



Ricerca di Sistema elettrico

# Effetti della carica rapida sui sistemi d'accumulo elettrochimici

Giovanni Pedè, Francesco Vellucci

## EFFETTI DELLA CARICA RAPIDA SUI SISTEMI D'ACCUMULO ELETTROCHIMICI

Giovanni Pedè, Francesco Vellucci (ENEA)

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: "Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica"

Progetto: C4 "Prodotti e processi per il miglioramento dell'efficienza energetica nell'elettromobilità"

Obiettivo: a.3 "Effetti della carica rapida sulle batterie"

Responsabile del Progetto: Antonino Genovese, ENEA

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	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 PROVA VITA SU CELLA.....	9
2.5.1 <i>Caratteristiche della cella</i> .....	9
2.5.2 <i>Profilo di prova</i> .....	10
2.5.3 <i>Risultati</i> .....	11
2.6 PROVA VITA SU MODULO BATTERIE.....	12
2.6.1 <i>Caratteristiche del modulo batterie</i> .....	12
2.6.2 <i>Profilo di prova</i> .....	16
2.6.3 <i>Risultati</i> .....	16
2.7 RICONTRI APPLICATIVI.....	23
2.7.1 <i>Riscontro applicativo del profilo di lavoro adottato per l'esecuzione della prova vita</i> .....	23
2.7.2 <i>Implementazione su minibus di un sistema batterie multi stringa multi modulo</i> .....	25
3 CONCLUSIONI.....	27
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	29
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	30

## Sommario

Il lavoro riportato nel presente documento muove dalla volontà di studiare il comportamento di sistemi d'accumulo elettrochimici sottoposti a carica rapida. In particolare, si vuole indagare sugli effetti da essa prodotti: 1) sulla capacità del sistema d'accumulo di eseguire, senza incorrere nei limiti elettrici e termici, profili di lavoro che includono la carica rapida e, 2), sulla vita del sistema d'accumulo stesso.

Lo studio è stato condotto dapprima a livello di cella, elemento di base nell'architettura dei sistemi d'accumulo: sono state impiegati campioni di celle al litio – ferro - fosfato da 60 Ah, sottoposte ad una prova vita secondo un profilo di lavoro che includeva una fase di carica ad un'intensità di corrente pari a tre volte il valore di capacità nominale delle celle. I campioni testati hanno eseguito circa 2000 cicli senza evidenziare rilevanti degradazioni delle prestazioni.

Grazie all'esito positivo di questa prima fase, è stato deciso di ripetere la medesima prova salendo di un livello nell'architettura dei sistemi d'accumulo, cioè passando dalla cella al modulo batterie. A tal fine, è stato utilizzato uno dei moduli batterie prodotti nelle precedenti annualità della Ricerca di Sistema Elettrico. Il modulo è composto da quattro celle al litio – ferro - fosfato da 60 Ah connesse in serie, più un sistema elettronico di gestione e controllo delle grandezze elettriche e termiche.

L'applicazione ciclica del profilo di lavoro al modulo batterie ha evidenziato alcune problematiche tipiche dei sistemi d'accumulo sottoposti a carica rapida, come l'elevato e repentino innalzamento della tensione con rischio di superare il limite di tensione massima, che si ripercuote nella necessità di bilanciamento delle celle e di impostazione della carica a tensione costante anziché a corrente costante. Nel caso della prova sulla singola cella, tale innalzamento di tensione era stato molto meno limitante, giacché a livello di cella il problema della disegualizzazione non si pone, ed inoltre essa viene completamente controllata durante l'esecuzione della prova. Nel caso del modulo batterie, invece, più celle lavorano insieme e ciò determina la necessità di doverle controllare tutte contemporaneamente, specialmente nelle fasi più gravose: se una sola di esse raggiunge un limite di funzionamento, la prova (o l'esercizio) si interrompe. Il sistema di controllo deve quindi fare in modo che tutte le celle si comportino allo stesso modo e nessuna ecceda i limiti.

La prova vita sul modulo batterie ha finora dimostrato che il sistema elettronico di gestione e controllo è in grado di far sì che tensione e temperatura delle celle durante la carica rapida si mantengano all'interno del range di normale funzionamento e che il modulo resiste all'applicazione ciclica del profilo senza subire una significativa riduzione delle prestazioni. Tale prova è ancora in corso, sono stati eseguiti circa 1000 cicli (corrispondenti a circa 6000 km, vedi di seguito), e proseguirà fino al raggiungimento della condizione di fine vita.

Nel presente elaborato viene anche mostrato come il profilo di prova utilizzato trovi riscontro applicativo con una tipologia di missione richiesta dal Trasporto Pubblico Locale per una categoria di veicolo tipo minibus. Il mezzo è pensato in servizio su una tratta di pochi chilometri, che nei pochi minuti di sosta al capolinea carica l'energia necessaria per compiere il giro successivo. Viene quindi messo in evidenza come la carica rapida, non intesa in senso assoluto, ma correlata alla tipologia di batterie, veicolo e missione, possa fornire un valido contributo per risolvere il problema della scarsa autonomia dei veicoli elettrici.

Una volta terminata la prova vita a livello di modulo, se essa avrà esito positivo, come auspicato, si procederà alla sua ripetizione a livello di sistema batterie completo installato su minibus, direttamente su strada.

## 1 Introduzione

Il lavoro descritto nel presente documento si inquadra nell'Obiettivo a.3 "Effetti della carica rapida sulle batterie" del Progetto C4 "Prodotti e processi per il miglioramento dell'efficienza energetica nell'elettromobilità", a sua volta collocato nell'Area "Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica" dell'Accordo di Programma tra il Ministero delle Sviluppo Economico e l'ENEA.

Se è vero che la ricarica rapida e quella ultrarapida rispondono all'esigenza pratica e psicologica di avvicinare il più possibile le modalità d'uso del veicolo elettrico a quello convenzionale, è altrettanto vero che ben poco ancora si conosce sull'influenza delle correnti elevate in fase di carica sulla durata della batteria. Di conseguenza, i limiti di corrente "in carica" posti dai costruttori di batterie commerciali sono, cautelativamente, piuttosto bassi.

La letteratura scientifica è abbastanza carente a riguardo ed ai molti studi di modellistica, caratterizzazione e confronto tra le varie tipologie di batterie, non fanno riscontro studi e ricerche altrettanto numerosi sui cicli vita e sulla carica rapida. Se da un lato qualcosa è stato fatto a livello di sistema elementare (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].

In realtà, esperienze di laboratorio stanno dimostrando come le correnti massime effettivamente accettabili da batterie litio-ioni, anche economiche come le litio - ferro - fosfato commerciali, durante una "fast charge" possano essere doppie e triple di quelle dichiarate dai costruttori, senza notevole danno alla vita delle stesse, anche dopo l'esecuzione di migliaia di cicli di cariche e scariche parziali (profondità di scarica del 20-30%).

Sembra perciò importante approfondire questo tema, attraverso l'esecuzione di prove vita "ad hoc", con la finalità di indagare sugli effetti prodotti dalla carica rapida sui sistemi d'accumulo, valutare la fattibilità tecnica della stessa in termini di impatto sulle prestazioni e sulla vita dei sistemi d'accumulo e, conseguentemente, la sua fruibilità nell'ambito applicativo. A tale scopo è stato utilizzato uno dei moduli 12V - 60 Ah sviluppati nel corso dei precedenti PAR, particolarmente adatti alla carica rapida in quanto termostatati a mezzo ventole. La prova vita, già avviata a correnti di carica pari ad 1.5 volte il valore della capacità nominale, è stata quindi "accelerata" raddoppiando il valore della corrente.

Il presente lavoro si riferisce a sistemi d'accumulo di tipo elettrochimico che utilizzano batterie agli ioni di litio con tecnologia catodica LFP (litio - ferro - fosfato,  $\text{LiFePO}_4$ ).

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 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 eseguita con una potenza superiore a 22 kW. Il valore della potenza di carica, però, se considerato da solo, non è sufficientemente rappresentativo della velocità di carica in quanto il tempo di carica è dipendente 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. Appare evidente che 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.

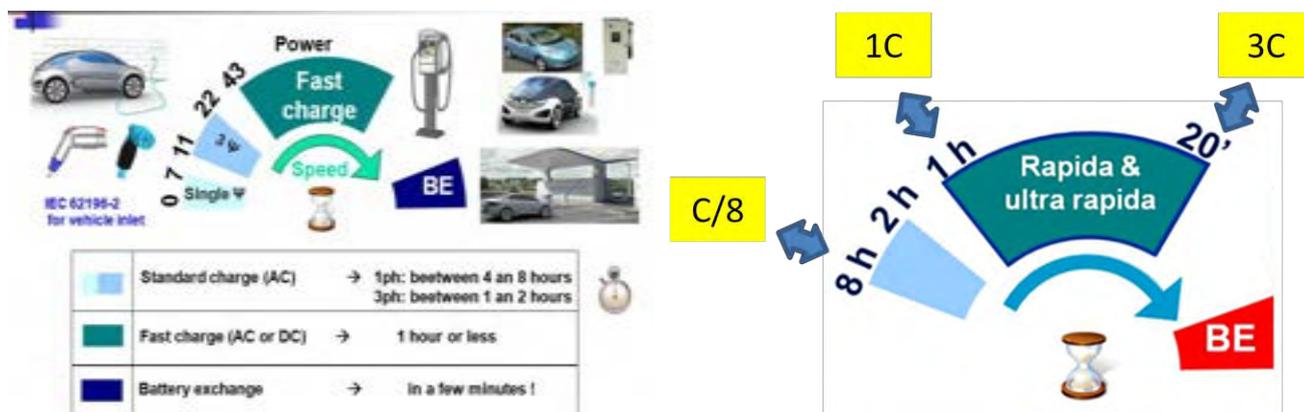


Figura 1. Definizione di carica rapida con riferimento alla potenza (sinistra) ed al tempo (destra)

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 e la letteratura scientifica sulle batterie abbondano di dati relativi alle celle (prestazioni in carica e scarica, vita nel ciclo standard<sup>1</sup>) 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

<sup>1</sup> 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 corrente 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 maggiore tra C/200 e 0.1 A. 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 riassetamento della temperatura, solitamente non inferiore a mezz’ora/un’ora.

somma delle prestazioni dei singoli elementi che costituiscono l'unità stessa, 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 diverso dal 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 si è deciso di avviare una campagna di prove vita su alcune celle sottoposte ad un profilo di lavoro che include una fase di carica rapida. I risultati incoraggianti ottenuti a livello di cella hanno indotto a ripetere le prove a livello di modulo. Questo lavoro si allinea a diversi altri svolti da ENEA nella tematica delle prove vita su batterie, dapprima a riguardo degli accumulatori al piombo e, successivamente, al litio.

