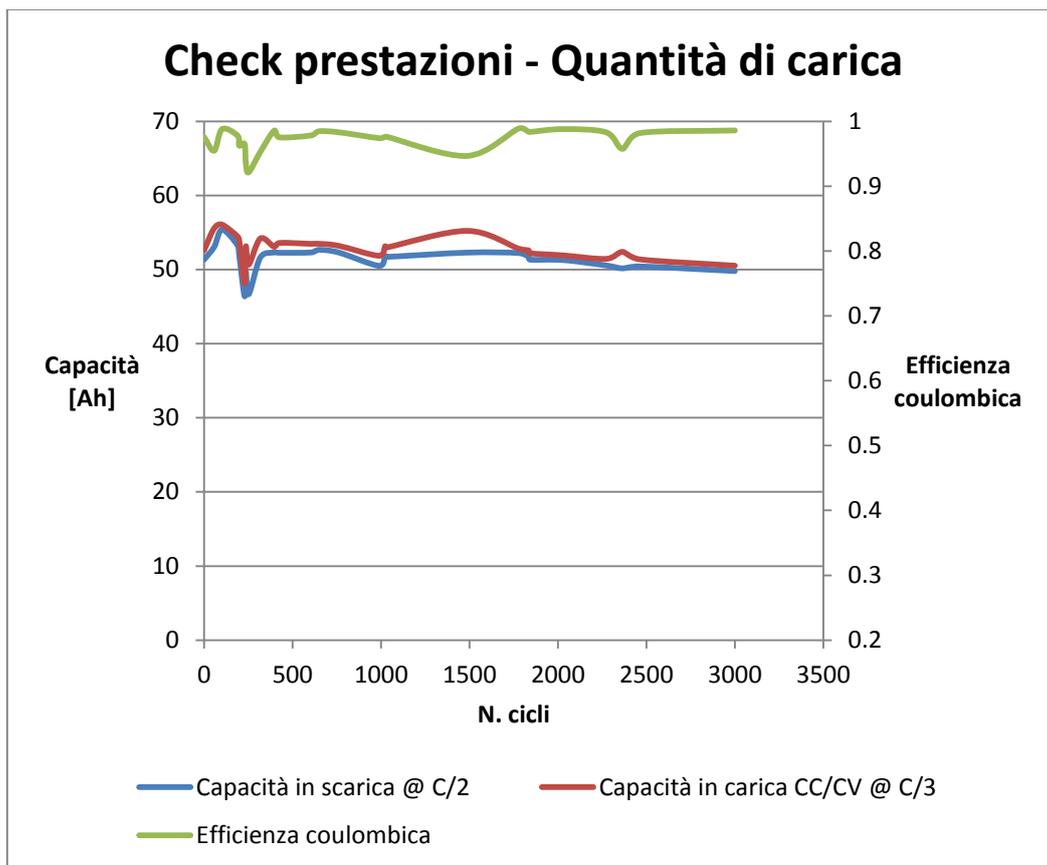


Figura 12. Check periodico delle prestazioni: capacità

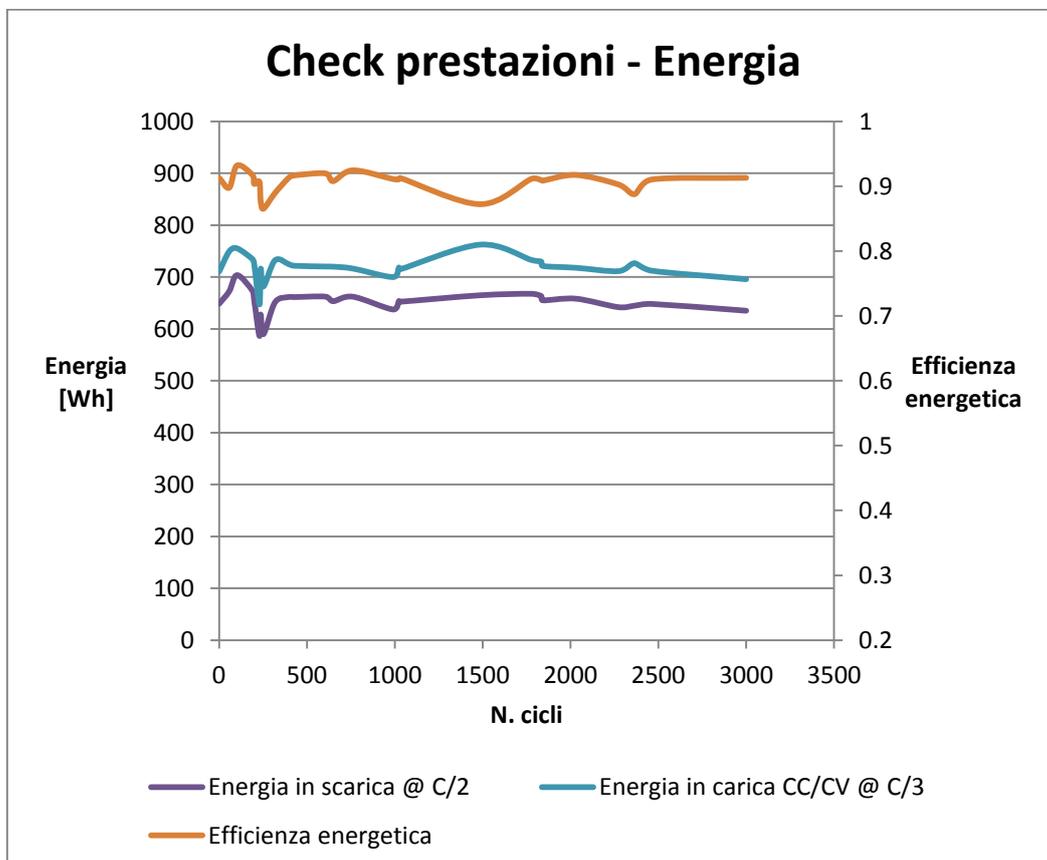


Figura 13. Check periodico delle prestazioni: energia

Le Figure 12 e 13 mostrano come, in termini di quantità di carica elettrica ed energia erogata nella fase di scarica del ciclo standard, le prestazioni siano ancora sui livelli misurati all'inizio della prova. Non c'è stato, pertanto, un decadimento significativo delle prestazioni, né rigonfiamento delle celle a testimoniare un disagio subito dalle stesse ad opera della carica rapida.

Tuttavia, invece, è stato registrato un aumento della resistenza interna, che si manifesta nella riduzione di durata della scarica (fase 2) e della corrente massima che il modulo è in grado di assorbire nella carica (fase 4, parte a corrente costante). La prosecuzione della prova ha richiesto, nel tempo, successivi aggiustamenti delle soglie di tensione impostate al ciclatore per evitare il raggiungimento del limite inferiore/superiore in scarica/carica. Tutto ciò si traduce nella riduzione della quantità di carica elettrica che il modulo è in grado di erogare/accumulare nell'esecuzione della procedura di prova e quindi, con riferimento alla missione corrispondente, nella progressiva riduzione di autonomia, che alla fine può condurre il minibus all'incapacità di compiere la percorrenza di servizio. Ciò vuol dire che la condizione di fine vita potrebbe raggiungersi non tanto per il decadimento periodico delle prestazioni di capacità/energia rilevate nei controlli periodici, quanto per incapacità di eseguire il profilo di lavoro a causa dell'aumento di resistenza interna.

3.2.3 Resistenza interna

Per meglio comprendere il comportamento del modulo batterie con il progredire della prova, è stato deciso di valutare come è variata la sua resistenza interna con l'aumentare del numero di cicli eseguiti. La misura rigorosa di questa grandezza (si veda ad esempio la procedura ISO 12405 "Electrically propelled road vehicles – Test specification for lithium-ion traction battery pack and systems") richiede l'applicazione di gradini di corrente in carica e scarica ed il calcolo del corrispondente rapporto tra la differenza di tensione e la corrente nell'intervallo di tempo pari a 0.1 s che segue l'applicazione/interruzione del gradino di corrente. Le caratteristiche tecniche dei ciclatori utilizzati per l'esecuzione della prova non consentono l'applicazione rigorosa di questa procedura⁴. Siccome non è tanto importante il valore della resistenza quanto la sua variazione, è stata considerata la resistenza calcolata in base alla differenza di tensione che si registra 60 s dopo l'applicazione della corrente di scarica (resistenza in scarica a 60 s, R_{60dsch}) e carica (resistenza in carica a 60 s, R_{60ch}) durante i cicli standard di controllo periodico delle prestazioni. La Tabella 10 e la Figura 14 mostrano i risultati ottenuti.

