



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia
e lo sviluppo economico sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Sviluppo e realizzazione di moduli batterie litio-ioni per avviamento e
trazione non automotive

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

Report RdS/2012/087

SVILUPPO E REALIZZAZIONE DI MODULI BATTERIE LITIO-IONI PER AVVIAMENTO E TRAZIONE NON
AUTOMOTIVE

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

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

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

Progetto: Studio per lo sviluppo di materiali innovativi per il risparmio di energia nel settore elettrico
con particolare attenzione ai materiali per i mezzi di trasporto collettivi: nuovi materiali e componenti
innovativi per i mezzi di trasporto

Responsabile del Progetto: Giuseppe Barbieri, ENEA

Indice

Sommario	4
<i>Introduzione</i>	<i>6</i>
Descrizione delle attività svolte e risultati	8
1. <i>Prove sulle batterie</i>	<i>8</i>
1.1 <i>Descrizione delle batterie testate</i>	<i>8</i>
1.2 <i>Apparecchiature adottate</i>	<i>9</i>
1.3 <i>Procedure utilizzate</i>	<i>10</i>
1.4 <i>Capacità ed energia a differenti regimi di scarica e temperature</i>	<i>11</i>
1.5 <i>Carica rapida</i>	<i>13</i>
1.6 <i>Resistenza interna</i>	<i>14</i>
1.7 <i>Prova di avviamento a freddo</i>	<i>16</i>
2. <i>Caratterizzazione termica delle batterie e sistema di gestione termica dei moduli batterie</i>	<i>18</i>
2.1 <i>Analisi termografica</i>	<i>18</i>
2.2 <i>Impianto sperimentale BA.CO. (BAttery COoling)</i>	<i>24</i>
2.3 <i>Impianto per prova di raffreddamento con acqua</i>	<i>28</i>
2.4 <i>Prove di raffreddamento ad aria e ad acqua</i>	<i>30</i>
2.5 <i>Sistema di raffreddamento dei moduli batterie</i>	<i>32</i>
3. <i>Prove di BMS commerciali</i>	<i>33</i>
3.1 <i>BMS n. 1</i>	<i>33</i>
3.2 <i>BMS n. 2</i>	<i>36</i>
3.3 <i>BMS n. 3</i>	<i>38</i>
3.4 <i>BMS n. 4</i>	<i>41</i>
3.5 <i>Perfezionamento della specifica di fornitura del BMS.....</i>	<i>45</i>
4. <i>Realizzazione dei moduli batterie</i>	<i>47</i>
Conclusioni	52
Riferimenti bibliografici	53
Abbreviazioni ed acronimi	54

Sommario

Obiettivo della presente annualità dell'Accordo di Programma era lo sviluppo di moduli standard da 12V, realizzati con batterie al LiFePO_4 individuate nel PAR precedente. Per modulo si intende l'insieme costituito da quattro batterie connesse in serie, più il sistema elettronico di controllo BMS (Battery Management System), il sistema di raffreddamento e la meccanica. Per standard si intende che lo stesso modulo può essere impiegato per più applicazioni: lo studio dello scorso anno, infatti, ha dimostrato che realizzando tre moduli standard, uno da 30Ah (piccola taglia), uno da 60Ah (media taglia) ed uno da 100Ah (grande taglia) è possibile raggiungere i livelli di tensione/amperora richiesti da tutte le possibili applicazioni nel campo dell'avviamento/alimentazione ausiliari (anche nel settore nautico) e trazione di veicoli elettrici off-road. Più moduli della stessa tipologia possono essere connessi in combinazioni serie/parallelo per costruire sistemi batterie con le caratteristiche richieste.

A proseguimento di quanto svolto nel PAR2010, in conformità con quanto pianificato, sono state svolte le seguenti attività:

- esecuzione di prove su campioni delle batterie al litio selezionate nell'anno precedente, per confermarne la possibilità di impiego nelle applicazioni individuate (avviamento e trazione di veicoli elettrici off-road);
- studio del comportamento termico delle batterie e definizione della modalità di raffreddamento (ad aria, o ad acqua) più efficace per il modulo batterie sopra definito;
- valutazione in esercizio di BMS commerciali di varie tipologie, al fine di scegliere quella più idonea ed emettere le specifiche definitive per il sistema elettronico di controllo (BMS) del modulo batterie;
- realizzazione del BMS, del sistema di raffreddamento e della struttura meccanica per la costruzione di: un modulo di avviamento 12V – 30Ah, un modulo di trazione 12V – 30Ah, un modulo di avviamento 12V – 60Ah, un modulo di trazione 12V – 60Ah, un modulo di trazione 12V-100Ah, un dimostratore consistente in un sistema batterie 48V – 100Ah (adatto per l'alimentazione di un piccolo mezzo da giardinaggio) costituito dalla connessione in serie di 4 moduli di grande taglia.

Le batterie hanno risposto in modo soddisfacente alla campagna di prove a cui sono state sottoposte e pertanto sono state confermate per il proseguimento dell'attività.

Le prove di caratterizzazione a bassa temperatura e le prove d'avviamento a freddo hanno dimostrato che non è necessario un riscaldamento durante il funzionamento a freddo, mentre la caratterizzazione termica ad alta temperatura condotta sulle singole batterie e l'analisi termica condotta prima a livello di singola batteria e poi a livello di modulo, hanno dimostrato che il modulo ha limitate esigenze di raffreddamento ed è sufficiente uno scambio termico ad aria. Sulla base di queste considerazioni, il sistema di gestione termica del modulo è stato realizzato mediante ventilazione forzata.

Relativamente al sistema elettronico di controllo BMS (Battery Management System), sono stati provati in esercizio tre sistemi commerciali rappresentativi dello stato dell'arte, due con bilanciamento di tipo passivo ed uno di tipo semiattivo. Inoltre, l'Università di Pisa ha fornito un BMS di propria concezione, con bilanciamento di tipo attivo. A valle del confronto tecnico-economico che ne è scaturito, è stato deciso di adottare nel modulo batterie finale il sistema di controllo con bilanciamento di tipo attivo e sono state formalizzate all'Università di Pisa le richieste per trasformare/specializzare il BMS inizialmente fornito in prova secondo le particolarità dell'applicazione nei moduli batterie: sulla base di tali richieste l'Università di Pisa ha realizzato la progettazione della versione finale del BMS.

Una volta definiti il sistema elettronico di controllo e quello di raffreddamento, si è proceduto alla realizzazione della struttura esterna per l'alloggiamento delle quattro batterie, i ventilatori, la scheda elettronica di controllo ed i collegamenti di segnale e di potenza.