Come verrà mostrato in dettaglio più avanti, il profilo di lavoro utilizzato per le prove riportate in questo documento è compatibile con una tipologia di missione per minibus richiesta dal TPL (Trasporto Pubblico Locale): nei pochi minuti di sosta al capolinea, il mezzo carica l'energia di cui necessita per eseguire il percorso di servizio. In questo ambito, si esalta un concetto di carica rapida che è diverso da quello legato in senso assoluto al valore della potenza o del tempo di carica, riportato nella sua definizione: si può parlare, infatti, di carica rapida legata alla missione del veicolo, in cui il veicolo in pochi minuti si carica parzialmente (quindi non si tratta di carica completa) della sola energia di cui ha bisogno per eseguire la sua missione. Sulla base della compatibilità del profilo di lavoro utilizzato per i test con una tipologia di missione richiesta dal TPL, verrà realizzato un sistema batterie che al termine della campagna di prove sul modulo sarà installato a bordo di un minibus: quest'ultima parte delle attività sarà eseguita nell'ambito del "Progetto ENEA-CNR per lo sviluppo del tessuto produttivo del Mezzogiorno" che si svolge parallelamente ed in coordinamento con le attività della Ricerca di Sistema Elettrico

### 2.3 *Apparecchiature utilizzate*

Le prove sono state condotte utilizzando uno dei ciclatori (convertitori AC/DC bidirezionali) 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. Il ciclatore è in grado di eseguire fasi di carica e scarica del sistema d'accumulo in condizioni programmate (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 della macchina utilizzata e le sue caratteristiche tecniche principali sono riportate rispettivamente in Figura 2 e Tabella 1.



**Figura 2. Ciclatore utilizzato per l'esecuzione delle prove**

**Tabella 1. Caratteristiche tecniche principali del ciclatore**

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

Come si vede dalla tabella, la macchina possiede due campi di lavoro in tensione, il campo di lavoro "basso", con range di tensione nominale 3.6 ÷ 6 V, ed il campo di lavoro "alto", con range di tensione nominale 8 ÷ 36 V, che consentono di operare sia a livello di singola cella (campo "basso") che di modulo batterie (campo "alto").

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).

**Tabella 2. Stringa dei dati registrati dal ciclatore**

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

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 ciclo di lavoro.

Le prove sono state eseguite alla temperatura RT di +23 °C (prove su cella) e +27.5°C (prove su modulo) assicurate dal sistema di condizionamento installato nella sala prove dell'edificio.

La temperatura del campione durante la prova è stata misurata applicando su di esso il sensore della termocoppia tipo K in dotazione al ciclatore. L'altro sensore di temperatura, Pt100, di cui è corredato il ciclatore, è stato posizionato in prossimità del campione 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 campione 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 sia con BMS che con il ciclatore)
- Tempo di prova (acquisito con il ciclatore)
- Tensione batteria (acquisita con il BMS e con il ciclatore)
- Tensione delle singole celle, con identificazione della cella a tensione minima e di quella a tensione massima (acquisite 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 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 del ciclatore soddisfano i requisiti riportati in Tabella 3:

**Tabella 3. Accuratezza di misura**

Parametro	Accuratezza
Tensione	< 1% della lettura
Corrente	< 1% della lettura
Temperatura	± 1°C

## 2.4.4 Tolleranze di prova

Il ciclatore impiegato ha le seguenti tolleranze di lavoro:

- Corrente
  - Durante la scarica e carica a corrente costante: ± 1%
  - Durante la scarica e carica a corrente variabile: ± 2% (± 4% durante i primi 2 secondi)
- Tensione
  - Durante la carica a tensione costante: ± 1%
- Potenza
  - Durante la scarica e carica a potenza costante: ± 1%
  - Durante la scarica e carica a potenza variabile: ± 2% (± 4% durante i primi 2 secondi)
- Energia
  - Durante i cicli dinamici con scarica a potenza variabile, il valore dell'energia scaricata nell'intero ciclo sarà ± 2% del valore teorico.

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

## 2.5 Prova vita su cella

### 2.5.1 Caratteristiche della cella

La tipologia di cella testata è agli ioni di litio, con catodo al litio - ferro - fosfato  $\text{LiFePO}_4$  ed anodo in grafite, geometria prismatica (Figura 3). Le caratteristiche principali sono riportate nella Tabella 4.

**Tabella 4. Principali caratteristiche della cella**

Tipo		litio-ioni, LFP
Capacità		60 Ah
Tensione	Nominale	3.20 V
	Minima	2.50 V
	Massima	3.65 V
Corrente max. continuativa	Scarica	180 A (3C)
	Carica	60 A (1C)
Temperatura di esercizio	Scarica	-20 ÷ +60°C
	Carica	0 ÷ +45°C



Figura 3. Cella litio-ioni LFP da 60 Ah

Per il test sono stati impiegati 3 campioni di celle, prelevati da un lotto precedentemente approvvigionato.

### 2.5.2 Profilo di prova

Le prove sono state eseguite a partire da SOC (stato di carica) iniziale 75%, sottoponendo il campione al seguente profilo di lavoro:

- carica a corrente costante di valore 3C (180 A) per 300 s,
- pausa per 60 s,
- scarica a corrente costante di valore 2/3C (40 A) per 1200 s,
- pausa per 60 s.

Il profilo è rappresentato in Figura 4, considerando negativa la corrente in scarica e positiva in carica.

La prova consiste nel sottoporre il campione all'esecuzione continuativa del profilo di lavoro, con interruzione periodica per effettuare il controllo delle prestazioni. Detto controllo avviene tramite l'esecuzione di due cicli standard, di cui il primo ha funzione di reset ed il secondo viene utilizzato per il computo delle prestazioni: misura della carica elettrica ed energia erogate durante la fase di scarica standard, calcolo del rendimento coulombico ed energetico.

La prova ha termine se il campione presenta segni di danneggiamento, oppure non riesce ad eseguire il profilo di lavoro (superamento della temperatura o della tensione massima, raggiungimento di una tensione inferiore al valore minimo)

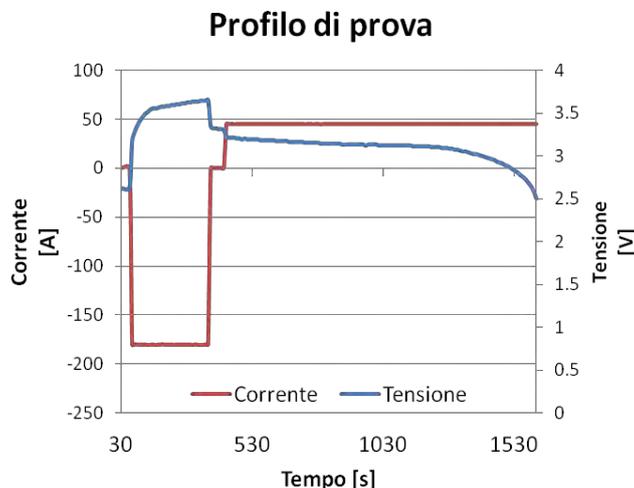


Figura 4. Profilo di carica/scarica utilizzato per la prova vita a livello di cella

In termini di carica elettrica, la quantità erogata nella fase di scarica (13.3 Ah) è leggermente inferiore a quella accumulata nella fase di carica (15 Ah): ciò consente l'esecuzione ciclica del profilo senza necessità di ricariche complete intermedie (ciclo bilanciato, tenendo conto dell'efficienza di carica).

Si noti che la fase di carica avviene ad un'intensità di corrente pari a 3C, mentre la corrente massima continuativa riportata nella specifica tecnica fornita dal Costruttore è 1C: ciò rende il tipo di celle utilizzate particolarmente adatto ad evidenziare/esaltare gli effetti della carica rapida, a cui il lavoro relativo al presente documento è dedicato.

Infine, come dianzi accennato e come sarà dimostrato in dettaglio più avanti, il profilo di lavoro è compatibile con la missione, rispondente a specifiche esigenze di TPL, d'un veicolo tipo minibus che carica in pochi minuti al capolinea l'energia necessaria a compiere la tratta su cui è in servizio.

### 2.5.3 Risultati

La prima evidenza sperimentale è che i campioni testati sono stati in grado di eseguire il profilo di lavoro, senza mostrare danneggiamento: tensione e temperatura rimangono nei limiti di normale funzionamento (rispettivamente 2.50 ÷ 3.65 V, +45°C in carica, +60°C in scarica), non sono state evidenziate deformazioni o rotture dell'involucro della cella. Nelle Figure 5 e 6 è riportato un andamento tipico di queste grandezze.