Seppur indicativo, il grafico mostra un significativo aumento (circa il raddoppio) della resistenza che si registra tra i 1'000 ed i 1'500 cicli. Oltre i valori della resistenza, nelle ultime colonne della tabella è riportata anche l'indicazione della variazione delle soglie V_{min}/V_{max} , resasi necessaria quando il modulo non riusciva ad eseguire completamente le fasi di scarica/carica del profilo di lavoro, e l'indicazione dei ciclatori utilizzati, in quanto anche la macchina utilizzata è una variabile che, entro certi termini, influenza la misura della resistenza. Il quadro che ne risulta è perciò indicativo, ma sufficiente per evidenziare un aumento della resistenza e quindi una progressiva perdita di abilità del modulo batterie ad eseguire il profilo di lavoro.

⁴ Il Laboratorio "Sistemi e Tecnologie per la Mobilità e l'Accumulo" dell'ENEA dispone di ciclatori ad alta velocità di commutazione carica/scarica ed alta frequenza di acquisizione dati, adatti alla misura rigorosa della resistenza interna ma vincoli tecnici ed esigenze logistiche hanno reso necessario riservare l'uso di tali macchine ad altri Progetti contemporaneamente in corso nel Laboratorio, per i quali era richiesta un'attività più prettamente di caratterizzazione piuttosto che una prova vita.

Tabella 10. Variazione della resistenza

N. cicli totali	R _{60 dsch} [mΩ]	R _{60ch} [mΩ]	V _{min} [V]	V _{max} [V]	Ciclatore
0	15.86	19.73	11.40	14.40	E-8094
57	12.81	18.54			
102	12.85	18.20		14.35	
189	13.82	21.22			
199	14.16	19.75			
229	15.27	18.75			
236	14.16	19.76			
252	14.87	19.69			
318	12.82	18.73			
396	14.17	17.75			
426	12.19	20.26			
604	13.92	20.19			
648	12.85	19.73			
761	13.83	20.93			
990	17.64	21.01		14.30	
1023	16.22	20.25			
1031	14.83	20.88			
1486	20.06	33.70	11.50		E-8619
1778	26.75	33.70			
1834	23.33	39.10			
1842	23.41	28.08	11.55		
2030	23.33	28.33	11.60	14.25 → 14.20 → 14.15	
2272	26.75	33.70			
2365	26.76	33.33			
2463	26.74	33.33			
3000	26.81	34.32			

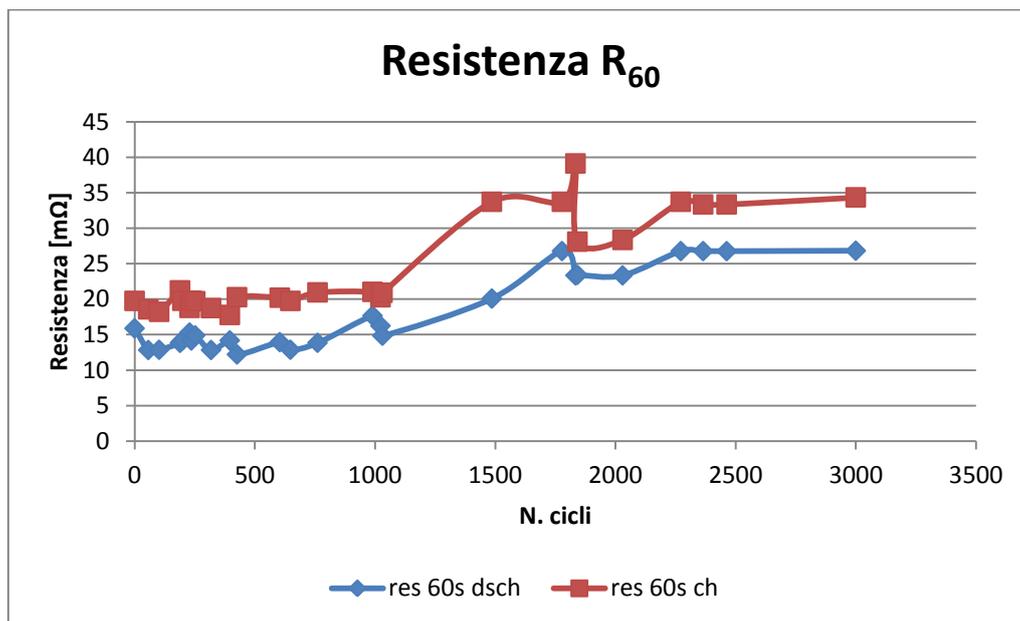


Figura 14. Diagramma di variazione della resistenza

3.2.4 Valore massimo della corrente di carica

Nell’esecuzione dei 30 cicli giornalieri, a partire dallo stato di modulo batterie completamente carico, il valore massimo della corrente durante la fase di carica aumenta con il numero delle iterazioni, fino a stabilizzarsi dopo poche ripetizioni del profilo di lavoro. La Tabella 11 e la Figura 15, che ne è la traduzione in forma grafica, illustrano i dettagli di questo comportamento ed il confronto tra la situazione ad inizio prova e quella a fine prova.

Tabella 11. Valore massimo della corrente in carica

N. ciclo	Corrente [A]	
	Inizio prova	Fine prova
1	142.4	94.1
2	146.95	97.8
3	151.41	103.8
4	158.22	113.4
5	167.99	127.6
6	180.22	156.3
7	178.31	152.3
8	180.23	155.9
9	180.2	153.5
10	180.34	158.5
11	180.44	160
12	179.97	159.7
13	180.45	159.5
14	180.27	159.5
15	180.27	155.8
16	180.13	151.6
17	180.38	159.1
18	180.26	161.7
19	180.19	161.2
20	180.54	160.7
21	180.28	161.5
22	180.25	158.7
23	180.16	162.9
24	180.23	162.1
25	180.29	160.4
26	180.24	160.7
27	180.30	162.2
28	180.28	162.1
29	180.29	162.7
30	180.30	162.9

A fine prova, il valore massimo della corrente di carica che il modulo batterie accetta a regime è più basso rispetto all’inizio, cioè il modulo batterie oppone maggiore resistenza a caricarsi e, corrispondentemente, il ciclatore (come la stazione di ricarica, il cui valore di corrente è pilotato dal BMS) eroga una corrente

inferiore per raggiungere, e non superare, il valore massimo della tensione di lavoro del modulo durante la fase di carica.

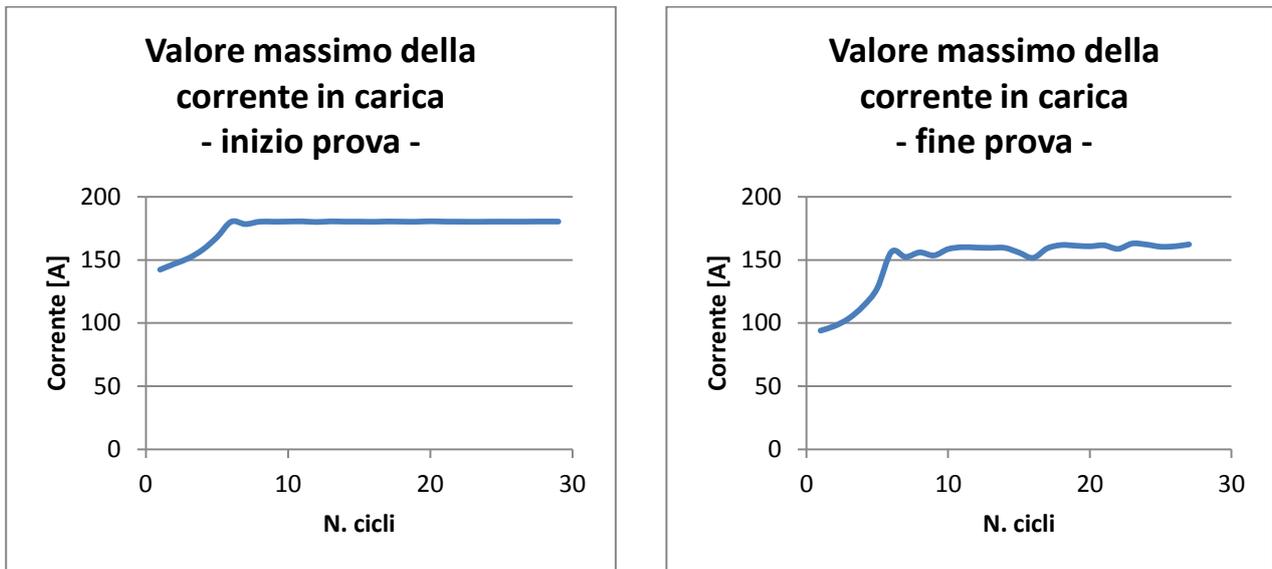


Figura 15. Valore massimo della corrente nella fase di carica

3.2.5 Variazione delle soglie di lavoro

Per consentire al modulo batterie di eseguire il profilo di lavoro senza raggiungere o superare la tensione massima/minima di errore per una o più celle, e conseguente interruzione prematura della fase di carica/scarica, è stato necessario, durante l'avanzamento della prova (ovvero al crescere del numero di cicli eseguiti e, quindi, dell'invecchiamento) modificare le soglie della tensione di lavoro in carica e/o scarica. La Tabella 12 mostra in dettaglio come sono state impostate le soglie di lavoro ad inizio della prova e come sono state modificate nel seguito. In particolare, è stata aumentato il valore della soglia di lavoro V_{min} del modulo batterie in scarica e diminuito il valore della soglia di lavoro V_{max} del modulo batterie in carica.