Come da programma, sono stati realizzati un modulo per avviamento di piccola taglia (30Ah) ed uno di grande taglia (60Ah), un modulo per trazione di veicoli off-road di piccola taglia (30Ah), uno di media taglia (60Ah) ed uno di grande taglia (100Ah). Inoltre, come dimostratore è stato realizzato un sistema batterie da 48V – 100Ah, costituito da quattro moduli standard per trazione di grande taglia (100Ah) connessi in serie, ciascuno dotato del proprio BMS di modulo, con un modulo che assume il ruolo di BMS master.

Introduzione

Il Presente report si inquadra nella Ricerca di Sistema Elettrico svolta dall'ENEA nell'ambito del relativo Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA.

La Ricerca di Sistema ha come obiettivo l'innovazione del Sistema Elettrico per migliorarne l'economicità, la sicurezza e la compatibilità ambientale, assicurando al Paese le condizioni per uno sviluppo sostenibile.

Nell'Accordo di Programma sono previsti temi di ricerca fondamentale e studi di carattere sistemico e prenormativo a totale beneficio dell'utente di sistema elettrico nazionale.

Le ricerche sono condotte dall'ENEA in collaborazione con le principali Istituzioni universitarie nazionali e con le partecipate SOTACARBO e FN Nuove Tecnologie Avanzate.

L'accordo è meglio definito da un piano annuale di realizzazione, suddiviso in Attività. Ogni attività ha un contesto scientifico-programmatico di riferimento, suddiviso in aree e tematiche di ricerca, in ognuna delle quali sono definiti specifici progetti di ricerca, a loro volta suddivisi in obiettivi da perseguire.

Nel dettaglio, l'inquadramento programmatico completo del presente report è il seguente:

- Accordo di Programma MSE-ENEA: Attività di ricerca e sviluppo di interesse generale per il sistema elettrico nazionale.
- Piano Triennale 2009-2011.
- Piano annuale di realizzazione Terza annualità (2011-2012): da realizzarsi tra l'ottobre 2011 ed il settembre 2012.
- Attività: Risparmio di energia elettrica nei mezzi di trasporto: nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto.
- Area di riferimento: razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica.
- Tematica di ricerca: risparmio di energia elettrica nei mezzi di trasporto elettrici.
- Progetto 3.5: studio per lo sviluppo di materiali innovativi per il risparmio di energia nel settore elettrico con particolare attenzione ai materiali per i mezzi di trasporto collettivi: nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto.
- Obiettivo A: Sviluppo di moduli integrati, completi di BMS ed accumulo misto.

Il lavoro presentato in questo report riguarda la quota parte dell'obiettivo A relativa allo sviluppo di moduli integrati, completi di BMS; la parte relativa ai sistemi d'accumulo misto è oggetto di un report separato.

Come detto, obiettivo dell'attività è lo sviluppo di moduli standard da 12V, realizzati con batterie al LiFePO_4 individuate nel PAR precedente [1]. Per modulo si intende l'insieme costituito da quattro batterie connesse in serie, più il sistema elettronico di controllo BMS, il sistema di raffreddamento e la meccanica. Per standard si intende che lo stesso modulo può essere impiegato per più applicazioni: lo studio dello scorso anno, infatti, ha dimostrato che realizzando tre moduli standard, uno da 30Ah (piccola taglia), uno da 60Ah (media taglia) ed uno da 100Ah (grande taglia) è possibile raggiungere i livelli di tensione/amperora richiesti da tutte le possibili applicazioni convenzionali nel campo dell'avviamento/alimentazione ausiliari (anche nel settore nautico) e trazione di veicoli elettrici off-road. Più moduli della stessa tipologia possono essere connessi (o integrati, come recita il titolo) in combinazioni serie/parallelo per costruire sistemi batterie con le caratteristiche richieste.

A proseguimento di quanto svolto nel PAR2010, l'obiettivo prevedeva le seguenti attività:

- esecuzione di prove su campioni delle batterie al litio selezionate nell'anno precedente, per confermarne la possibilità di impiego nelle applicazioni individuate (avviamento e trazione di veicoli elettrici off-road);
- studio del comportamento termico delle batterie e definizione della modalità di raffreddamento (ad aria, o ad acqua) più efficace per il modulo batterie sopra definito;
- valutazione in esercizio di BMS (Battery Management System) commerciali di varie tipologie, al fine di scegliere quella più idonea ed emettere le specifiche definitive per il sistema elettronico di controllo (BMS) del modulo batterie;
- realizzazione del BMS (Battery Management System), del sistema di raffreddamento e della struttura meccanica per la costruzione di: un modulo di avviamento 12V – 30Ah, un modulo di trazione 12V – 30Ah, un modulo di avviamento 12V – 60Ah, un modulo di trazione 12V – 60Ah, un

modulo di trazione 12V-100Ah, un dimostratore consistente in un sistema batterie 48V – 100Ah (adatto per l'alimentazione di un piccolo mezzo da giardinaggio) costituito dalla connessione in serie di 4 moduli di grande taglia.

Descrizione delle attività svolte e risultati

1. Prove sulle batterie

Lo studio dell'annualità precedente aveva individuato le batterie litio-ioni con tecnologia catodica LiFePO_4 come particolarmente adatte per applicazioni d'avviamento, in virtù del campo di lavoro in tensione e della elevata corrente di spunto [2]. Tale tipologia di batterie si è dimostrata altresì conveniente per applicazioni di trazione per veicoli elettrici off-road [1]. In particolare, sono stati selezionati i modelli di capacità 30, 60 e 100Ah costruiti dalla società cinese Hipower Energy Group, di cui lo scorso anno sono stati acquistati alcuni esemplari, che nella presente annualità sono stati sottoposti ad una campagna di prove per verificare la rispondenza delle prestazioni con quanto indicato dal Costruttore e l'idoneità all'impiego per le suddette applicazioni.

1.1 Descrizione delle batterie testate

Le batterie sottoposte alla campagna di prove sono del tipo litio-ioni con chimica LiFePO_4 e tensione nominale 3.2V. Le caratteristiche tecniche dichiarate dal Costruttore sono riassunte di seguito.