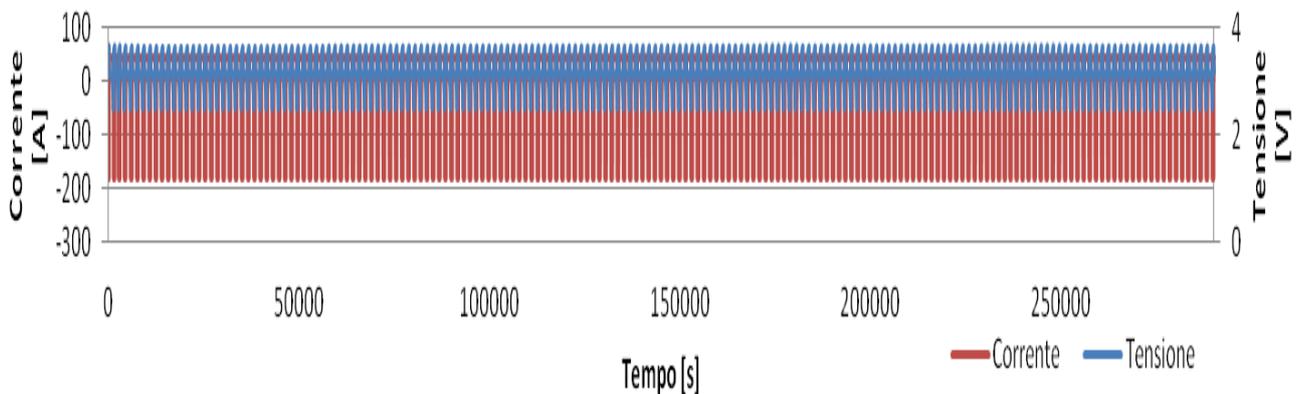


Figura 5. Andamento tipico della tensione durante l'esecuzione della prova

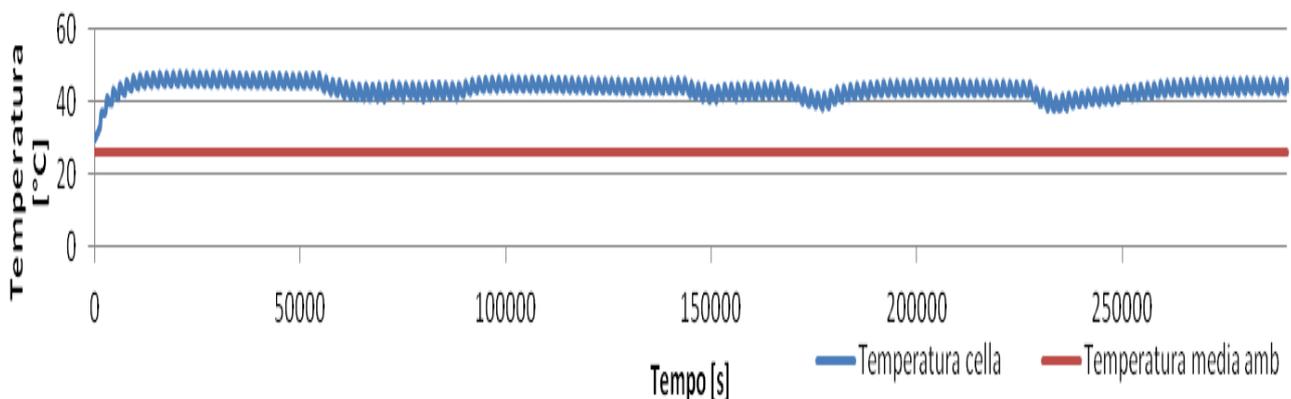
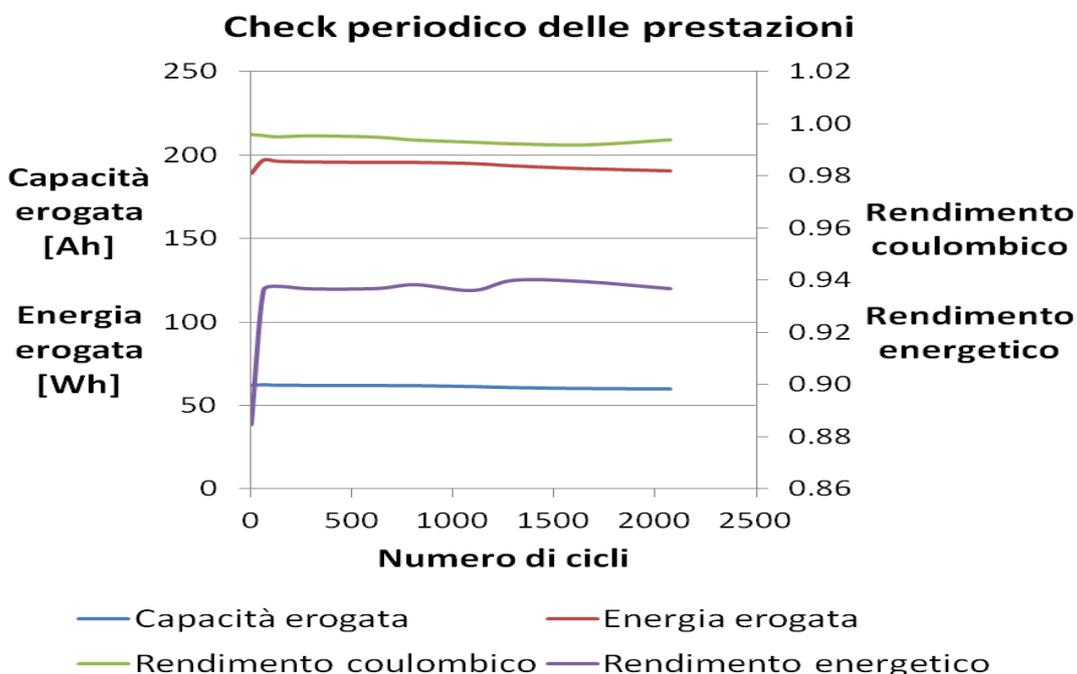


Figura 6. Andamento tipico della temperatura durante l'esecuzione della prova

In tali condizioni, sono stati eseguiti più di 2000 cicli. Durante il check periodico delle prestazioni, riportato in Tabella 5 e tradotto in forma grafica nella Figura 7, non si è verificato un loro decadimento significativo.

**Tabella 5. Check periodico delle prestazioni su cella**

N. cicli	Ah dsch	Wh dsch	$\eta_c$	$\eta_e$
0	61,911	189,05	0,996	0,885
60	62,224	196,87	0,996	0,936
133	61,937	196,20	0,995	0,938
300	61,849	195,82	0,996	0,937
619	61,772	195,53	0,995	0,937
815	61,679	195,53	0,994	0,938
1099	61,207	194,86	0,993	0,936
1305	60,627	193,53	0,992	0,940
1655	60,123	191,90	0,992	0,940
2076	59,855	190,60	0,994	0,937



**Figura 7. Diagrammi delle prestazioni rilevate durante il check periodico**

Sulla base degli incoraggianti risultati ottenuti, anche se non è stata raggiunta la condizione di fine vita delle celle per motivi legati alla disponibilità del ciclatore, è stato deciso di ripetere la prova a livello di modulo batterie.

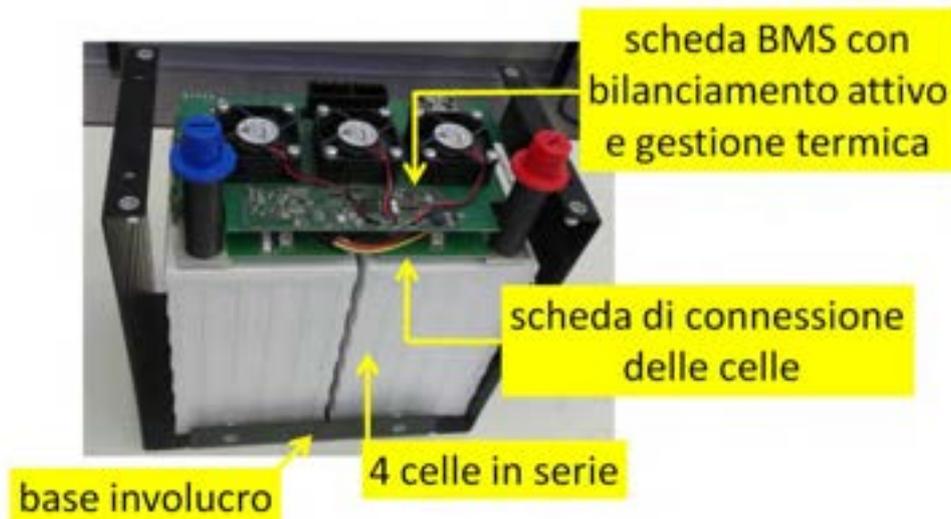
## 2.6 Prova vita su modulo batterie

### 2.6.1 Caratteristiche del modulo batterie

Ragioni di tempo e disponibilità del ciclatore, comunque abbinate a fattori che rendono l'attività sperimentale eseguita particolarmente adatta ad esaltare le problematiche allo studio, come verrà mostrato in dettaglio più avanti, hanno determinato che la prova venisse svolta su uno dei moduli sviluppati in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione dell'Università di Pisa nelle precedenti annualità della Ricerca di Sistema Elettrico. In particolare, è stato utilizzato uno dei moduli dell'ultima versione, precedentemente impiegato in cicli di caratterizzazione per dimostrare la versatilità applicativa in ambito veicolare e stazionario, e una prova vita con carica a corrente costante 1.5C per 480"

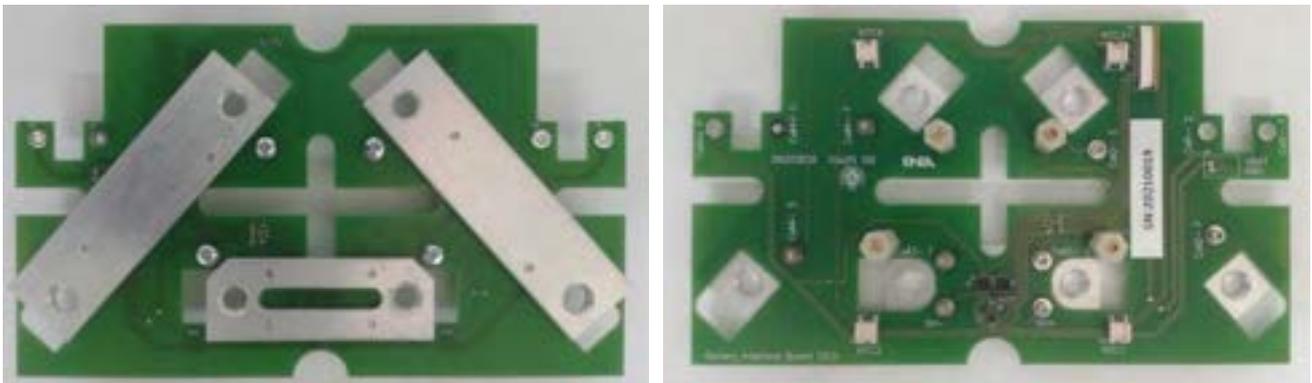
e scarica a corrente costante 0.6C per 1200" intervallate da una pausa di 60", in cui sono stati eseguiti 400 cicli, senza rilevare decadimento prestazionale.