Tabella 12. Modifiche delle soglie di lavoro

Ciclatore	N. cicli	Soglia di lavoro in scarica V_{min}	Soglia di lavoro in carica V_{max}
E-8094	0	11.40	14.40
	84		14.35
	796		14.30
E-8376	1039	11.50	
E-8619	1841	11.55	
	1861		14.25
	1880	11.60	14.20
	1887		14.15

3.2.6 Equilibrio della quantità di carica elettrica

Quando si applica il profilo di lavoro giornaliero, partendo dallo stato di carica completa, il modulo batterie presenta inizialmente una certa riluttanza ad accettare la carica, e nei cicli iniziali il valore massimo della corrente che riesce ad assorbire durante la fase di carica rapida è inferiore a quello dei cicli successivi. Nella parte iniziale quindi, la quantità di carica erogata in scarica è maggiore di quella assorbita in carica ed il modulo va progressivamente riducendo la sua quantità di carica residua ma, mentre si scarica, diminuisce la sua riluttanza a caricarsi per cui il valore massimo della corrente massima in carica aumenta, fino a

stabilizzarsi in pochi cicli, come mostrato nella Tabella 11 e Figura 15. Il comportamento in scarica è complementare: inizialmente il modulo esegue completamente la scarica (parziale, 15 Ah) impostata ma, nelle iterazioni successive, mentre va scaricandosi, raggiunge la tensione minima di lavoro prima del limite di tempo impostato, per cui la durata della fase di scarica diminuisce leggermente con l'aumentare del numero di cicli. Parallelamente, la quantità di carica erogata nella fase di scarica decresce, mentre quella accumulata in carica aumenta, fino a che si raggiunge l'equilibrio della quantità di carica erogata/accumulata. Detto equilibrio si ottiene dopo circa 10 ripetizioni (cicli) del profilo ed in corrispondenza di un valore di SOC pari a circa il 30% rispetto allo stato di modulo batterie completamente carico. Da questo punto in poi il ciclo prosegue in equilibrio della quantità di carica ed il modulo batterie non si scarica più (in realtà si scarica lentamente in ragione dell'efficienza energetica del processo di carica/scarica). La Tabella 13 e la Figura 16 illustrano questo concetto e riportano il confronto tra la situazione tipica registrata ad inizio della prova, dopo 1'000, 2'000 e 3'000 cicli eseguiti. Si noti come evolve la situazione con l'aumentare del numero di cicli, e quindi con l'invecchiamento del modulo batterie: all'inizio delle prove, l'equilibrio della quantità di carica elettrica erogata/assorbita era caratterizzato dal valore 12 Ah, dopo 1'000 cicli il valore caratteristico di questo equilibrio era divenuto 11 Ah, per poi diminuire a 10 Ah dopo 2'000 cicli ed a 9.5 Ah dopo 3'000 cicli.

Tabella 13. Equilibrio della quantità di carica elettrica

N. ciclo giornaliero	Inizio prova		Dopo 1'000 cicli		Dopo 2'000 cicli		Dopo 3'000 cicli	
	Capacità dsch [Ah]	Capacità ch [Ah]						
1	14,894	9,236	14.874	7.380	14.985	6.909	14.977	6.688
2	14,896	9,653	14.866	7.910	14.994	7.344	14.982	6.999
3	14,897	9,779	14.862	8.155	14.998	7.641	14.9835	6.957
4	14,897	9,998	14.860	8.525	14.999	8.080	14.985	7.281
5	14,898	10,366	14.860	9.182	15.001	9.047	14.988	7.839
6	14,898	10,948	14.862	10.233	13.677	10.055	14.989	8.850
7	14,900	11,637	13.375	10.997	9.828	9.965	11.522	9.379
8	14,076	12,199	10.978	11.020	10.092	10.046	9.553	9.423
9	12,101	12,199	10.956	11.043	9.857	9.990	8.968	9.285
10	12,127	12,232	10.900	10.974	10.151	10.115	9.030	9.220
11	12,069	12,237	10.854	11.017	10.092	10.148	9.209	9.320
12	12,024	12,229	10.871	10.980	10.041	10.144	9.209	9.421
13	12,005	12,220	10.812	10.951	10.041	10.143	9.389	9.419
14	11,881	12,178	10.799	10.981	10.054	10.147	9.464	9.402
15	12,001	12,182	10.817	10.961	9.866	10.062	9.464	9.386
16	12,109	12,218	10.767	10.896	9.752	9.961	9.539	9.465
17	11,851	12,168	10.748	10.939	10.244	10.128	9.437	9.460
18	11,946	12,167	10.784	10.939	10.158	10.189	9.437	9.455
19	11,924	12,156	10.744	10.879	10.1335	10.183	9.336	9.437
20	12,020	12,174	10.720	10.923	10.1335	10.177	9.500	9.504
21	11,994	12,187	10.753	10.898	10.109	10.204	9.383	9.500
22	11,968	12,189	10.710	10.869	9.970	10.140	9.364	9.488
23	11,906	12,167	10.722	10.919	10.235	10.237	9.413	9.501
24	11,927	12,161	10.736	10.857	10.105	10.21	9.396	9.510
25	11,941	12,160	10.692	10.886	10.029	10.164	9.387	9.519
26	11,905	12,147	10.738	10.879	10.080	10.167	9.379	9.514
27	11,853	12,121	10.690	10.862	10.137	10.201	9.413	9.615

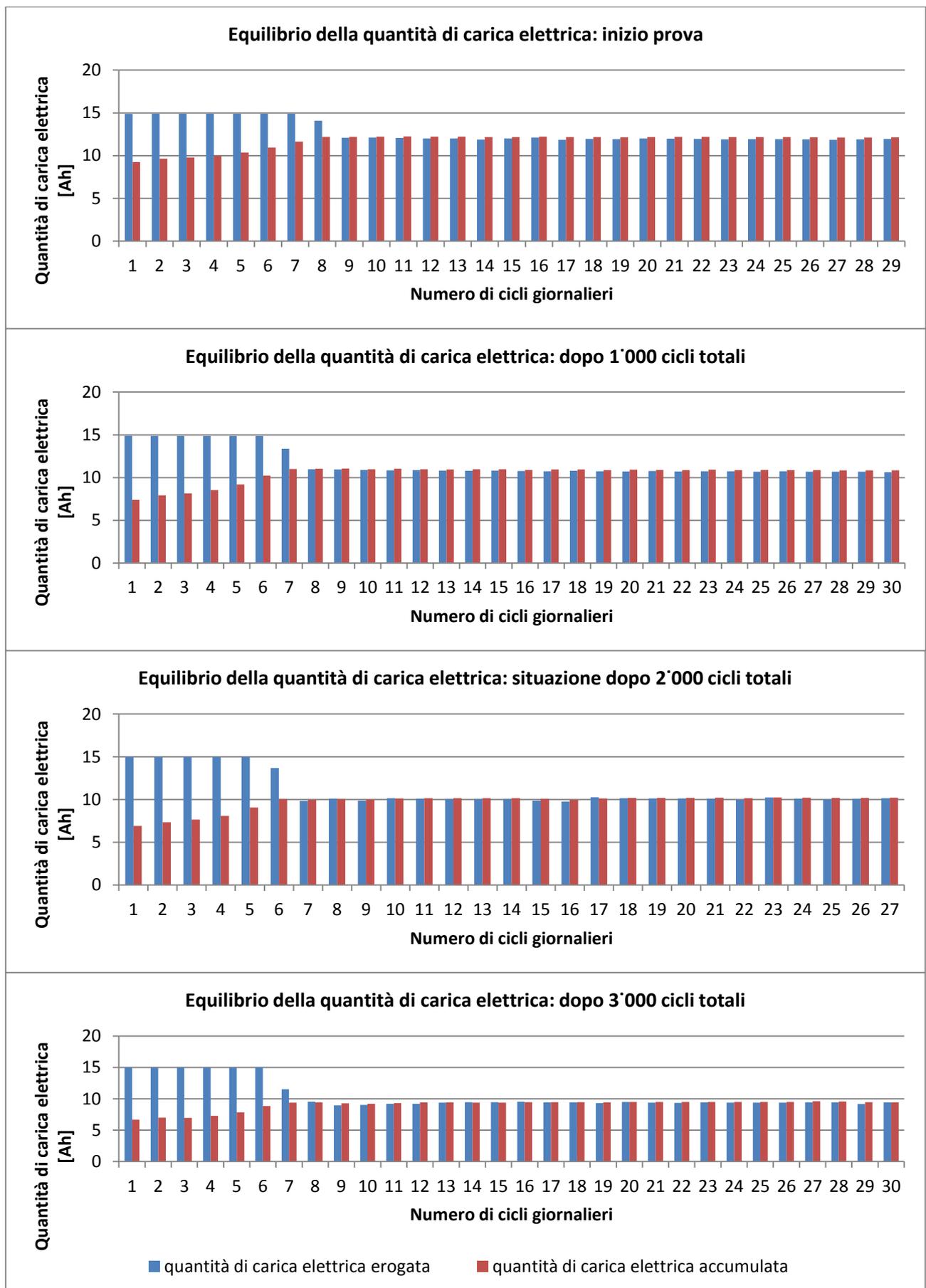


Figura 16. Equilibrio della quantità di carica elettrica

3.3 Previsione vita

In conformità alla Figura 16, la Tabella 14 riporta, in funzione del numero di cicli, la quantità di carica elettrica che il modulo batterie è in grado di erogare/accumulare a regime nella fase di scarica/carica della procedura di prova.