Tab. 1 – Principali caratteristiche della batteria da 30Ah		
<i>Specifica</i>		<i>Valore</i>
Tensione [V]		3,2
Capacità nominale [Ah]		30
Dimensioni (L x W x H) [mm]		103 x 58 x 168
Peso [kg]		1,15
Energia [Wh]		96
Densità di energia [Wh/dm ³]		95
Energia specifica [Wh/kg]		83
Temperatura di esercizio in scarica		-20 ÷ +65°C
Temperatura di esercizio in carica		0 ÷ +45°C
Scarica @ +23°C	Massima corrente continuativa [A]	90
	Picco @ 60 sec [A]	150
	Cut-off [V]	2,5
Carica @ +23°C	Metodo di carica	CC/CV (3,65V)
	Massima corrente di carica [A]	30
	Cut-off [V]	3,85

Tab. 2 – Principali caratteristiche della batteria da 60Ah		
<i>Specifica</i>		<i>Valore</i>
Tensione [V]		3,2
Capacità nominale [Ah]		60
Dimensioni (L x W x H) [mm]		114 x 61 x 203
Peso [kg]		2,04
Energia [Wh]		192
Densità di energia [Wh/dm ³]		136
Energia specifica [Wh/kg]		94
Temperatura di esercizio in scarica		-20 ÷ +65°C
Temperatura di esercizio in carica		0 ÷ +45°C
Scarica @ +23°C	Massima corrente continuativa [A]	180
	Picco @ 60 sec [A]	300
	Cut-off [V]	2,5
Carica @ +23°C	Metodo di carica	CC/CV (3,65V)
	Massima corrente di carica [A]	60
	Cut-off [V]	3,85

Tab. 3 – Principali caratteristiche della batteria da 100Ah		
<i>Specifica</i>		<i>Valore</i>
Tensione [V]		3,2
Capacità nominale [Ah]		100
Dimensioni (L x W x H) [mm]		163 x 51 x 278
Peso [kg]		3,40
Energia [Wh]		320
Densità di energia [Wh/dm ³]		138
Energia specifica [Wh/kg]		94
Temperatura di esercizio in scarica		-20 ÷ +65°C
Temperatura di esercizio in carica		0 ÷ +45°C
Scarica @ +23°C	Massima corrente continuativa [A]	300
	Picco @ 60 sec [A]	500
	Cut-off [V]	2,5
Carica @ +23°C	Metodo di carica	CC/CV (3,65V)
	Massima corrente di carica [A]	100
	Cut-off [V]	3,85

1.2 Apparecchiature adottate

Le prove sono state eseguite presso il Laboratorio Prova Batterie dell'unità UTTEI-VEBIM (Unità Tecnica Nuove Tecnologie per l'Energia e l'Industria – Laboratorio Veicoli a Basso Impatto Ambientale) del Centro Ricerche ENEA "Casaccia".

La funzione di carica e scarica programmabile è stata realizzata mediante l'impiego del ciclatore Eltra E-8376 (Fig. 1), le cui caratteristiche nominali sono tensione 0 ÷ 330V, corrente 0÷400A, e del ciclatore portatile Eltra E-8325 (Fig. 2), 0 ÷ 12V, 80A_{max} in carica 150A_{max} in scarica, mentre le condizioni di temperatura sono state assicurate collocando la batteria in prova all'interno della camera climatica Angelantoni modello UY2250SP, il cui campo di lavoro -40 ÷ +100°C, umidità relativa 15% ÷ 98%.



Fig- 1 – Ciclatore E-8376 (destra) e camera UY2250 (sinistra)



Fig- 2 – Ciclatore portatile E-8325

I ciclatori sono gestiti dal software Eltra S276, che si occupa dell’interfaccia con l’operatore e dell’attuazione dei cicli di lavoro impostati: i dati acquisiti sono registrati in un file CSV in cui, per ogni fase del profilo di lavoro, e per ogni istante di acquisizione, sono riportati il valore progressivo del tempo di fase, la tensione di batteria, la corrente, la capacità, l’energia ed, infine, il valore progressivo della capacità e dell’energia in carica e scarica, come sotto rappresentato.

Data	Ciclo	Fase	mciclo	Tempo	Tensione	Corrente	Capacità	Energia	Cap.C	Energ.C	Cap.S	Energ.S
				s	V	A	Ah	kWh	Ah	kWh	Ah	kWh

La frequenza di acquisizione è impostabile dall’operatore, con valore massimo pari a 5 Hz. E’ anche possibile assegnare alla frequenza di acquisizione valori diversi in corrispondenza a fasi diverse del ciclo di lavoro.

1.3 Procedure utilizzate

Le procedure utilizzate sono tratte dalla metodologia EUCAR e dalla “Procedura di prova comune per il gruppo di coordinamento CNR-ENEA-RSE”.

Inizialmente la batteria è stata sottoposta a vari cicli di formazione in modo da essere sicuri di aver raggiunto un’adeguata stabilizzazione della stessa. La batteria è stata considerata “formata”, in accordo con le procedure EUCAR, quando i valori della capacità rilevata durante due scariche consecutive non differiscono più del 3 %.

Inoltre prima di ogni prova è stato effettuato un ciclo standard, consistente nella scarica a corrente costante C/2 (cioè ad un’intensità di corrente pari alla metà del valore di capacità nominale C), cui segue una pausa di 1 h e successivamente la ricarica CC/CV (corrente costante/tensione costante) a C/3 (cioè ad un’intensità di corrente pari alla metà del valore di capacità nominale C, in generale con nC o C/n si intende

il valore di corrente rispettivamente pari ad n volte C o a C diviso n), per portare la batteria al medesimo stato di riferimento prima di ogni prova.

1.4 Capacità ed energia a differenti regimi di scarica e temperature

La capacità in carica elettrica, misurata in Ah, è il parametro di riferimento principale della batteria. Nel caso di un pacco di batterie, le capacità delle singole batterie dovrebbero essere simili, per evitare un comportamento non uniforme che comporterebbe una distribuzione non omogenea delle tensioni parziali (tensioni delle singole batterie) con diminuzione delle prestazioni del pacco.

La quantità di energia accumulata nella batteria è un altro dei fattori più importanti ai fini delle prestazioni di un veicolo elettrico.

La rilevazione della capacità e dell'energia erogata è stata effettuata sottoponendo la batterie in prova ad un ciclo completo di carica e scarica in cui sono stati registrati con frequenza di acquisizione 1 Hz i valori di tensione e corrente rilevati ai morsetti. Il valore di capacità, calcolato come integrale della corrente nel tempo, è fornito direttamente dal ciclatore, mentre l'energia, integrale nel tempo della potenza, è stata calcolata come somma dei prodotti $V \cdot I$ (in tal modo si commette l'approssimazione che nell'intervallo di tempo, un secondo, tra due acquisizioni successive, la tensione V e la corrente I si mantengano costanti)

Partendo dallo stato di batteria completamente carica, è stata effettuata la scarica a corrente costante al valore corrispondente al C-rate di prova, cui è seguita una fase di riposo della durata di un'ora, dopodiché la batteria è stata ricaricata completamente in condizioni di carica standard (in accordo alle specifiche del Costruttore, carica a corrente costante (CC) pari a C/3 fino a raggiungere il limite della soglia di tensione, poi a tensione costante (CV) e corrente via via decrescente fino al valore 1 A). Il rendimento è definito come il rapporto tra la l'energia erogata durante la scarica e quella che successivamente è necessario fornire alla batteria per ripristinare lo stato di carica completa: il suo complemento ad uno definisce la frazione di energia che viene dissipata in perdite interne alla batteria.