Il modulo batterie, rappresentato in Figura 8, è costituito da 4 celle litio-ioni con tecnologia catodica di tipo LFP, tensione nominale 3.2 V<sub>n</sub> e capacità 60 Ah, collegate in serie.



**Figura 8. Modulo batterie litio-ioni 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 9, che si fissa ai terminali delle celle. Una delle barrette è configurata come shunt, per consentire 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 e dei terminali utilizzati per il bilanciamento dello stato di carica delle celle.



**Figura 9. 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 10, 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: "alert", cui corrisponde l'azione di attivazione di un segnale di allarme per un tempo "Time Alarm On" al raggiungimento delle condizioni di alert (tensione/temperatura minima/massima delle celle, corrente massima di alert), "error", cui corrisponde l'azione di apertura del contattore e conseguente disconnessione del modulo batterie dal ciclatore al

raggiungimento delle condizioni di allarme (tensione/temperatura minima/massima delle celle, corrente massima di allarme),

- bilanciamento delle celle a fine carica (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 Nm<sup>3</sup>/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).



Figura 10. Scheda elettronica BMS, lato inferiore (destra) e lato superiore (sinistra)

Il valore di "Time Alarm On", delle soglie di "alert" ed "error", e della temperatura 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 prove, sia in ambito applicativo. Per l'esecuzione delle prove riportate 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 6.

Tabella 6. Configurazione dei parametri del BMS

Condizione	Parametro	Funzione	Valore
Allarme	TIME_ALARM_ON	Durata messaggio di allarme	5 s
	V_MAX_ALERT	Allarme per tensione massima di cella	3.55 V
	V_MIN_ALERT	Allarme per tensione minima di cella	2.85 V
	T_MAX_ALERT	Allarme per temperatura massima di cella	+45 °C
	T_MIN_ALERT	Allarme per temperatura minima di cella	0 °C
	I_MAX_CHARGE_ALERT	Allarme per corrente massima in carica	190 A
	I_MAX_DISCHARGE_ALERT	Allarme per corrente massima in scarica	70 A
Errore	V_MAX_ERROR	Errore per tensione massima di cella	3.60 V
	V_MIN_ERROR	Errore per tensione minima di cella	2.80 V
	T_MAX_ERROR	Errore per temperatura massima di cella	+60 °C
	T_MIN_ERROR	Errore per tensione minima di cella	0 °C
	I_MAX_CHARGE_ERROR	Errore per corrente massima in carica	200 A
	I_MAX_DISCHARGE_ERROR	Errore per corrente massima in scarica	80 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

La Figura 11 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 11. Interfaccia del BMS

I terminali del modulo batterie, realizzati in analogia con 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) che assolvono la funzione di bloccaggio interno 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 formano 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 [4] ÷ [10].

La Tabella 7 riporta le principali caratteristiche del modulo batterie.

Tabella 7. Principali caratteristiche del modulo batterie

Celle	Tipologia	litio-ioni, 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

### 2.6.2 Profilo di prova

Il modulo batterie è stato sottoposto ad una prova vita, applicando il seguente profilo di lavoro:

- fase 0: stato di carica iniziale 100%,
- fase 1: scarica a corrente costante di intensità 1C (60 A) per la durata di 900 s,
- fase 2: pausa di durata 60 s,
- fase 3: carica a corrente costante di intensità pari a 3C (180 A) per la durata di 300 s
- fase 4: pausa di durata 60 s,
- fase 5: ripetizione iterativa delle fasi da 1 a 4 per un periodo di tempo pari a 10 h,
- fase 6: carica lenta e completa (carica standard) fino a ripristinare lo stato di carica iniziale 100%.

Questo profilo è leggermente di verso da quello utilizzato per le prove a livello di cella: in particolare, la durata della scarica compensa la quantità di carica accumulata durante la carica. Il ciclo è equilibrato in termini di quantità di carica, quindi, per effetto del rendimento, l'energia erogata nella scarica è maggiore di quella accumulata nella carica. Di conseguenza il modulo batterie va progressivamente scaricandosi col procedere dell'iterazione. Dopo 10 h di funzionamento, il modulo batterie viene caricato completamente con una carica standard.

Ciò è stato fatto per ottenere una migliore corrispondenza del profilo di prova a quello richiesto da una specifica tipologia di missione del trasporto pubblico locale, in cui il mezzo carica in pochi minuti, durante la sosta al capolinea, la quantità di carica di cui necessita per percorrere la tratta su cui è in servizio. Al termine del servizio, il mezzo rientra al deposito, ove riceve la carica completa, pronto per tornare in esercizio il giorno successivo con le batterie completamente cariche. Questa corrispondenza verrà illustrata con maggiore dettaglio più avanti. Come già evidenziato a proposito delle prove a livello di cella, 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 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 già disponibili in virtù degli acquisti effettuati 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 dal punto di vista della carica (sono state effettuate prove di caratterizzazione con cariche entro il limite massimo consigliato dal Costruttore delle celle ed anche prove con carica ad 1,5C): anche il fatto di utilizzare un modulo batterie non completamente nuovo, è un elemento di utilità per esaltare gli effetti della carica rapida sui sistemi d'accumulo. La prova, assume pertanto carattere conservativo.

### 2.6.3 Risultati

Nella fase di carica rapida, il punto di lavoro delle celle si porta immediatamente in corrispondenza della tensione massima consentita ed accade che la fase di carica viene presto interrotta per raggiungimento delle condizioni di allarme/errore per sovratensione,  $V\_MAX\_ALERT/V\_MAX\_ERROR$ .

Inoltre, ciò avviene tanto più facilmente quanto più le celle sono squilibrate. La Figura 12 mostra questa situazione.

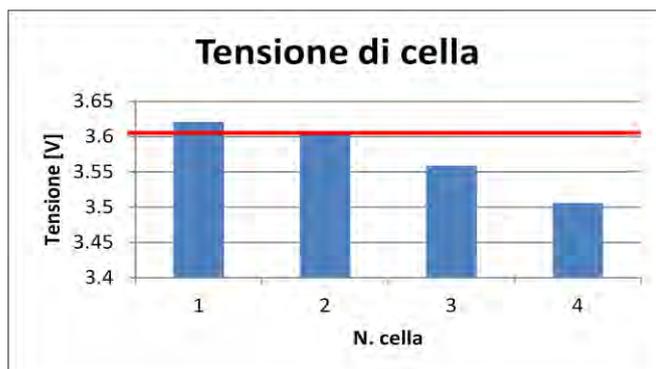


Figura 12. Squilibrio tra le celle nella fase di carica rapida

La linea rossa rappresenta il limite di tensione massima  $V\_MAX\_ERROR$ , impostato a  $3.6 V^2$ . Durante la fase di carica rapida le celle raggiungono la tensione massima e la prima che supera la soglia determina l'insorgere delle condizioni di allarme con conseguente arresto della carica.

La situazione migliora se le celle sono bilanciate in quanto tutte aumentano parallelamente di tensione ed è possibile sfruttare a pieno la potenzialità del modulo in quanto tutte le celle si caricano fino alla tensione massima. Il requisito che questa esperienza suggerisce per i sistemi d'accumulo sottoposti a carica rapida è un bilanciamento molto spinto delle celle, in modo da consentire al sistema di lavorare appena sotto la soglia di tensione massima, senza superarla. Nel caso del nostro modulo batterie, il bilanciamento delle celle viene eseguito automaticamente dal BMS al termine della fase di carica completa, che corrisponde nella realtà applicativa alla carica delle batterie del mezzo effettuata in deposito durante la pausa notturna. Infine, per poter proseguire le prove, è stato necessario modificare la fase di carica rapida dalla tipologia "a corrente costante" alla tipologia "a corrente costante/tensione costante": in questo modo di carica, il dispositivo di carica mantiene la corrente costante fino al raggiungimento della tensione massima impostata, dopodiché mantiene costante il valore di tensione e riduce progressivamente l'intensità della corrente secondo il principio che tanto più il sistema batterie va caricandosi, tanto meno è disposto ad accettare carica (ciò si manifesta attraverso l'aumento progressivo di resistenza interna durante la carica, nella fase a tensione costante il dispositivo di carica si comporta come un alimentatore a tensione costante che eroga tanta corrente quanta il sistema batterie può assorbirne, proprio in funzione della sua resistenza interna). Si noti che tale modalità di carica è comunemente eseguita sia dal ciclatore, che dalle stazioni di carica, ed è pertanto una tipologia di carica completamente fruibile non solo a livello di laboratorio, ma anche a livello applicativo.