Tabella 14. Riduzione di autonomia

Capacità erogata/accumulata a regime nella fase 2/4 della procedura di prova	Numero di cicli totali eseguiti
12 Ah	0
11 Ah	1486
10 Ah	2030

Affinando il calcolo del consumo chilometrico come in Tabella 15, si può calcolare che la quantità di carica elettrica richiesta al modulo batterie nella fase di scarica della procedura di prova affinché, nella missione corrispondente, il minibus riesca a garantire la percorrenza dei 5 Km, è pari a 5.5 Ah: quindi, il mezzo riesce a garantire servizio di riga 3 Tabella 7, finché riesce ad erogare/assorbire una quantità di carica elettrica almeno pari ad 5.5 Ah.

Si noti che l'erogazione di 5.5 Ah in 15' corrisponde ad una corrente in scarica di 20 A: l'aver impostato la procedura di prova con una corrente in scarica di 60 A, cui corrispondono 15 Ah teorici, che nell'esercizio reale sono diventati 12 Ah e poi, col procedere dell'invecchiamento, 12 – 11 – 10 – 9.5 Ah (Tabella 13 e 14, Figura 16) significa che per tutta la durata della prova il modulo ha eseguito un servizio più impegnativo di quello strettamente richiesto. Ovvero, la prova vita è stata impostata ed eseguita in condizioni più gravose rispetto a quelle minime richieste.

La fine della vita del modulo batterie si raggiunge al verificarsi della prima tra le due condizioni seguenti:

- la capacità/energia erogata nei cicli standard di verifica periodica delle prestazioni è inferiore o uguale all'80% del valore iniziale, condizione classicamente assunta per decretare la fine del servizio per sistemi batterie ad uso veicolare,
- la capacità/energia erogata nella fase di scarica della procedura di prova è inferiore o uguale al valore minimo, 5.5 Ah, necessario per garantire il servizio nella missione di trasporto pubblico locale corrispondente.

Allo stato attuale, 3'000 cicli eseguiti, il modulo non ha raggiunto nessuna delle due condizioni di fine vita. A dire il vero, la prima delle due sembra lontana a realizzarsi giacché le prestazioni di capacità ed energia erogata nei cicli standard di verifica periodica delle prestazioni risultano ancora sui livelli misurati all'inizio della prova, mentre la seconda appare più prossima. Una stima della vita basata sulla riduzione progressiva di autonomia del minibus, realizzata usando i dati della Tabella 14 ed inserendo la linea di tendenza che meglio si adatta ai dati sperimentali (quella con il fattore R² più vicino ad 1) conduce, Figura 17, al valore di 6'754 cicli.

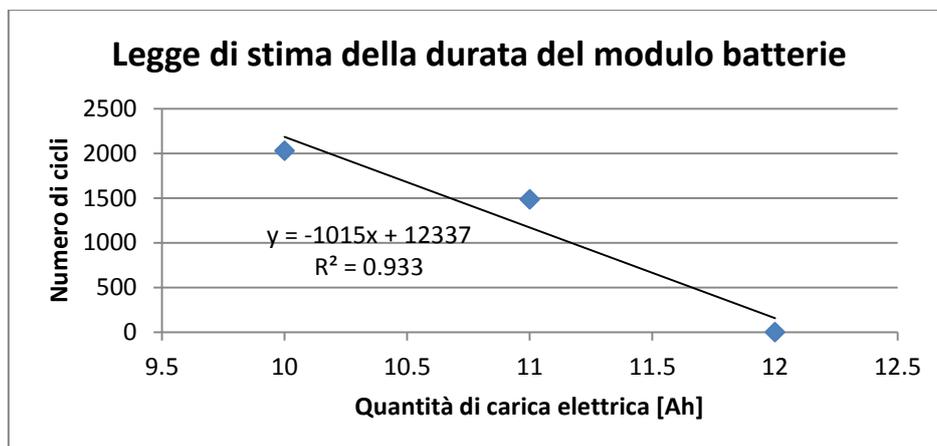


Figura 17. Legge di stima della durata del modulo batterie

3.4 Analisi dei costi a fine vita

Per valutare la fattibilità economica, oltre quella tecnica di cui ci si è occupati finora, si procede a confrontare il costo del sistema batterie a fine vita di un minibus, realizzato (i) con capacità ridotta e strategia di carica rapida, nei pochi minuti di sosta al capolinea, della sola quantità di energia necessaria per compiere il servizio (ii) con capacità maggiorata e, a parità di percorrenza giornaliera, sola carica lenta e completa a fine servizio. I relativi dati e risultati di calcolo sono presentati nella Tabella 15

Tabella 15. Costo di acquisto e durata di sistemi d'accumulo alternativi per minibus

	Caso (i) Ricarica rapida (3C) e frequente	Caso (ii) Ricarica lenta e notturna
Durata del servizio	16 h	16 h
Velocità commerciale	12 km/h	12 km/h
Duty cycle	75%	75%
Capacità SA	240 Ah	1'000 Ah
Peso SA	288 kg	1'200 kg
Consumo chilometrico	337 Wh/km	427 Wh/km
Consumo mensile	1'456 kWh	1'846 kWh
Vita del veicolo	12 anni	12 anni
Durata del SA	1'688 cicli (cicli equivalenti di scarica profonda)	1'800 cicli (cicli effettivi di scarica profonda)
Durata del SA	20 mesi	72 mesi
Costo di acquisto del SA	8'640 €	36'000 €

Il confronto è basato su un servizio di riferimento di 16 h lavorative (2 turni da 8 ore) ed una velocità commerciale di 12 km/h.

Considerando un duty cycle del 75% (15' di carica e 45' di marcia nell'ora di servizio) il minibus del caso (i) (carica rapida) percorre 144 km in un giorno. La medesima percorrenza viene assegnata al minibus del caso (ii) (carica lenta).

Come mostrato in precedenza, la capacità del sistema d'accumulo nel caso (i) (carica rapida) è pari a 240 Ah. Nel caso (ii) (carica lenta), è possibile effettuare un calcolo di massima della taglia del sistema batterie mediante il prodotto del consumo chilometrico (500 Wh/km) per la percorrenza giornaliera e dividendo per la tensione nominale.

Un affinamento del valore di consumo chilometrico può essere ottenuto dal dato di partenza, dividendolo per il peso complessivo e moltiplicando, successivamente, per il solo peso della batteria (considerati 15 passeggeri a pieno carico ed un fattore di occupazione media dell'autobus pari al 30%).

Il peso del sistema d'accumulo si ottiene dal prodotto del peso del singolo modulo batterie, 12 kg, per il numero di moduli che è necessario impiegare per ottenere i valori di tensione e capacità del rispettivo caso. Il prodotto del consumo chilometrico per la percorrenza giornaliera ed il numero di giorni in un mese, consente di calcolare il consumo energetico mensile.

In conformità con i valori tipici forniti dalla letteratura scientifica specialistica, la vita del veicolo viene considerata pari a 12 anni.

Nel caso (ii) (carica lenta), ove il ciclo di lavoro si configura praticamente come un ciclo standard, in cui il mezzo effettua la percorrenza giornaliera consumando tutta la capacità installata nel sistema d'accumulo e si ricarica lentamente e completamente durante la pausa notturna, la durata delle batterie si può stimare con buona approssimazione dal valore di durata (riducendolo opportunamente) fornito dal costruttore delle celle con riferimento al ciclo standard. Nel caso (i) (carica rapida), invece, si può utilizzare il risultato della prova vita oggetto del presente documento: considerando che la fase di scarica della procedura di prova vita sottrae teoricamente 15 Ah, cioè $\frac{1}{4}$ della capacità nominale del modulo batterie, 4 cicli della procedura corrispondono ad una scarica completa, cioè ad un ciclo con scarica profonda. Quindi, in prima

approssimazione, la durata in cicli di scarica profonda, equivalenti a quelli reali, si può ottenere dividendo per 4 il numero di cicli ottenuti dalla prova vita con scarica parziale.