Tutte le prove sono state effettuate alle temperatura di 0°C, +23°C (temperatura ambiente, RT, room temperature) e 40°C: per ciascun modello di batteria, sono state effettuate scariche per i valori di corrente 1C, 2C e 3C (valore massimo continuativo della corrente di scarica consentito dal Costruttore). I risultati sono mostrati nelle tabelle e grafico seguenti:

Tab. 4 – Prove di capacità: batteria da 30Ah				
Descrizione	Temperatura [°C]	Capacità [Ah]	Energia [Wh]	Rendimento energetico
Scarica 1C	0	sca: 24,37	sca: 74,6954	0,888061
		car: 23,11	car: 84,11068	
Scarica 2C	0	sca: 24,12	sca: 69,2473	0,834413
		car: 22,78	car: 82,98923	
Scarica 3C	0	sca: 22,84	sca: 61,704	0,77974
		car: 21,70	car: 79,13407	
Scarica 1C	+23	sca.: 29,910	sca: 94,5708	0,939612
		car.: 29,440	car: 100,6487	
Scarica 2C	+23	sca.: 29,550	sca: 90,0218	0,906497
		car.: 29,055	car: 99,30732	
Scarica 3C	+23	sca.: 28,720	sca: 84,5964	0,876502
		car.: 28,170	car: 96,51592	
Scarica 1C	+ 40	sca: 30,43	sca: 99,1652	0,927711
		car: 30,30	car: 106,8923	
Scarica 2C	+ 40	sca: 30,43	sca: 94,1173	0,885394
		car: 30,11	car: 106,2999	
Scarica 3C	+ 40	sca: 29,66	sca: 86,4059	0,829987
		car: 29,46	car: 104,1051	

Tab. 5 – Prove di capacità: batteria da 60Ah				
Descrizione	Temperatura [°C]	Capacità [Ah]	Energia [Wh]	Rendimento energetico
Scarica 1C	0	sca: 51,44	sca: 151,708	0,822846
		car: 50,66	car: 184,3697	
Scarica 2C	0	sca: 52,97	sca: 143,443	0,75287
		car: 52,52	car: 190,5283	
Scarica 3C	0	sca: 50,04	sca: 118,706	0,656852
		car: 49,71	car: 180,7189	
Scarica 1C	+23	sca: 61,36	sca: 176,239	0,810336
		car: 61,41	car: 217,4888	
Scarica 2C	+23	sca: 59,44	sca: 165,809	0,81501
		car: 59,26	car: 203,4442	
Scarica 3C	+23	sca: 60,16	sca: 165,913	0,761763
		car: 60,05	car: 217,8006	
Scarica 1C	+ 40	sca: 60,57	sca: 187,292	0,870515
		car: 60,06	car: 215,1507	
Scarica 2C	+ 40	sca: 58,93	sca: 166,703	0,791669
		car: 58,76	car: 210,5712	
Scarica 3C	+ 40	sca: 58,37	sca: 149,857	0,718089
		car: 58,33	car: 208,6884	

Tab. 6 – Prove di capacità: batteria da 100Ah				
Descrizione	Temperatura [°C]	Capacità [Ah]	Energia [Wh]	Rendimento energetico
Scarica 1C	0	sca: 89,23	sca: 267,418	0,848981
		car: 86,36	car: 314,9864	
Scarica 2C	0	sca: 86,96	sca: 234,965	0,753812
		car: 85,87	car: 311,702	
Scarica 3C	0	sca: 88,55	sca: 210,764	0,670532
		car: 86,48	car: 314,3231	
Scarica 1C	+23	sca: 106,50	sca: 350,012	0,947098
		car: 104,80	car: 369,5623	
Scarica 2C	+23	sca: 104,70	sca: 331,006	0,908378
		car: 103,20	car: 364,3922	
Scarica 3C	+23	sca: 95,67	sca: 224,6880	0,663600
		car: 94,69	car: 338,5903	
Scarica 1C	+ 40	sca: 104,00	sca: 322,322	0,87277
		car: 102,90	car: 369,3091	
Scarica 2C	+ 40	sca: 102,70	sca: 280,553	0,767285
		car: 101,70	car: 365,6433	
Scarica 3C	+ 40	sca: 102,40	sca: 245,723	0,677529
		car: 101,40	car: 362,676	

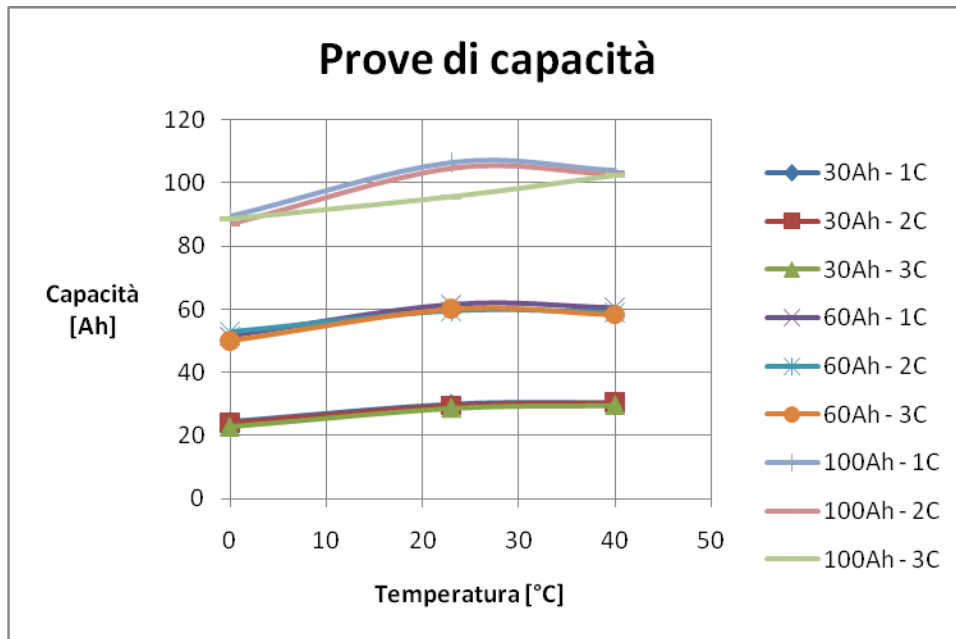


Fig- 3 – Risultati delle prove di capacità

Dalla Fig. 3 emerge che, ad una data temperatura, sussiste una certa indipendenza della carica erogata dal regime di scarica a cui la batteria viene sottoposta. Anche la sensibilità alla temperatura di funzionamento non appare molto marcata. Le migliori prestazioni globali vengono fornite tra +23°C e +40°C, mentre per temperature inferiori a +23°C si registra una riduzione, del tutto normale, di capacità.