Per effetto della modifica, il profilo di lavoro diventa come di seguito:

- fase 0: stato di carica iniziale 100%,
- fase 1: scarica a corrente costante di intensità 1C (60 A) per la durata di 900 s,
- fase 2: pausa di durata 60 s,
- fase 3: carica a corrente costante con intensità massima di corrente pari a 3C (180 A) fino al raggiungimento del valore di tensione 14.4 V e quindi proseguimento della carica a tensione costante e corrente decrescente fino al raggiungimento del tempo complessivo di fine fase, 300 s,
- fase 4: pausa di durata 60 s,
- fase 5: ripetizione iterativa delle fasi da 1 a 4 per un periodo di tempo pari a 10 h,
- fase 6: carica lenta e completa (carica standard) fino a ripristinare lo stato di carica iniziale 100%.

Nella Figura 13 tale profilo viene mostrato tramite un print screen del computer asservito al ciclatore, durante l'esecuzione della prova.

Il modulo batterie ha mostrato capacità di eseguire il profilo di lavoro: non sono emerse deformazioni (rigonfiamenti) dell'involucro delle celle, tensione e temperatura rimangono nei limiti di normale funzionamento. La Figura 14 ne illustra l'andamento tipico su 30 ripetizioni del profilo, corrispondenti a circa 10 ore di esercizio. Nella figura, è riportata tanto la temperatura ambiente, quanto la temperatura all'interno del vano batterie, entrambe misurate attraverso i sensori del ciclatore<sup>3</sup>. 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 (con una temperatura ambiente intorno ai +30 °C) per tutto il periodo di funzionamento rappresentato.

---

<sup>2</sup> Il limite di tensione impostato, 3.6 V, è inferiore alla soglia di sicurezza fornita dal Costruttore delle celle, pari a 3.65 V. Per la singola cella, la tensione di cut-off è addirittura 3.85 V. La scelta di impostare una tensione limite inferiore è precauzionale, ed è legata a questioni di protezione delle celle.

<sup>3</sup> A queste misurazioni di temperatura si aggiungono quelle effettuate dal BMS per mezzo dei sensori montati sulle celle, disponibili nei file di registrazione del BMS, ma non riportate nel diagramma per semplicità di rappresentazione.

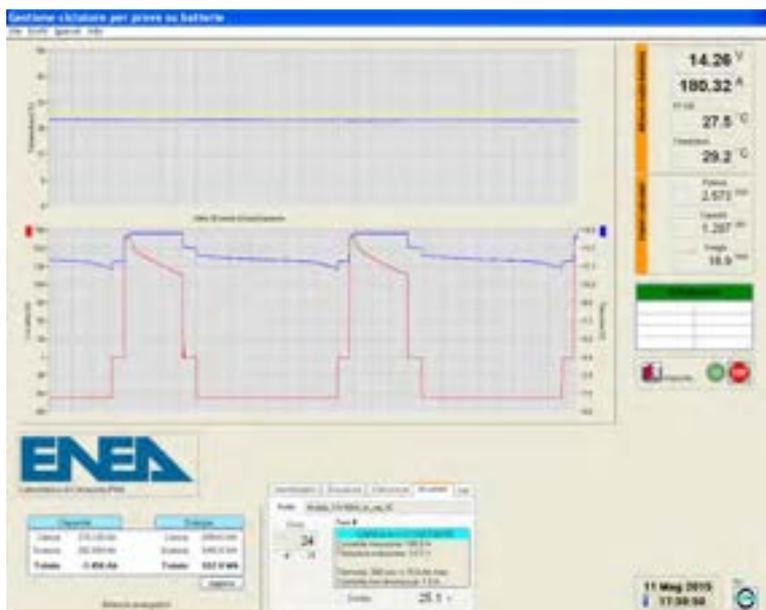


Figura 13. Profilo di lavoro utilizzato per la prova vita sul modulo

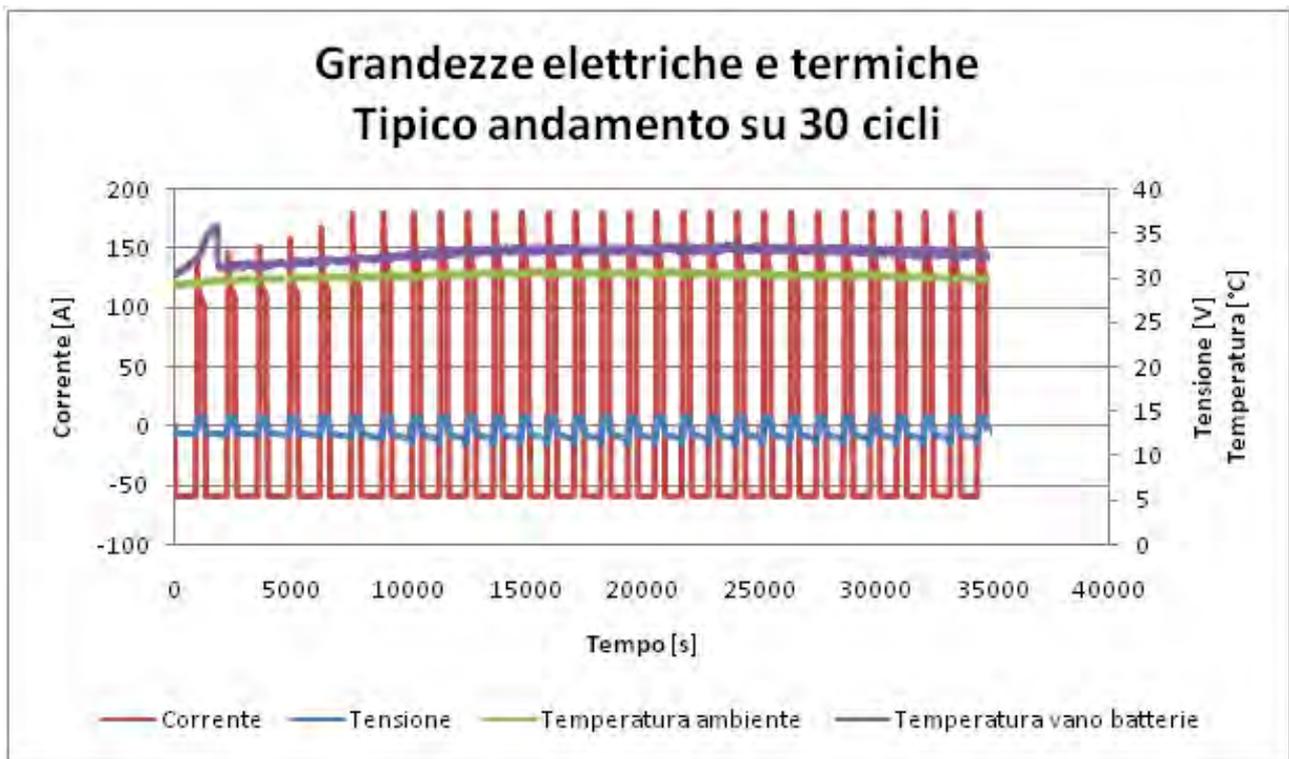
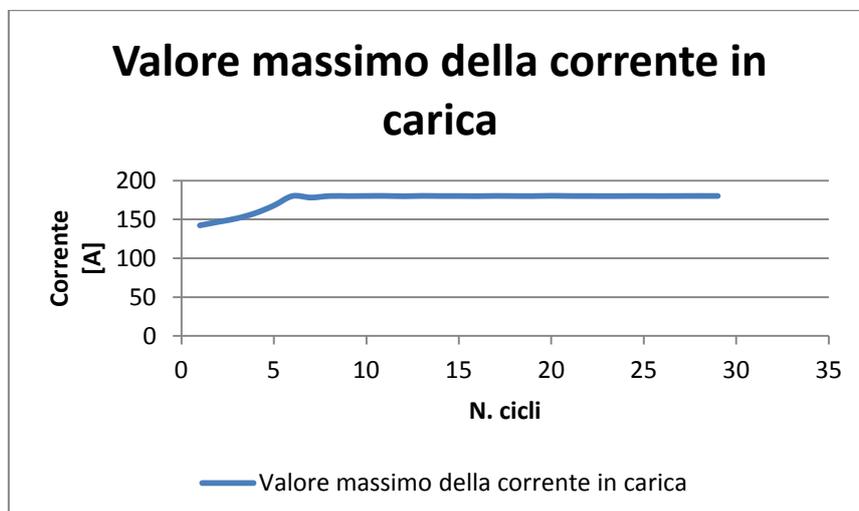


Figura 14. Andamento tipico delle grandezze elettriche e termiche durante la prova vita

La corrente si considera negativa durante la fase di scarica, positiva in carica. Come si vede, partendo dallo stato di celle completamente cariche, il modulo presenta inizialmente una certa riluttanza ad accettare la carica, e la corrente massima che riesce ad assorbire durante la fase di carica rapida è inferiore a 180 A. Nella parte iniziale quindi, la quantità di carica erogata in scarica è maggiore di quella assorbita in carica. Il modulo va progressivamente scaricandosi, ma, via via che si va scaricando, diminuisce la sua riluttanza a caricarsi per cui il valore della corrente massima in carica sale, fino a raggiungere 180 A in pochi cicli. Questo comportamento è riportato nella Tabella 8 e nella Figura 15, che ne è la traduzione in forma grafica.