Per il caso (ii) (carica lenta), la trasformazione della durata da numero di cicli a numero di mesi è immediata, considerando che un ciclo di scarica profonda corrisponde ad un giorno e che l'anno lavorativo è composto da 300 giorni. Nel caso (i) (carica rapida), invece, occorre trasformare il numero di cicli equivalenti in km, attraverso il contenuto energetico nominale del sistema d'accumulo ed il consumo chilometrico, e questi ultimi in numero di mesi, attraverso la percorrenza giornaliera.

Infine, il costo di acquisto del sistema d'accumulo è dato dal prodotto del costo unitario, valutato in 500 €/kWh, per il valore di energia nominale del sistema stesso.

A questo punto è possibile calcolare, nell'arco della vita del minibus, quante volte ciascun sistema batterie viene sostituito, e riportare in un diagramma i costi totali, somma dei costi d'acquisto, attualizzati, e dei costi per la ricarica, per semplicità non attualizzati, calcolabili come prodotto del costo del kWh, assunto come valore medio 0.15 €, per il consumo energetico mensile. Il grafico finale è riportato in Figura 18.

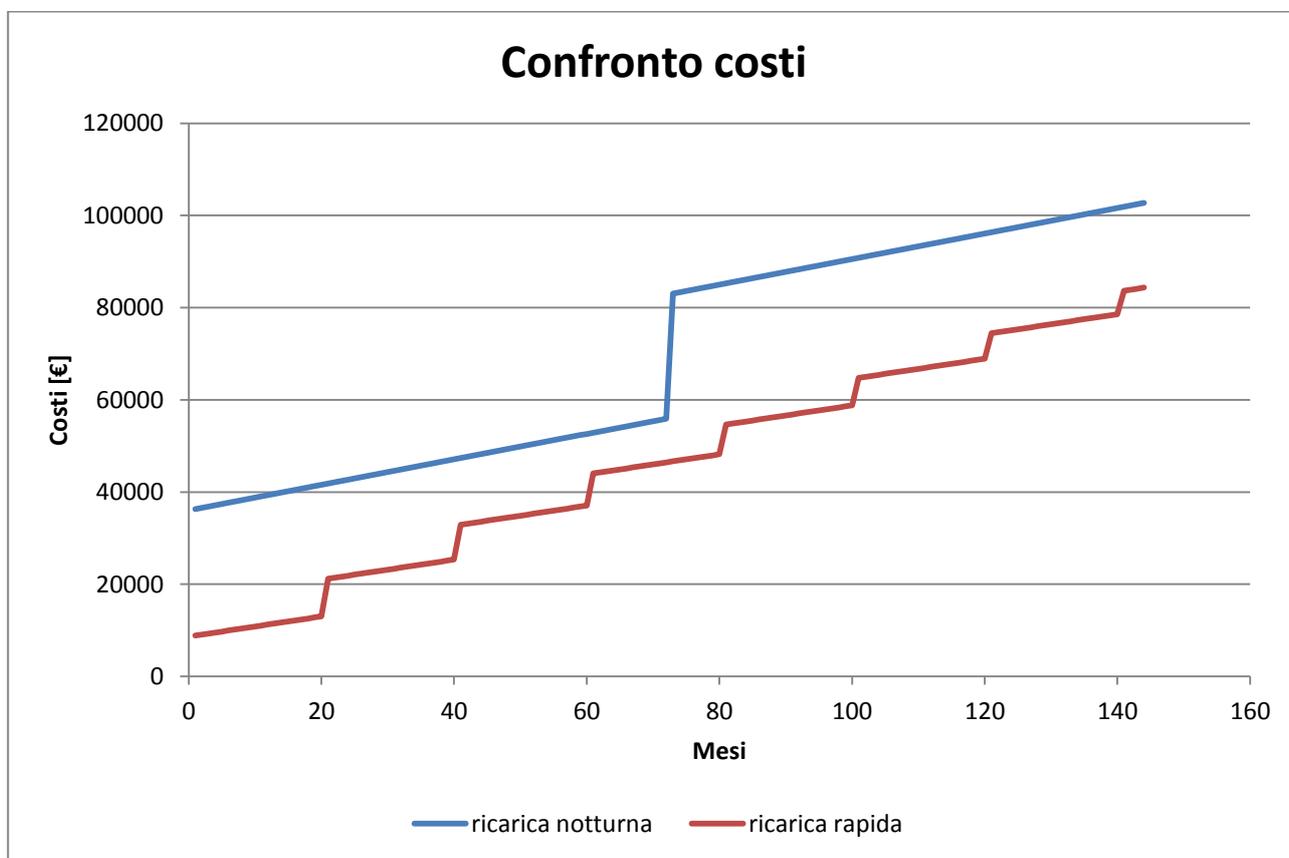


Figura 18. Analisi dei costi a fine vita del sistema batterie per minibus

Il costo totale della soluzione con batteria ridotta e carica rapida parziale è sempre al di sotto di quello della soluzione con batteria maggiorata e carica lenta completa, per tutta la durata di vita del minibus

3.5 Riscontri applicativi: ulteriore indagine per missione con tempi di carica/scarica raddoppiati

La prova vita viene eseguita con 30 cicli/rotazioni al giorno, corrispondenti ad una percorrenza di 150 km in 10 ore. Dopo aver eseguito 2'300 cicli/rotazioni, la prova è stata temporaneamente sospesa per una settimana e, come ulteriore indagine, è stata verificata la capacità del modulo batterie di compiere, a tale stato d'invecchiamento, una missione/profilo di lavoro con tempi di carica/scarica doppi rispetto a quelli

della procedura precedente. Sono stati eseguiti 100 cicli secondo il nuovo profilo, nel seguito vengono illustrati i risultati ottenuti.

3.5.1 Profilo impostato al ciclatore

- Scarica a corrente costante 60 A, fino al raggiungimento della prima condizione tra le seguenti: tempo 1800 s o tensione minima; la fase corrisponde alla marcia del mezzo, per ½ h.
- Pausa 60 s; corrisponde all'avvicinamento alla stazione ed al sollevamento del pantografo.
- Carica a corrente costante, valore massimo 180 A, fino al raggiungimento della tensione massima consentita, quindi mantenimento del valore di tensione e riduzione progressiva della corrente fino al raggiungimento della condizione di fine fase: tempo 600 s; corrisponde alla ricarica rapida (rate 3C) e teoricamente riporta la batteria alle condizioni iniziali.
- Pausa 60 s; sollevamento del pantografo e ripartenza.
- Esecuzione iterativa del profilo sopra definito.
- Ricarica standard notturna.

La prova secondo il profilo così modificato ha comportato l'esecuzione di 20 cicli al giorno, ovvero 20 rotazioni dell'autobus di linea al giorno, corrispondenti ad una percorrenza totale di 200 km in 10 ore.

3.5.2 Comportamento del modulo

Il modulo batterie è rimasto regolarmente in esercizio senza incorrere in interruzioni per raggiungimento dei limiti di sicurezza: tensione, corrente e temperatura sono rimasti negli intervalli di funzionamento normale. La Figura 19 illustra l'andamento tipico sui 20 cicli giornalieri (10 ore di funzionamento). La prova è stata realizzata in ambiente mantenuto alla temperatura di 25 °C.