L'energia accumulata presenta un andamento simile a quello della capacità.

1.5 Carica rapida

La massima corrente continuativa in carica riportata nella scheda tecnica delle batterie è 1C, che corrisponde alla ricarica completa teorica in un'ora.

La prova è stata eseguita a temperatura ambiente, sottoponendo la batteria ad una scarica completa a corrente costante di intensità C/2 seguita dalla pausa di un'ora e, successivamente, dalla carica completa CC/CV ad 1C (corrente costante pari ad 1C fino al raggiungimento della tensione limite superiore, 3,85V, poi a tensione costante e corrente via via decrescente fino al valore 1A, condizione di fine prova). La Fig. 4 riporta l'andamento della tensione in funzione della carica elettrica immessa, per i tre modelli di batteria.

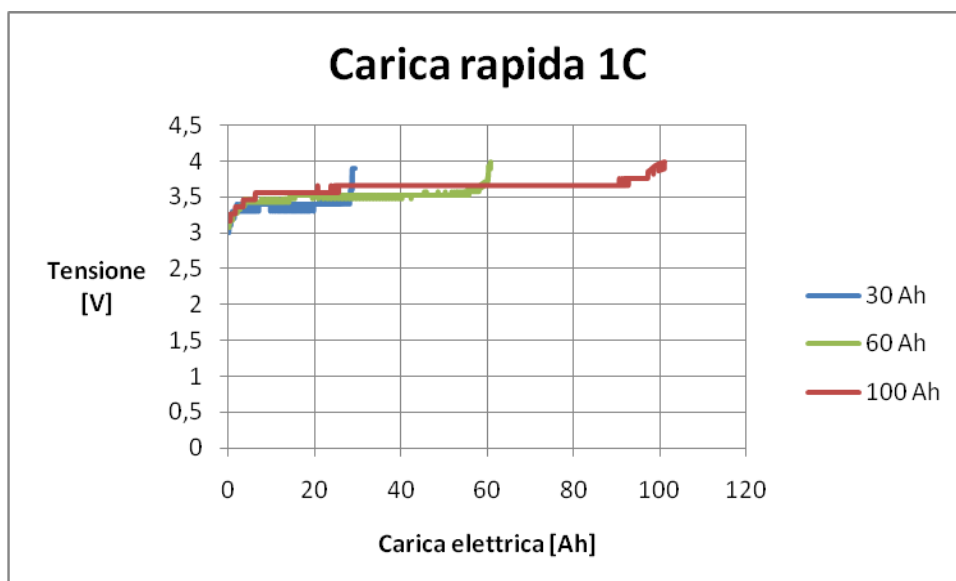


Fig. 4 – Tensione e carica elettrica nella prova di carica rapida

La Fig. 5 riporta, per il modello di batteria da 100Ah, l'andamento della temperatura e quello di tensione e corrente durante l'esecuzione della prova di carica rapida (per i modelli di batteria da 30Ah e 60Ah la prova in questione è stata eseguita con il ciclatore E-8325, che controlla, ma non registra, la temperatura: per questo motivo non è stato possibile produrre diagrammi analoghi per i modelli di batteria da 30Ah e 60Ah).

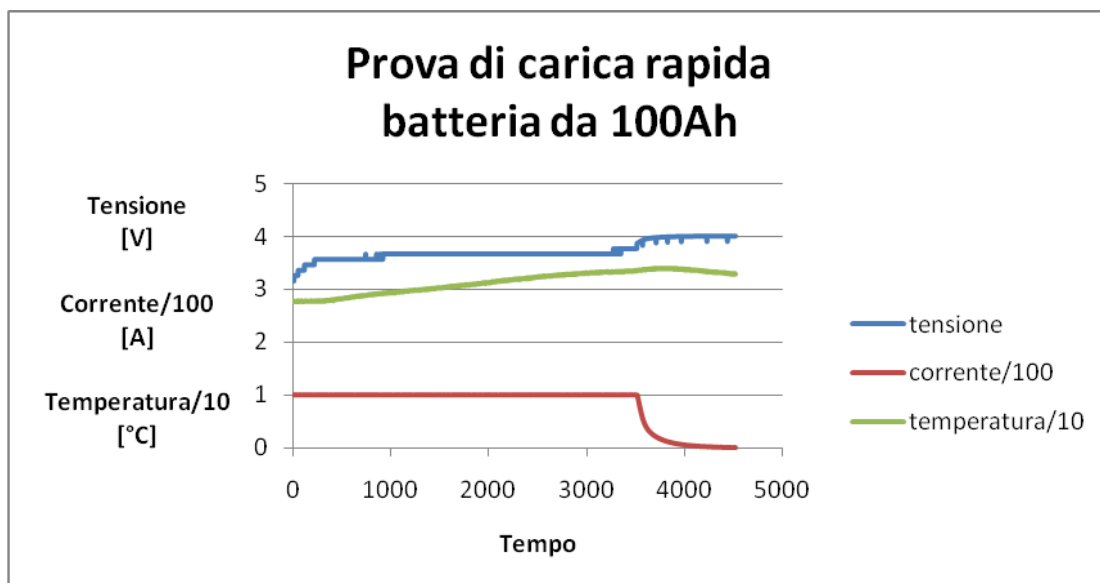


Fig. 5 – Tensione, corrente e temperatura nella prova di carica rapida della batteria da 100Ah

La temperatura è andata via via crescendo con legge circa lineare durante la fase a corrente costante, tuttavia, seppure in assenza di raffreddamento, si è mantenuta entro valori assolutamente tollerabili, raggiungendo il valore massimo 32,5°C (per inerzia termica) poco dopo l'inizio della riduzione di corrente, per poi scendere con il diminuire della corrente.

1.6 Resistenza interna

La resistenza interna è un parametro importante per la conoscenza dei fenomeni di riscaldamento e di perdita di efficienza della batteria.

La prova inizia con un periodo di pausa, seguito da tre impulsi di corrente della durata di 30 secondi, intervallati da brevi periodi di pausa. I primi due impulsi sono di intensità 1C, il primo in scarica ed il secondo in carica. Il terzo è un impulso in scarica ad alta corrente. Segue un periodo di pausa e quindi una scarica alla corrente C/2. La sequenza è riportata nella Tab. 7 e meglio rappresentata nella Fig. 6.