**Tabella 8. Valore massimo della corrente in carica**

N. ciclo	Corrente [A]
1	142.4
2	146.95
3	151.41
4	158.22
5	167.99
6	180.22
7	178.31
8	180.23
9	180.2
10	180.34
11	180.44
12	179.97
13	180.45
14	180.27
15	180.27
16	180.13
17	180.38
18	180.26
19	180.19
20	180.54
21	180.28
22	180.25
23	180.16
24	180.23
25	180.29
26	180.24
27	180.3
28	180.36
29	180.32



**Figura 15. Valore massimo della corrente nella fase di carica**

Il comportamento in scarica è complementare: inizialmente il modulo esegue completamente la scarica (parziale) impostata, ma, via via che va scaricandosi, raggiunge la tensione minima di lavoro prima del limite di tempo impostato, per cui la durata della fase di scarica diminuisce leggermente.

Parallelamente, la quantità di carica erogata nella fase di scarica decresce a partire dal valore 15 Ah, mentre quella assorbita in carica aumenta a partire dal valore 8 Ah, fino a che si raggiunge l'equilibrio della quantità di carica erogata/assorbita intorno a 12 Ah. 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 della carica). La Tabella 9 e la Figura 16 illustrano questo concetto.

**Tabella 9. Equilibrio della carica elettrica**

N. Ciclo	Capacità dsch	Capacità ch
1	14,894	9,236
2	14,896	9,653
3	14,897	9,779
4	14,897	9,998
5	14,898	10,366
6	14,898	10,948
7	14,900	11,637
8	14,076	12,199
9	12,101	12,199
10	12,127	12,232
11	12,069	12,237
12	12,024	12,229
13	12,005	12,220
14	11,881	12,178
15	12,001	12,182
16	12,109	12,218
17	11,851	12,168
18	11,946	12,167
19	11,924	12,156
20	12,02	12,174
21	11,994	12,187
22	11,968	12,189
23	11,906	12,167
24	11,927	12,161
25	11,941	12,16
26	11,905	12,147
27	11,853	12,121
28	11,899	12,121
29	11,966	12,144

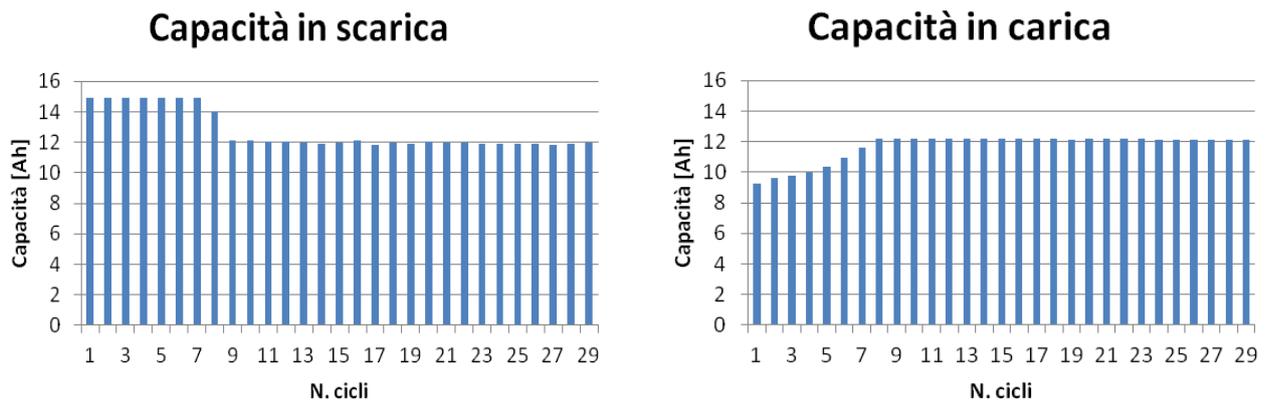


Figura 16. Equilibrio della quantità di carica

Nella Figura 17 invece è mostrato il beneficio conseguito grazie all'impiego della carica rapida. Tale figura è la medesima della Figura 13, in cui viene ingrandito il dettaglio in basso a sinistra, relativo al bilancio della quantità di carica elettrica: come si vede, al momento in cui è stato eseguito il print screen dal pc asservito al ciclatore, è in corso il ciclo 24 (corrispondente a circa 8 ore di funzionamento) e la quantità di carica elettrica erogata è pari a 282 Ah, che è più di 4 volte il valore di capacità nominale del modulo batterie. Grazie alla capacità del modulo di accettare la carica rapida, tale quantità di carica è stata erogata senza necessità di eseguire ricariche complete (ne sarebbero state necessarie 4). Tradotto in termini applicativi, con riferimento ad un mezzo che esegue un servizio di TPL secondo il profilo di lavoro in questione, ciò vuol dire che il sistema batterie del veicolo può erogare una quantità di carica elettrica maggiore della capacità nominale, senza necessità di interruzione del servizio. Si manifesta quindi evidente il ruolo risolutivo della carica rapida nel dare una soluzione al problema della scarsa autonomia dei veicoli elettrici.

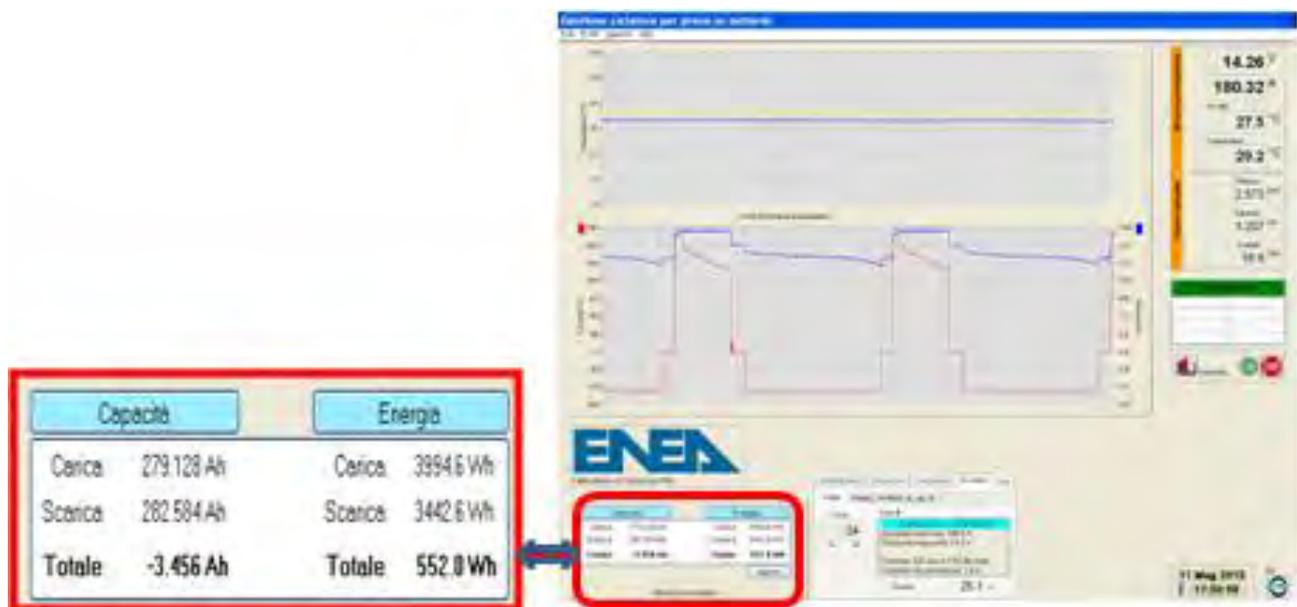


Figura 17. Esempio di bilancio della quantità di carica elettrica

Il check delle prestazioni, effettuato interrompendo periodicamente l'esecuzione del profilo ed eseguendo il ciclo standard per la verifica delle prestazioni di capacità/energia erogata ed efficienza, evidenzia che non è emerso un loro decadimento significativo, come riportato in Tabella 10 e tradotto nei grafici nelle Figure 18 e 19.