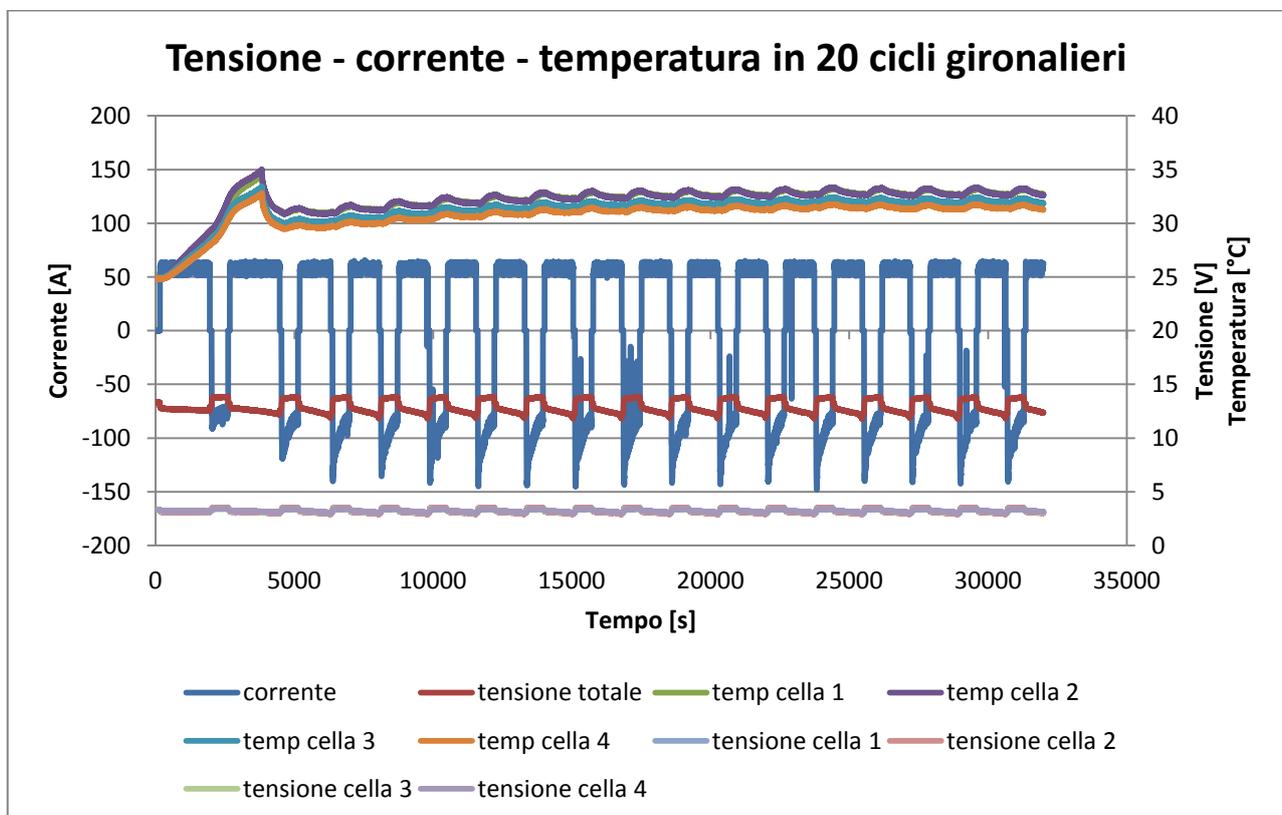


Figura 19. Andamento tipico delle grandezze elettriche e termiche

Per maggior chiarezza, in Figura 20 è anche riportato il diagramma della corrente e della tensione, per i 20 cicli giornalieri e per il singolo ciclo a regime.

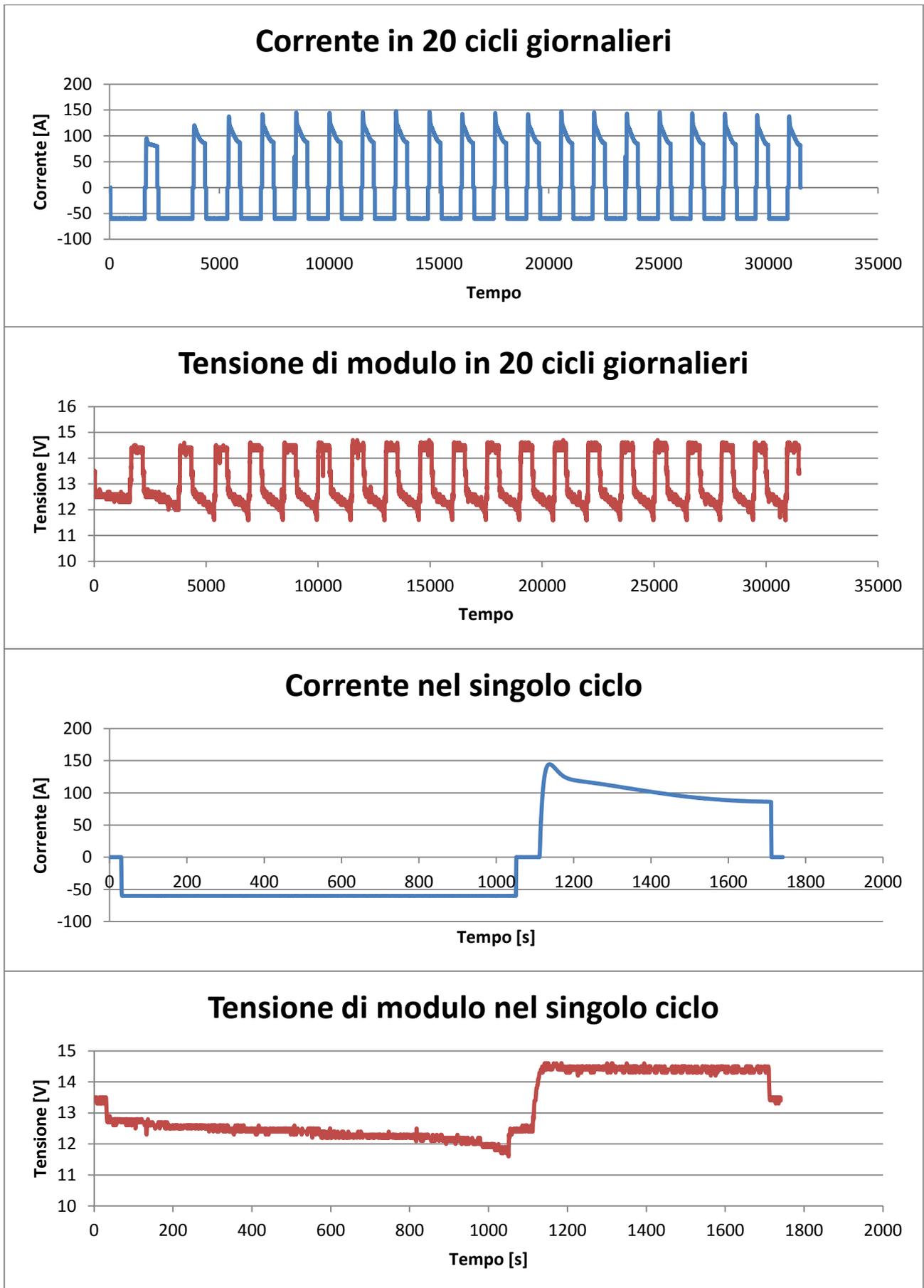


Figura 20. Andamento tipico di corrente e tensione

3.5.3 Prestazioni

La prova è stata condotta a partire dallo stato di modulo batterie completamente carico. Nei cicli iniziali, il modulo batterie eroga la quantità di carica elettrica (30 Ah) prevista. Tuttavia, nella fase di carica rapida, la limitazione della corrente operata dal ciclatore (leggasi colonna di ricarica) per evitare il superamento della soglia superiore di tensione, impedisce al modulo di accumulare la quantità di carica erogata e quindi esso tende a scaricarsi. Nei cicli successivi, il modulo batterie risulta limitato nella scarica a causa del raggiungimento della tensione minima di lavoro. Parallelamente, essendo più scarico, aumenta la sua attitudine ad accettare la carica (pur sempre limitata per impedire il raggiungimento delle condizioni limite) e quindi, con l'aumentare del numero di cicli, aumenta la quantità di carica elettrica che viene accumulata. Così procedendo, si raggiunge un equilibrio tra la quantità di carica elettrica accumulata e quella scaricata, con il quale il modulo batterie lavorerebbe teoricamente senza limiti di tempo. La Figura 21 illustra questa situazione.

L'equilibrio si raggiunge intorno ad un valore della quantità di carica erogata/accumulata pari a 17 Ah, ogni ½ ora di marcia. Tale valore, considerato che nel minibus sono installati 24 moduli, corrisponde a 5 kWh, circa 10 km con riferimento al consumo di 500 Wh/km. Poiché il ciclo effettivo a regime dura 2520", la velocità "commerciale" sarebbe di 16 km/h, corrispondente a quella di un autobus in servizio urbano. La percorrenza giornaliera equivalente della prova effettuata (aumentabile a piacere, nei limiti delle 16 ore di durata giornaliera del servizio) è di 150-200 km, che è il limite degli attuali bus elettrici con ricarica notturna; grazie all'impiego del litio, il peso della batteria si ridurrebbe dell'80% rispetto all'uso di accumulatori al piombo.

La finestra dello stato di carica in cui si opera è, a regime, 10 ÷ 40%, vedere la Figura 22 e la Tabella 17.

3.5.4 Caratterizzazione prima e dopo l'esecuzione della prova

Nella caratterizzazione, effettuata mediante cicli standard prima e dopo l'esecuzione dei 100 cicli di lavoro, non sono state registrate variazioni significative di capacità, come illustra la Tabella 16.

Tabella 16. Decadimento delle prestazioni di capacità/energia

	Capacità erogata	Energia erogata	Capacità accumulata	Energia accumulata	η_c	η_e
Caratterizzazione prima della prova	50.572 Ah	641.96 Wh	51.444 Ah	711.24 Wh	0.98	0.90
Caratterizzazione dopo la prova	50.172 Ah	644.81 Wh	52.395 Ah	726.50 Wh	0.95	0.89

La prova ha avuto esito positivo.