Tab. 7 – Sequenza per la misura della resistenza interna		
Fase n.	Descrizione	Tempo
1	P	< 3 ore
2	DCSH @ 1C	30 sec
3	P	180 sec
4	CH @ 1C	30 sec
5	P	180 sec
6	DSCH @ I _{HC}	30 sec
7	P	P
8	DSCH @ C/2	< 24 min

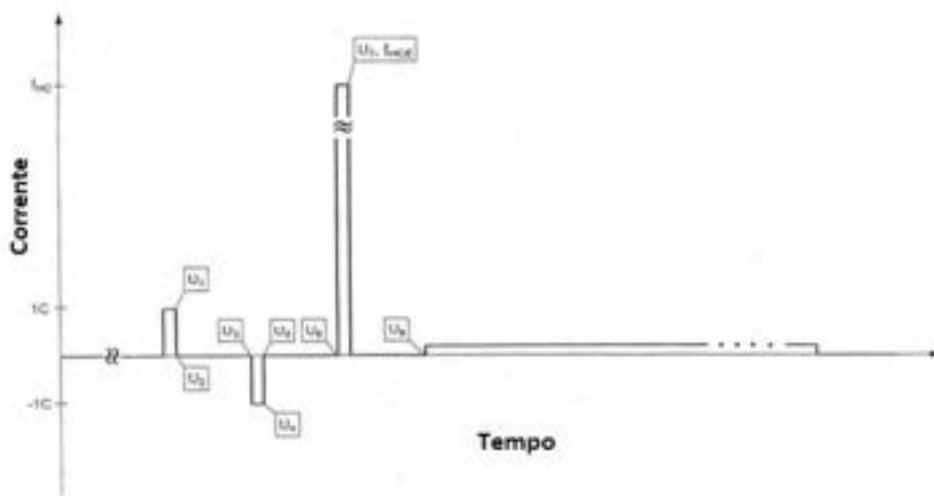


Fig. 6 – Profilo per la prova di determinazione della resistenza interna

Nella carica 1C non deve essere superata la tensione massima secondo le specifiche del costruttore. Il tempo della fase 8 deve essere regolato in modo tale che nelle fasi da 1 ad 8 si sia scaricato complessivamente il 20% della capacità. Questo serve per poter ripetere le sequenza e calcolare la resistenza interna per vari valori di SOC (stato di carica), ad intervalli del 20%, fino a raggiungere la condizione di batteria scarica alla tensione minima: in realtà, nel nostro caso, la prova è stata effettuata ad un solo valore di SOC, pari al 50%. La corrente I_{HCE} della fase 6 è definita come il più alto valore di corrente che può essere usato per 30 secondi, in accordo con le specifiche del costruttore.

Con riferimento al profilo di Fig. 6, si individuano 8 punti caratteristici che vengono utilizzati per il calcolo della resistenza interna mediante l'applicazione delle formule seguenti:

- resistenza interna in scarica: $R_{\Omega,dch} = (V_2 - V_1)/I_{1C}$
- resistenza interna complessiva in scarica 1C: $R_{1C,dch} = (V_3 - V_1)/I_{1C}$
- resistenza interna in carica: $R_{\Omega,cha} = (V_4 - V_5)/I_{1C}$
- resistenza interna complessiva in carica 1C: $R_{1C,cha} = (V_4 - V_6)/I_{1C}$
- resistenza interna complessiva in scarica a corrente elevata: $R_{HC,dch} = (V_8 - V_7)/I_{HCE}$

La Fig. 7 illustra l'andamento di tensione e corrente durante l'applicazione del profilo di prova e la Tab. 8 riporta i valori ottenuti (per brevità il test è stato eseguito solo sui campioni di batterie del modello da 100Ah, con corrente I_{HCE} pari a 500A):

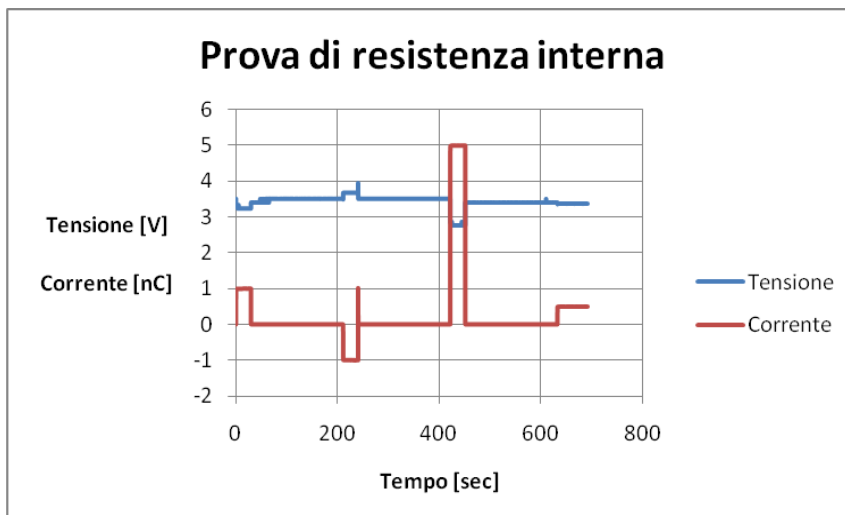


Fig. 7 – Andamento di tensione e corrente nel profilo di resistenza interna

Tab. 8 – Valori di resistenz interna	
Grandezza	Valore [$m\Omega$]
$R_{\Omega,dch}$	1,66577368
$R_{1C,dch}$	2,66308912
$R_{\Omega,cha}$	1,64429720
$R_{1C,cha}$	1,65100860
$R_{HC,dch}$	1,258793824

I valori di resistenza interna ottenuti risultano buoni ed in linea con quanto dichiarato dal Costruttore.

1.7 Prova di avviamento a freddo

Stante la destinazione dei moduli da 30Ah e 60Ah alle applicazioni come batterie d’avviamento (oltre quelle di trazione, rispettivamente, di piccola e media taglia) è stato pensato di eseguire sui modelli di batteria da 30Ah e 60Ah una prova di prestazione all’avviamento. Nel caso delle batterie al piombo, di cui l’avviamento è la classica applicazione, questa prova è descritta dalla Norma CEI EN 50342-1 “Batterie di accumulatori al piombo per avviamento – Parte 1: Prescrizioni generali e metodi di prova”; nel caso invece delle batterie al litio la prova non è ancora normata e per eseguire il test si è preso a riferimento ancora la Norma CEI EN 50342-1, cercando di adattarla al caso in esame: del resto in questa sede non si ha l’obiettivo di verificare il rispetto di una normativa da parte di un prodotto, la norma serve solo per dare un’idea significativa.

La procedura richiede di preparare la batteria portandola allo stato di carica completa, fare una pausa di 24 ore, porre la batteria in camera climatica alla temperatura di $-18^{\circ}C$, quindi scaricarla – dentro o fuori la camera climatica – entro 2 minuti dalla fine del raffreddamento con la corrente I_{CC} (corrente di avviamento, normalmente designata come Cold Cranking Amperes e specificata dal costruttore). Dopo 10 secondi di scarica, si deve annotare la tensione ai morsetti della batteria, verificando che non sia inferiore alla tensione minima consentita dal costruttore, e la corrente deve essere interrotta. Segue un periodo di pausa per un periodo di 10 secondi, dopodiché la batteria deve essere scaricata a corrente costante con intensità pari al 60% del valore I_{CC} , arrestando la scarica quando la tensione della batteria raggiunge il valore minimo. Deve essere annotata, espressa in secondi, la durata della scarica all’intensità $0,6 I_{CC}$ fino alla tensione minima.