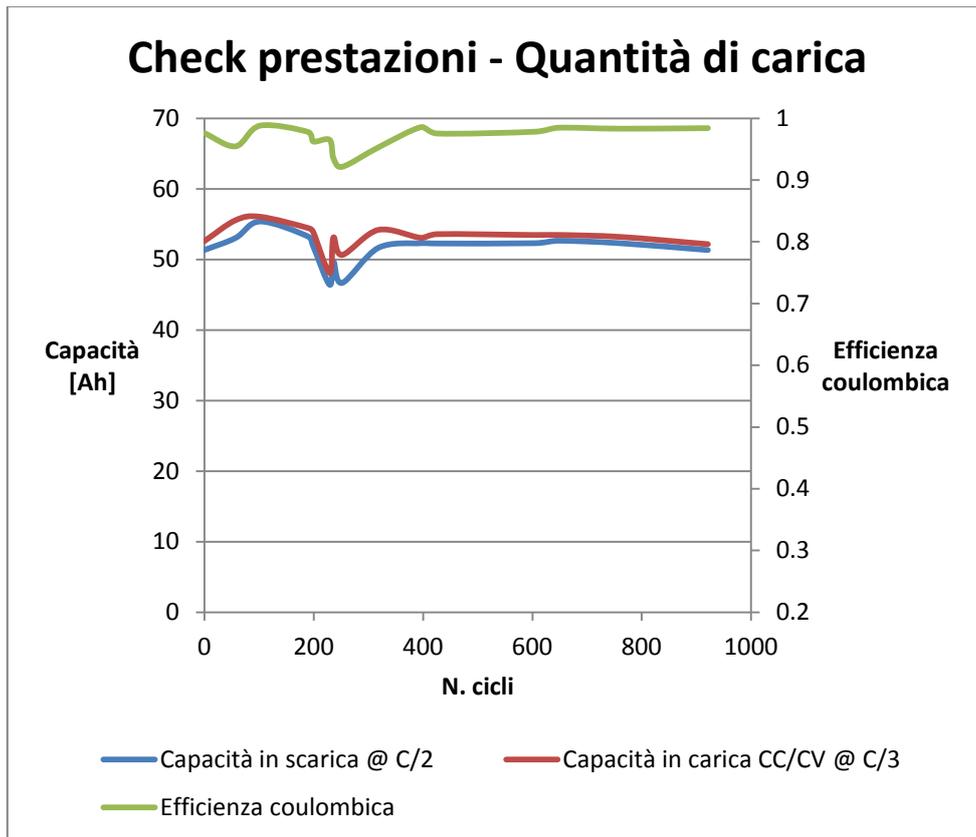


Figura 18. Check periodico delle prestazioni: capacità

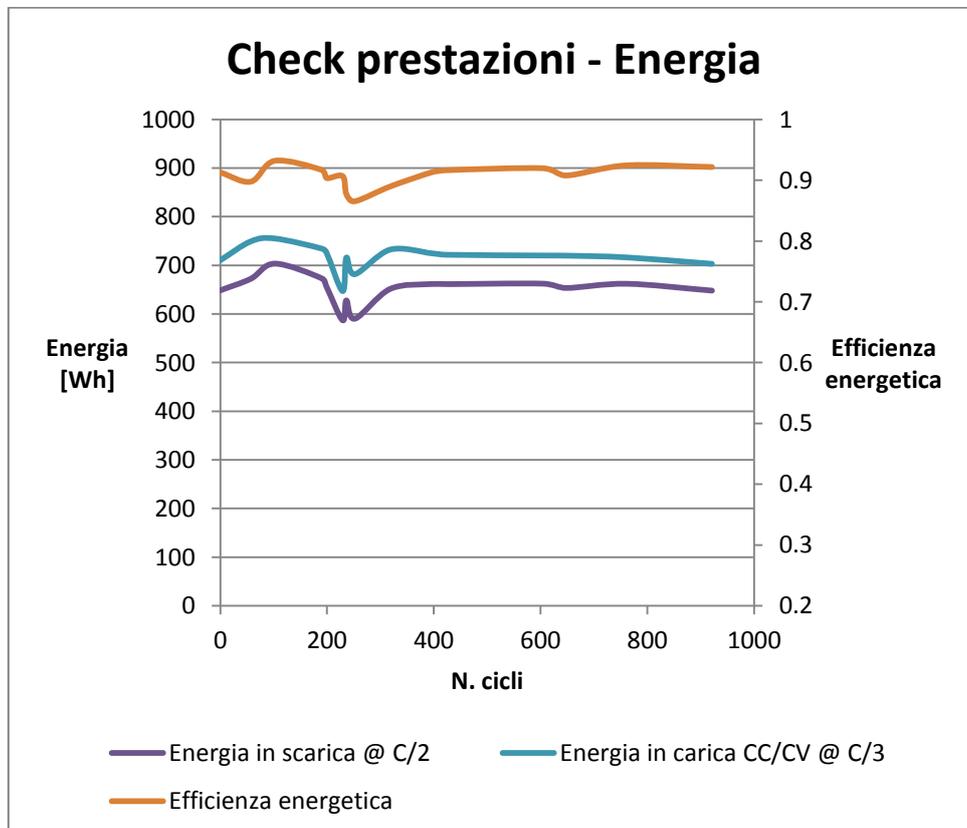


Figura 19. Check periodico delle prestazioni: energia

**Tabella 10. Check periodico delle prestazioni**

N. cicli	Ah dsch	Ah ch	$\eta_c$	Wh dsch	Wh ch	$\eta_e$
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

Sono stati eseguiti circa 1000 cicli, la prova è ancora in corso e terminerà quando nel check periodico si risconterà un valore di capacità erogata dal modulo batterie nel ciclo standard uguale o inferiore all'80% del valore di capacità iniziale, oppure per l'incapacità del modulo stesso di eseguire il profilo di lavoro.

## 2.7 Riscontri applicativi

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

Nel presente paragrafo si dimostra in dettaglio quanto in precedenza accennato circa la compatibilità del profilo di lavoro utilizzato per l'esecuzione della prova vita con una tipologia di missione richiesta dal Trasporto Pubblico Locale.

I dati di progetto sono riportati in Tabella 11.

**Tabella 11. Dati di progetto per missione TPL**

Consumo chilometrico	600	Wh/Km
Velocità media	20	Km/h
Rendimento azionamento	0.8	
Potenza di carica	55	kW

I dati relativi al veicolo sono compatibili con quelli di un minibus tipo Gulliver, Figura 20.

Si tenga presente che il minibus preso come riferimento è equipaggiato con batterie al piombo che pesano 1200 kg. Le batterie sono facilmente sostituibili, e questo consente, al prezzo del raddoppio del costo dell'accumulo, di aumentare l'autonomia del mezzo. Nei dati di progetto riportati in Tabella 11 è stata considerato l'equipaggiamento del minibus con batterie al litio, il che giustifica l'ipotesi di riduzione del dato di consumo chilometrico rispetto al valore con batterie al piombo.

La potenza di carica assunta come dato di progetto è quella di una comune stazione di carica in corrente continua, la cosiddetta CHADeMO (Modo di carica 4 secondo norma CEI – EN 61851-1 "Sistema di carica conduttiva dei veicoli elettrici – Parte 1: Requisiti generali").



Minibus "Gulliver" Tecnobus	
Massa (1200 kg Pb)	6000 kg
Tensione nominale batterie	72 V
Velocità media	20 km/h
Consumo specifico	700 Wh/km

Figura 20. Principali caratteristiche del minibus "Gulliver" della Tecnobus

Si possono impostare le equazioni seguenti:

- equazione del tempo totale, somma del tempo di marcia,  $T_m$ , e del tempo di sosta,  $T_s$ . Assumendo pari ad 1 il tempo totale, ed esprimendo il tempo di marcia e quello di sosta come sue frazioni percentuali, l'equazione diventa:

$$T_m + T_s = 1$$

- equazione dell'energia disponibile per la trazione, pari all'energia accumulata (ovvero, caricata) nel sistema batterie moltiplicata per il rendimento dell'azionamento. L'energia per la trazione può esprimersi col prodotto tra il consumo chilometrico,  $C$ , la velocità media durante il percorso,  $V$ , ed il tempo di marcia. L'energia caricata nel sistema batterie può scriversi come il prodotto tra la potenza di carica,  $P$ , ed il tempo di sosta. Indicando con  $\eta$  il rendimento di azionamento, l'equazione diventa:

$$C \times V \times T_m = P \times T_s \times \eta$$

Risolviendo il sistema delle due equazioni nelle due incognite  $T_m$  e  $T_s$ , si ottengono per  $T_m$  e  $T_s$  i valori:

$$T_s = 0.21; T_m = 0.79$$

Questi valori, in abbinamento al dato di consumo chilometrico, consentono di costruire la Tabella 12 in cui, fissato il numero di volte in cui si vuole percorrere la tratta in un ora, si calcola per ogni scelta il tempo di sosta, il tempo di marcia e la lunghezza della tratta.

Tabella 12. Possibili missioni di TPL

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

Quella riportata nella 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 ed è una missione di effettivo interesse per il Trasporto Pubblico Locale (trasporto ai nodi di una rete di trasporto pubblico, cosiddetto "trasporto nodale"). Adottando una corrente di carica pari a 3C, cioè una corrente che teoricamente carica le batterie in 20' (1/3 di ora), l'energia,  $E$ , che corrisponde alla potenza di carica è espressa dal prodotto della potenza per il tempo e vale pertanto:

$$E = 55 \times \frac{1}{3} = 18.3 \text{ kWh}$$

Utilizzando moduli batterie da 12.8 V – 60 Ah, cui corrisponde un'energia nominale pari a 0.768 kWh, tale valore dell'energia corrisponde a 24 moduli.

L'impiego di 24 moduli batterie, ciascuno da 12.8 V – 60 Ah, che accettano carica a 3C, consente quindi di realizzare la missione suddetta.

Nel profilo di lavoro utilizzato per la prova vita, molto vicino a quello della riga 3 in Tabella 12, i 15' di scarica simulano la marcia durante la quale il mezzo percorre l'anello 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 a corrente massima 3C simulano la carica rapida al capolinea (ripristino della quantità di carica necessaria a compiere il percorso) ed il successivo 1' di pausa simula il distacco del veicolo dalla struttura di carica.

### 2.7.2 Implementazione su minibus di un sistema batterie multi stringa multi modulo

Nel paragrafo precedente è stato mostrato che un sistema batterie costituito da 24 moduli 12.8 V – 60 Ah, installato su di un minibus tipo il "Gulliver" della Tecnobus, rende possibile l'attuazione di una missione di Trasporto Pubblico Locale in cui il mezzo è in servizio su una tratta di 4 ÷ 5 km con carica nei pochi minuti di sosta al capolinea della carica elettrica necessaria per effettuare il percorso.

Il Laboratorio "Sistemi e Tecnologie per la Mobilità e l'Accumulo", in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione dell'Università di Pisa, sta realizzando, nell'ambito del "Progetto ENEA-CNR per lo sviluppo del tessuto produttivo del Mezzogiorno", un sistema batterie complesso costituito per l'appunto da 24 moduli 12.8 V – 60 Ah: tale 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, all'interno della medesima stringa e tra stringhe diverse) e, come naturale prosecuzione di quanto mostrato nel presente documento, il sistema batterie, una volta terminato e testato, verrà installato a bordo di un minibus Gulliver messo a disposizione dal Centro Ricerche per il Trasporto e la Logistica dell'Università "La Sapienza" di Roma.