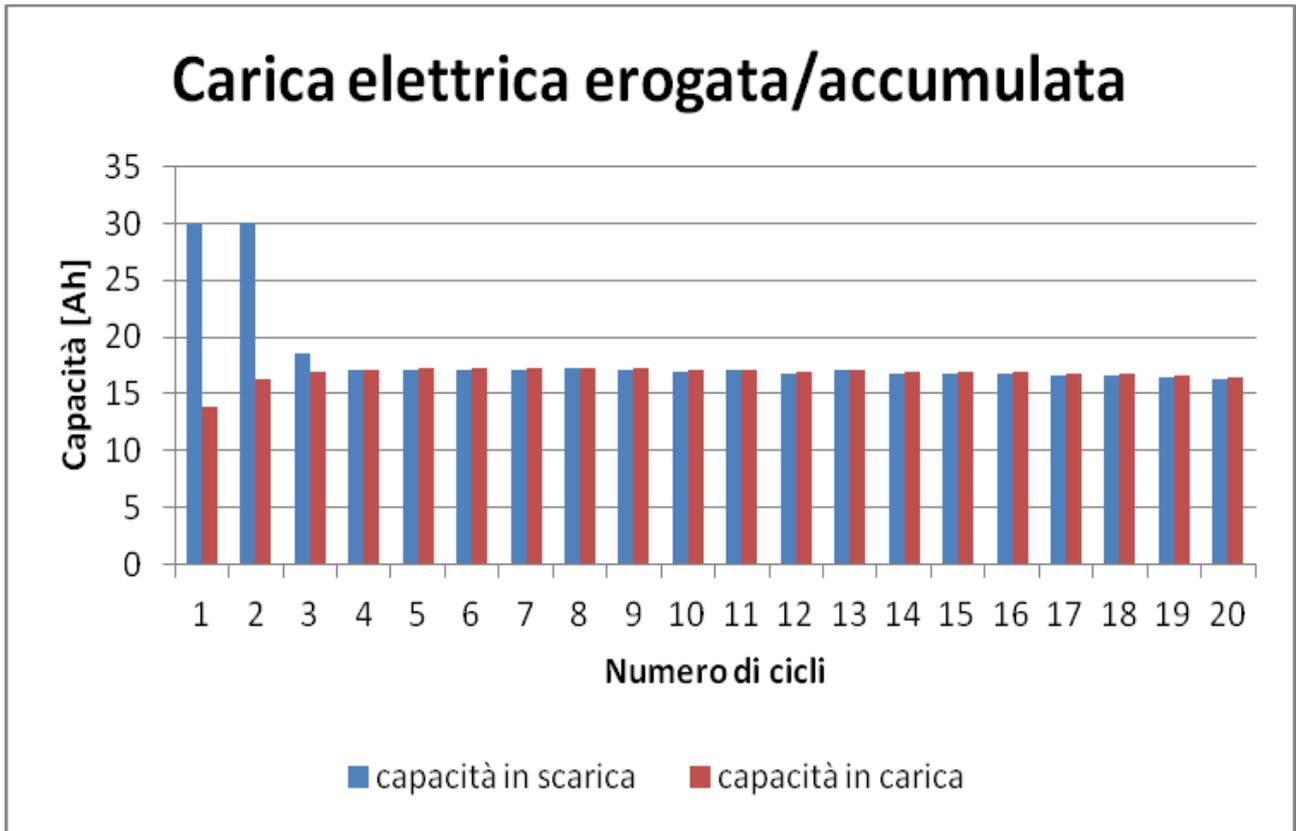


Figura 21. Andamento della quantità di carica elettrica erogata/accumulata

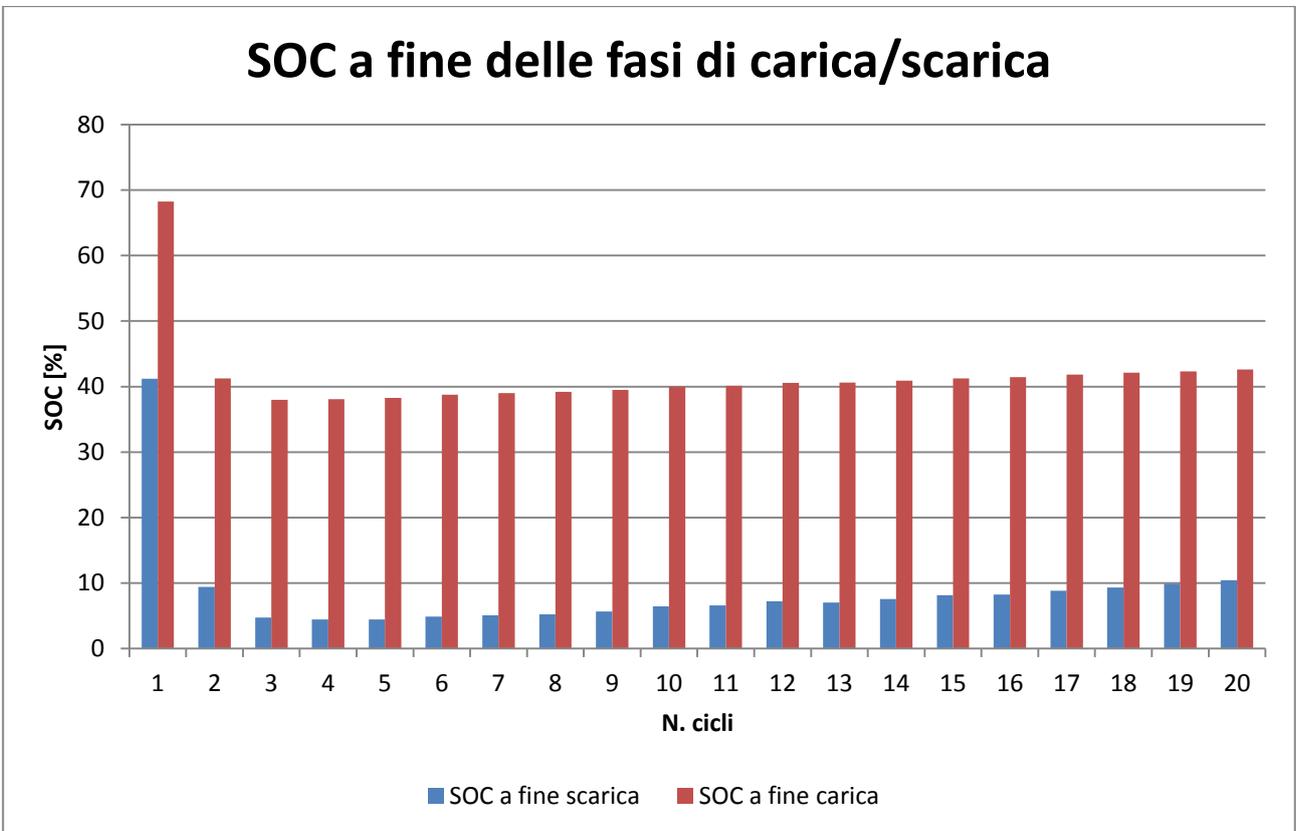


Figura 22. Andamento dello stato di carica

Tabella 17. SOC in funzione del numero di cicli

Ciclo	Fase	Capacità di fase [Ah]	Capacità residua [Ah]	SOC
0	inizio	0	51	100
1	fine scarica	-29.995	21.005	41.18627
	fine carica	13.802	34.807	68.24902
2	fine scarica	-30	4.807	9.42549
	fine carica	16.241	21.048	41.27059
3	fine scarica	-18.63	2.418	4.741176
	fine carica	16.959	19.377	37.99412
4	fine scarica	-17.115	2.262	4.435294
	fine carica	17.16	19.422	38.08235
5	fine scarica	-17.164	2.258	4.427451
	fine carica	17.258	19.516	38.26667
6	fine scarica	-17.032	2.484	4.870588
	fine carica	17.279	19.763	38.75098
7	fine scarica	-17.169	2.594	5.086275
	fine carica	17.29	19.884	38.98824
8	fine scarica	-17.219	2.665	5.22549
	fine carica	17.327	19.992	39.2
9	fine scarica	-17.098	2.894	5.67451
	fine carica	17.256	20.15	39.5098
10	fine scarica	-16.863	3.287	6.445098
	fine carica	17.094	20.381	39.96275
11	fine scarica	-17.025	3.356	6.580392
	fine carica	17.109	20.465	40.12745
12	fine scarica	-16.783	3.682	7.219608
	fine carica	17.012	20.694	40.57647
13	fine scarica	-17.11	3.584	7.027451
	fine carica	17.121	20.705	40.59804
14	fine scarica	-16.853	3.852	7.552941
	fine carica	17.005	20.857	40.89608
15	fine scarica	-16.71	4.147	8.131373
	fine carica	16.88	21.027	41.22941
16	fine scarica	-16.818	4.209	8.252941
	fine carica	16.918	21.127	41.42549
17	fine scarica	-16.615	4.512	8.847059
	fine carica	16.816	21.328	41.81961
18	fine scarica	-16.579	4.749	9.311765
	fine carica	16.729	21.478	42.11373
19	fine scarica	-16.431	5.047	9.896078
	fine carica	16.546	21.593	42.33922
20	fine scarica	-16.27	5.323	10.43725
	fine carica	16.408	21.731	42.6098

4 Conclusioni

L'attività della presente annualità, e quella dell'anno precedente, è stata condotta realizzando una prova vita mediante l'applicazione di un profilo di lavoro che include una fase di carica rapida su un modulo batterie particolarmente adatto ad esaltarne gli effetti, in quanto costruito con celle che nominalmente possono operare in carica ad un rate di corrente sensibilmente inferiore a quello utilizzato.