Nell’ottica sopra accennata, la prova non è stata eseguita a $-18^{\circ}C$, che è un caso veramente limite, ma a $-10^{\circ}C$, che sembra una temperatura più realistica e comunque severa per la batteria. Inoltre come valore minimo di tensione si è assunto quello consigliato dal Costruttore, 2,5V. Similmente ad una batteria da veicolo leggero da 44Ah, la cui corrente I_{CC} è 170A, corrispondente a 3,86C, il valore di corrente I_{CC} utilizzato per la prova è stato posto uguale a 4C.

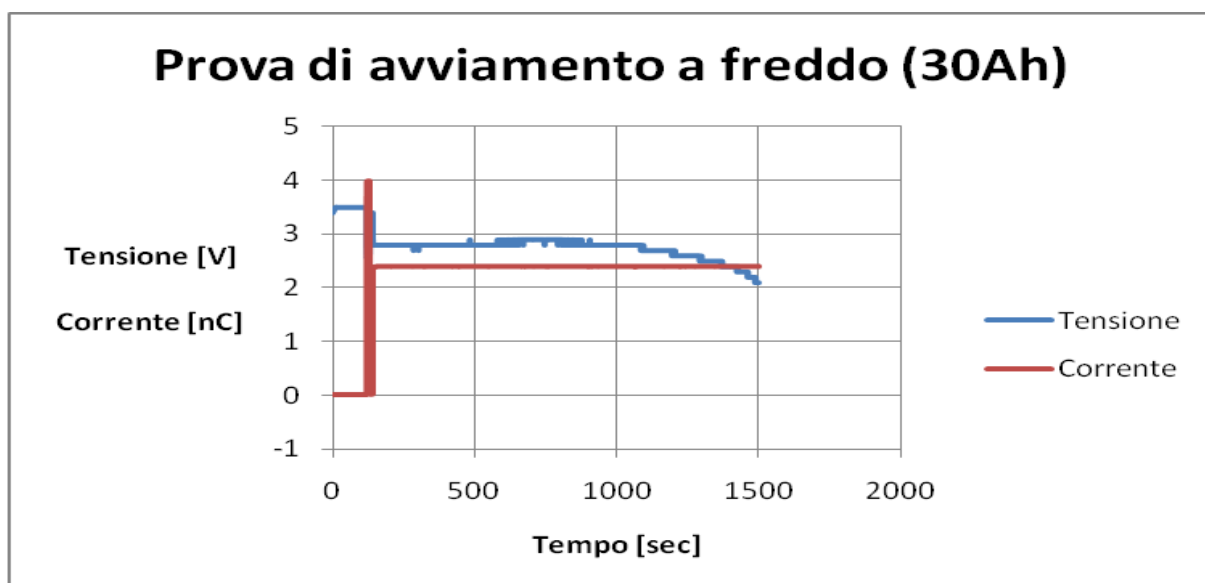


Fig. 8 – Andamento di tensione e corrente nella prova di avviamento a freddo per la batteria da 30Ah.

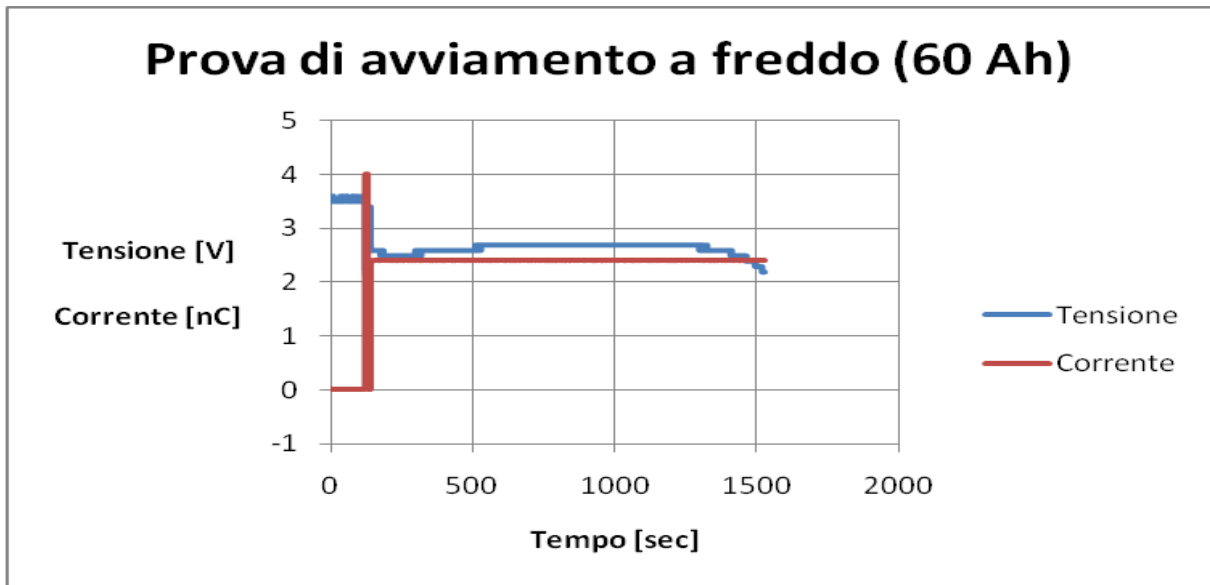


Fig. 9 – Andamento di tensione e corrente nella prova di avviamento a freddo per la batteria da 60Ah.

I profili di tensione registrati durante l'esecuzione delle prove, e riportati nelle figure 8 e 9, mostrano come la tensione si sia mantenuta sempre al di sopra del valore minimo consentito, che è stato raggiunto solo alla fine della fase di scarica a $0,6 I_{CC}$.