Detto sistema batterie è costituito mediante 4 stringhe da 72 V – 60 Ah ciascuna, connesse in parallelo, per un totale di 72 V – 240 Ah. Ciascuna stringa è la serie di 6 moduli da 12 V – 60 Ah ciascuno, per un totale di stringa pari a 72 V (tensione di lavoro dell'azionamento del minibus) – 60 Ah. Il sistema è alloggiato nei due vani che precedentemente ospitavano il sistema di batterie al piombo originario del minibus. Da notare che la sostituzione delle batterie al piombo con quelle al litio comporta una diminuzione di peso da 1200 kg a 404 kg (132 kg di batterie al litio in ogni cassone a cui si aggiungono 70 kg di peso del cassone stesso) e ciò giustifica la riduzione del consumo chilometrico, peraltro piuttosto conservativa, assunta a base del calcolo riportato nel paragrafo precedente.

La Figura 21 illustra la rappresentazione tridimensionale del sistema batterie, mentre le Figure 22 e 23 mostrano rispettivamente i particolari costruttivi della scatola elettronica di controllo e di un vano porta batterie con ivi alloggiati i moduli.



**Figura 21. Rappresentazione tridimensionale del sistema batterie composto da 24 moduli 12 V – 60 Ah ed alloggiato nei due vani porta batterie**



**Figura 22. Vista interna della scatola elettronica di controllo**

Nella Figura 22 sono visibili i punti di connessione dei terminali negativi e positivi delle singole stringhe e le barre che realizzano il collegamento in parallelo delle stringhe. Dalla parte del polo negativo, tra la barra che realizza il parallelo e i punti di connessione dei terminali negativi delle singole stringhe, sono posti dei fusibili, uno per ogni stringa, mentre un altro fusibile è interposto tra la suddetta barra del parallelo ed il contattore con cui si rende accessibile il polo negativo dell'intero sistema batterie. Dalla parte del polo positivo, è posto un contattore per ogni stringa tra il terminale positivo della stringa e la barra che realizza il parallelo. Anche in questo caso, il polo positivo viene reso accessibile attraverso un contattore. Nella Figura 22 è anche visibile la scheda elettronica, ove risiede l'«intelligenza» per la gestione del parallelo tra le stringhe.



**Figura 23. Vano porta batteria completo di moduli**

Il sistema batterie è nella parte finale della realizzazione, Figura 23, ed ha iniziato i primi collaudi. Se la prova vita riportata nel presente documento continuerà con esito positivo, essa verrà ripetuta a livello di sistema batterie completo direttamente a bordo del minibus marciante.

### 3 Conclusioni

L'applicazione di un profilo di lavoro che include la carica rapida su un modulo batterie particolarmente adatto ad esaltarne gli effetti, consente di trarre alcune conclusioni.

L'applicazione di un'alta corrente di carica determina corrispondentemente un'inevitabile incremento di sovratensione dovuto al prodotto del valore di corrente per il valore di resistenza. Da notare che a determinare il valore di resistenza concorre sia la resistenza interna della batterie che la resistenza di contatto, quindi è molto importante il contatto tra il polo della cella e l'elemento ad esso collegato (connessione con altra cella o terminale del modulo). La qualità del contatto è un fattore, quindi, che sicuramente non può essere trascurato alle alte correnti.

Per effetto dell'incremento di tensione si determina lo spostamento "verso l'alto" del punto di lavoro, per cui tale aumento di tensione può avvenire senza superare la soglia di tensione massima solamente quando lo stato di carica è basso. Ovvero, l'applicazione di alte correnti di carica può essere sostenuta dal sistema d'accumulo senza superare la soglia di tensione massima soltanto se e quando il sistema d'accumulo si trova a bassi SOC (da circa il 30% in giù, come mostrato in precedenza, nel caso dell'esperienza eseguita nella presente attività). Ciò vuol dire che, come tipologia di carica, non è possibile applicare la "carica a corrente costante" per tutti gli stati di carica, ma è necessario sostituire quest'ultima con la "carica a corrente costante/tensione costante": con tale metodo, il dispositivo di carica fornisce al sistema d'accumulo la massima corrente che esso può accettare senza superare il limite di tensione massima e mantiene tale valore di corrente finché la tensione raggiunge, ma non supera, il suo valore massimo (fase a corrente costante) dopodiché riduce dinamicamente la corrente mantenendo costante il valore di tensione fino alla fine della carica (fase a tensione costante). Come mostrato nel testo, il valore di corrente massima assorbita dal sistema d'accumulo durante la fase di carica aumenta con il diminuire dello stato di carica.

Un altro requisito del sistema d'accumulo imposto dalla carica rapida è l'equalizzazione delle celle. Infatti, a causa dell'incremento di tensione dovuto all'elevata corrente di carica, le celle si portano in prossimità della tensione massima ed è molto importante che i rispettivi livelli di tensione siano tra loro molto vicini per evitare che anche una sola di esse superi il limite di tensione massima (ciò determinerebbe l'immediata interruzione della carica stessa ad opera del sistema elettronico di gestione e controllo del sistema d'accumulo). Inoltre, la bassa dispersione dei valori di tensione aiuta ad aumentare la quantità di carica che si riesce ad immettere nel sistema d'accumulo, in quanto le celle raggiungono tutte insieme la condizione di fine carica, cioè si caricano tutte completamente, mentre nel caso opposto una sola cella raggiungerebbe la condizione di fine carica (determinando così la fine della carica per tutto il sistema) con le altre celle ancora potenzialmente in grado di accettare carica.

Nel caso in esame, il sistema elettronico che gestisce e controlla le celle dal punto di vista elettrico e termico fa sì che durante l'esecuzione del profilo di lavoro con carica rapida la tensione e la temperatura delle celle rimangano nei limiti di normale funzionamento: ciò ha consentito l'esecuzione di circa 1000 cicli senza provocare un degrado significativo delle prestazioni. Pertanto la carica rapida sembra, al momento, tecnicamente fattibile. Le prove continueranno sino a raggiungere la condizione di fine vita, corrispondente ad una riduzione delle prestazioni pari al 20% rispetto ai valori di inizio prova.

E' stato mostrato che il particolare profilo di lavoro con carica rapida, utilizzato per la prova vita del modulo batterie, può avere come riscontro applicativo il caso di un minibus, tipo il "Gulliver" della Tecnobus, in servizio su una tratta di pochi chilometri, che nei pochi minuti di sosta al capolinea carica le batterie per la quantità di energia necessaria a compiere il percorso. Questo genere di servizio corrisponde ad una tipologia di missione effettivamente richiesta dal Trasporto Pubblico Locale (trasporto nodale). Il bilancio della quantità di carica elettrica per un giorno di esercizio mostra che la carica rapida consente al sistema d'accumulo di erogare una quantità di carica molte volte superiore alla sua capacità nominale, senza interposizione di ricariche lente e complete: ciò vuol dire che il mezzo può svolgere la propria missione giornaliera senza interruzione del servizio per la sostituzione del pacco batterie come nel mezzo originale. Tutto il presente lavoro è stato infatti impostato pensando ad un tipo di carica rapida che potesse avere un riscontro applicativo: invece che parlare di carica intesa in senso assoluto, appare più corretto parlare di carica rapida correlata al correlata al tipo di veicolo e di missione che esso dovrà svolgere. Non è la carica

rapida in sé ad avere successo, quanto il connubio “carica rapida – batterie - veicolo – missione” nel suo insieme. In questo senso la carica rapida si colloca come valido elemento d’ausilio per risolvere il problema della scarsa autonomia dei veicoli elettrici.

Per giungere ad una completa conferma di tutto quanto sopra riportato, il programma di lavoro ha però necessità di essere continuato, con la prosecuzione della prova vita sul modulo batterie fino alla conclusione. La curva di decadimento delle prestazioni risultante dalla sperimentazione, infatti, non si è dimostrata, come ipotizzato all’inizio, una spezzata di due rette, la prima relativa alle prove con carica ad 1.5C, la seconda relativa alle prove “accelerate” con carica 3C. Nel caso della carica ad 1.5C si è ottenuta una retta praticamente orizzontale, mentre nel caso della carica a 3C la curva di decadimento presenta notevoli oscillazioni verso il basso e verso l’alto nella parte iniziale, ove molto influenti sono state le problematiche di messa a punto del modulo (bilanciamento delle celle) e della catena di misura (sensore di corrente del BMS, misuratore di corrente nel ciclatore) e solo dopo i primi 400 cicli ha iniziato ad assumere un andamento ben delineato. Allo stato attuale non è quindi possibile definire un parametro indicativo del rapporto esistente tra lo stress cui è sottoposta la batteria e la vita della stessa, per dare una prima risposta al problema della determinazione del costo “a fine vita” della batteria di un veicolo elettrico utilizzato con modalità di carica rapida.

Infine, la prosecuzione della prova sino al raggiungimento della condizione di fine vita, e naturalmente il suo esito, destano interesse per l’implementazione su minibus del sistema batterie composto da 24 moduli come quello utilizzato per l’esecuzione del test, e la realizzazione finale, con veicolo marciante, di un’esperienza reale di carica rapida.

## 4 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. Ceraolo, T. Huria, C. Zappacosta, " Sviluppo di moduli integrati, completi di BMS", Report RdS/2011/318, [www.enea.it](http://www.enea.it)
- 5 F. Vellucci, G. Pede, "Sviluppo di moduli batterie litio-ioni per avviamento e trazione non auto motive", Report RdS/2011/27, [www.enea.it](http://www.enea.it)
- 6 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](http://www.enea.it)
- 7 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](http://www.enea.it)
- 8 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](http://www.enea.it)
- 9 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](http://www.enea.it)
- 10 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](http://www.enea.it)

## 5 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, $\text{LiFePO}_4$
$\eta$	efficienza dell'azionamento
$\eta_c$	efficienza coulombica
$\eta_e$	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
SOC	stato di carica
$T_m$	tempo di marcia
TPL	trasporto Pubblico Locale
$T_s$	tempo di sosta
V	velocità
$V_n$	tensione nominale