Ciò ha permesso di evidenziare gli effetti a breve termine, immediatamente riscontrabili, dovuti all'alta corrente di carica e di determinare i requisiti che il sistema d'accumulo deve possedere per sopportarla. Un requisito molto stringente è l'equalizzazione delle celle, per evitare che l'elevato aumento di tensione, dovuto al prodotto dell'intensità di corrente per il valore della resistenza, conduca al raggiungimento dei limiti di tensione. Una buona equalizzazione è indispensabile anche per massimizzare la quantità di carica elettrica che è possibile immettere nella sistema d'accumulo mediante la fase di carica. Anche le resistenze di contatto e la tipologia della carica, "corrente costante/tensione costante" piuttosto che "corrente costante", sono fattori molto importanti.

Per quanto riguarda gli effetti a lungo termine della corrente di carica elevata, cioè gli effetti sulla vita della batteria, nel caso in esame il sistema elettronico che gestisce e controlla le celle dal punto di vista elettrico e termico ha fatto sì che, durante l'esecuzione del profilo di lavoro con carica rapida, la tensione e la temperatura delle celle sono rimaste nei limiti di normale funzionamento: ciò ha consentito l'esecuzione di 3'000 cicli e finora non è stato riscontrato un decadimento significativo della capacità ed energia erogate nei cicli standard di verifica periodica delle prestazioni. Invece, è stato registrato un aumento della resistenza interna, che si manifesta nella riduzione di durata della scarica e della corrente massima che il modulo è in grado di assorbire nella carica della procedura di prova. Con riferimento a questo aspetto, la prosecuzione dell'attività ha richiesto, nel tempo, successivi aggiustamenti delle soglie di tensione impostate al ciclatore per evitare il raggiungimento del limite inferiore/superiore in scarica/carica. Tutto ciò si traduce nella riduzione della quantità di carica elettrica che il modulo è in grado di erogare/accumulare nell'esecuzione della procedura di prova e quindi, con riferimento alla missione corrispondente del minibus, nella progressiva riduzione di autonomia, che alla fine può condurre il veicolo all'incapacità di compiere la percorrenza di servizio. Ciò vuol dire che la condizione di fine vita potrebbe raggiungersi non tanto per il decadimento periodico delle prestazioni di capacità/energia rilevate nei controlli periodici, quanto per incapacità di eseguire il profilo di lavoro a causa dell'aumento di resistenza interna. Infatti, la fine della vita del modulo batterie si raggiunge al verificarsi della prima tra le due condizioni seguenti:

- la capacità/energia erogata nei cicli standard di verifica periodica delle prestazioni è inferiore o uguale all'80% del valore iniziale, condizione classicamente assunta per decretare la fine del servizio per sistemi batterie ad uso veicolare,
- la capacità/energia erogata nella fase di scarica della procedura di prova è inferiore o uguale al valore minimo necessario per garantire il servizio nella missione di trasporto pubblico corrispondente.

Allo stato attuale, 3'000 cicli eseguiti, il modulo non ha raggiunto nessuna delle due condizioni di fine vita. A dire il vero, la prima delle due sembra lontana a realizzarsi, mentre la seconda appare più prossima. Una stima della vita basata sulla riduzione progressiva di autonomia del minibus conduce al valore di 6'750 cicli.

La prova ha avuto carattere conservativo, in quanto:

- il modulo batterie è realizzato con celle che il costruttore garantisce al rate massimo di 1C,
- il modulo batterie non è nuovo, ma è stato utilizzato in precedenti prove di caratterizzazione e vita (eseguiti 400 cicli con carica a corrente costante 1.5C per 480 s e scarica a corrente costante 0.6C per 1200 s),
- tutta la prova è stata condotta in condizioni più impegnative di quelle strettamente richieste per eseguire la missione corrispondente (5 km in 15').

La scelta di dare alla prova vita un carattere conservativo è appositamente voluta per esaltare gli effetti prodotti dalla carica rapida sul sistema batterie.

Pur mantenendosi nei valori conservativi forniti dalla prova, è stato comunque possibile dimostrare che in un'analisi ove si confronta il costo a fine vita del veicolo (minibus) il cui sistema d'accumulo sia realizzato:

- (i) con una batteria che nei pochi minuti di sosta al capolinea viene ricaricata della sola quantità di energia necessaria per compiere il servizio,
- (ii) con una batteria di maggiore capacità che, a parità di percorrenza, esegue solamente la carica completa a fine servizio giornaliero,

risulta più conveniente equipaggiare il minibus con la batteria più piccola, che si avvale della carica rapida al capolinea.

E' quindi lecito concludere che la carica rapida, non tanto in assoluto, quanto nel giusto abbinamento con il sistema batterie, il tipo di veicolo e di missione, si configura come un valido mezzo per ridurre il problema della scarsa autonomia dei veicoli elettrici ed è un valido strumento di ausilio per l'elettromobilità, soprattutto con riferimento al trasporto pubblico locale.

5 Riferimenti bibliografici

1. R. Arunachala, A. Jossen, J. Garche, K. Makinejad, S. Athlekar, "Cycle life characterization of large format lithium-ion cells", EVS27, Barcelona, Spain, Nov 17 ÷ 20, 2013
2. J. C. Viera, D. Ansean, M. Gonzalez Vega, V. M. García, J. C. Álvarez, J. L. Antuña, "High power LiFePO4 cell evaluation: fast charge, depth of discharge and fast discharge dependency", EVS27, Barcelona, Spain, Nov 17 ÷ 20, 2013
3. A. Burke, M. Miller, "Life cycle testing of lithium batteries for fast charging and second-use applications", EVS27, Barcelona, Spain, Nov 17 ÷ 20, 2013
4. M. Shirk, J. Wishart, "Effects of Electric Vehicle Fast Charging on Battery Life and Vehicle Performance", SAE 2015 World Congress and Exhibition, Detroit, Michigan, April 21-23, 2015
5. G. Pede, F. Vellucci, "Effetti della carica rapida sui sistemi d'accumulo elettrochimici", Report RdS/PAR2014/106, www.enea.it
6. M. Ceraolo, T. Huria, C. Zappacosta, "Sviluppo di moduli integrati, completi di BMS", Report RdS/2011/318, www.enea.it
7. F. Vellucci, G. Pede, "Sviluppo di moduli batterie litio-ioni per avviamento e trazione non auto motive", Report RdS/2011/27, www.enea.it
8. F. Vellucci, G. Pede, A. Mariani, F. D'Annibale, "Sviluppo e realizzazione di moduli batterie litio-ioni per avviamento e trazione non auto motive", Report RdS/2012/087, www.enea.it
9. 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 48 Vn - 100 Ah", Report RdS/2012/088, www.enea.it
10. F. Baronti, G. Fantechi, R. Roncella, R. Saletti, "Progettazione definitiva del BMS per batterie di avviamento e trazione non auto motive", Report RdS/2012/089, www.enea.it
11. 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", Report RdS/2013/247, www.enea.it
12. F. Baronti, R. Roncella, R. Saletti, "Ottimizzazione di sistemi di controllo BMS per moduli batterie al litio da utilizzare in applicazioni stazionarie", Report RdS/2013/246, www.enea.it
13. R. Di Rienzo, F. Baronti, F. Vellucci, F. Cignini, F. Ortenzi, G. Pede, R. Roncella, R. Saletti, "Experimenta Analysis o fan Electric Minibus with Small Battery and Fast Charge Policy", ESARS-ITEC 2016, Tolosa, France, November 02-04, 2016
14. F. Vellucci, G. Pede, F. Baronti, R. Di Rienzo, F. Cignini, "Effects of fast charge on a lithium-ion battery system", EVS29 Symposium, Montréal, Québec, Canada, June 19-22, 2016

6 Abbreviazioni ed acronimi

A	valore di corrente in Ampere
BMS	Battery Management System
C	consumo chilometrico
C/n	valore di corrente pari al della capacità nominale C del sistema d'accumulo diviso per n
Ch	carica
Dsch	scarica
E	energia
LFP	litio ferro fosfato, LiFePO ₄
η	efficienza dell'azionamento
η_c	efficienza coulombica
η_e	efficienza energetica
nC	valore di corrente pari a n volte il valore della capacità nominale C del sistema d'accumulo
P	potenza di carica
RT	room temperature
SA	sistema d'accumulo
SOC	stato di carica
T _m	tempo di marcia
TPL	trasporto Pubblico Locale
T _s	tempo di sosta
V	velocità
V _n	tensione nominale