2. Caratterizzazione termica delle batterie e sistema di gestione termica dei moduli batterie

L'autotrazione elettrica è fortemente condizionata dalle prestazioni dei sistemi di accumulo. Oltre allo sviluppo di nuove tipologie di batterie più performanti in termini di potenze ed energia immagazzinabile, si sta evidenziando sempre di più la necessità di affidabilità e mantenimento delle prestazioni nel tempo; a tale proposito, è noto che un fattore fondamentale per ottenere questi risultati è contenere le temperature di esercizio entro dei valori dipendenti dal tipo di batteria. Gli accumulatori sono in genere costituiti da moduli a loro volta realizzati assemblando elementi unitari (batterie); già in un singolo modulo si possono quindi verificare situazioni di scambio termico sfavorevoli per alcuni suoi elementi. Considerando infine l'assemblaggio in spazi ristretti, situazione usuale nelle vetture elettriche, si capisce come sia importante disporre di un'efficace sistema di rimozione del calore. Questa parte dell'attività si è proposta di affrontare tali problemi, partendo dalla caratterizzazione termica della singola batteria, consistente nella rilevazione del campo termico per mezzo di termocoppie e termografie durante prove di carica e scarica, con lo scopo di individuare punti di criticità e valutare le necessità di raffreddamento in esercizio ed eventuale riscaldamento nell'avviamento a freddo. A valle di questa fase, è stato eseguito uno studio della configurazione ottimale per l'appiattimento del profilo di temperature e l'asportazione del calore massimo necessario per non superare le temperature limite. Successivamente, sono state eseguite prove sperimentali sui moduli, nelle diverse condizioni di esercizio elettrico, su un circuito di prova impiegante aria come fluido di raffreddamento. Infine è stato valutato e sperimentato un possibile sistema alternativo di rimozione del calore ad acqua. I risultati ottenuti sono stati utilizzati per individuare le caratteristiche generali necessarie per un efficace sistema di rimozione del calore, proporre miglioramenti geometrici e una sua possibile ottimizzazione.

2.1 Analisi termografica

E' stata effettuata un'analisi termica, a livello di singola cella, consistente nella rilevazione del campo termico per mezzo di termocoppie ed una termocamera durante prove di carica e scarica in ambiente aperto e non condizionato, con lo scopo di valutare le necessità di raffreddamento delle batterie durante le fasi di esercizio ed eventuale riscaldamento nell'avviamento a freddo.

Le termografie sono state ottenute con una termocamera FLIR S60, con sensore 320x240 pixel e sensibilità termica $< 0.1^{\circ}\text{C}$, illustrata in Fig. 10.



Fig. 10 –Termografia su batteria in esercizio

Quest'analisi è stata condotta su campioni del modello di batteria da 100Ah, la più grande fra le taglie scelte, effettuando delle termografie sulla batteria in esercizio nelle condizioni più impegnative: i risultati hanno evidenziato l'esistenza di un "punto caldo", ove si registrano le temperature maggiori, situato leggermente al di sotto del polo negativo. Inoltre, è emerso che le condizioni critiche di temperatura vengono raggiunte solamente in prossimità della fase finale di scarica alle condizioni più impegnative

(massimo C-rate) e pertanto solo in tale fase la batteria necessita di essere raffreddata. Ciò era anche nelle aspettative, considerando il fatto che l'involucro delle batterie è in materiale plastico a bassa conducibilità termica perché il Costruttore ha realizzato un involucro quasi isolante per la gestione della scarica a freddo. La Fig. 11 illustra invece l'esatta posizione del punto caldo. Ciò ha costituito un'utile indicazione per il posizionamento più idoneo del sensore di temperatura a cui affidare il monitoraggio termico nel modulo batterie. La Fig. 12 mostra il montaggio del sensore di temperatura nel punto esatto indicato dall'analisi con termo camera.

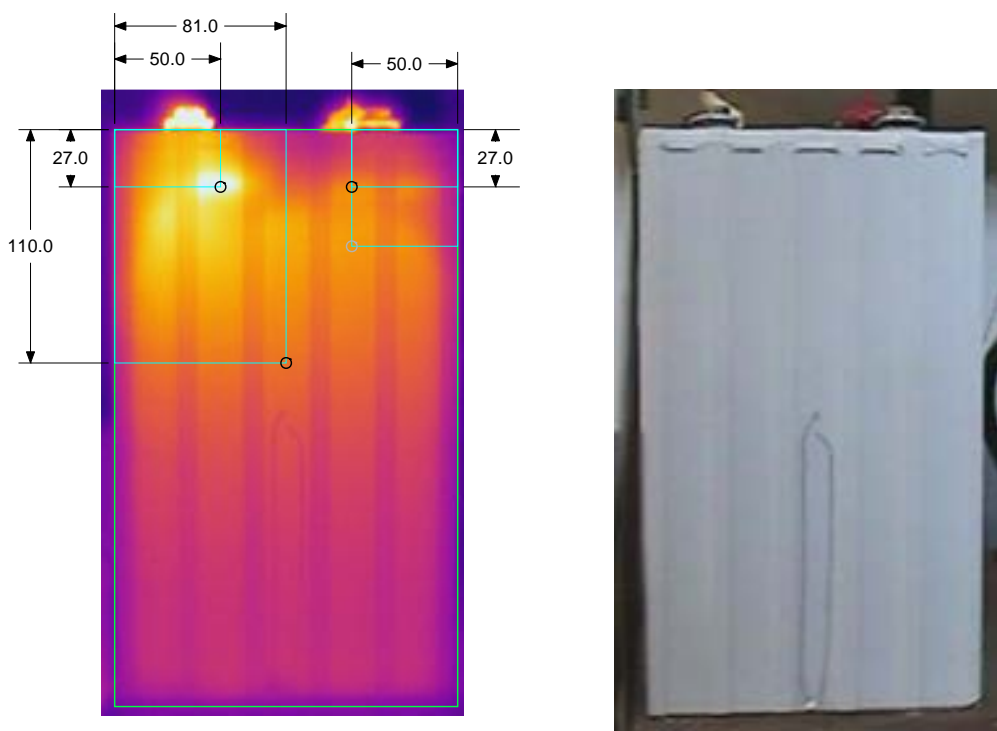


Fig. 11 – Risultati tipici ottenuti dalla termografia durante i cicli di scarica, localizzazione del punto caldo

sonda a 100 A nel
ciclatore, 15-2-2012
IR_0180

50.0

50.0

27.0



Fig. 12 –Montaggio del sensore di temperatura nel punto caldo

La registrazione delle termografie durante i transitori è stata effettuata a intervalli costanti (da pochi secondi a qualche minuto, in base alla rapidità prevista per il transitorio) e sincronizzando le immagini ottenute con i dati di corrente e tensione registrati dal ciclatore.

I grafici dei risultati sono mostrati in Fig.13. Per i diversi transitori, ottenuti a correnti di scarica da 100 A a 500 A e dalla successiva ricarica a 33 A, nel grafico inferiore sono riportati i valori nel tempo della tensione e corrente, in quello superiore la temperatura massima e quella media della superficie esterna.

Si può vedere come il punto più caldo possa avvicinarsi ai 70°C durante la scarica a 300 A (Fig. 16). E' altresì mostrato che le condizioni critiche si raggiungono solo alla fine della scarica, e pertanto solo in tale situazione la batteria necessita di raffreddamento. Si tenga presente che il limite superiore di temperatura indicato dal Costruttore è +65°C.

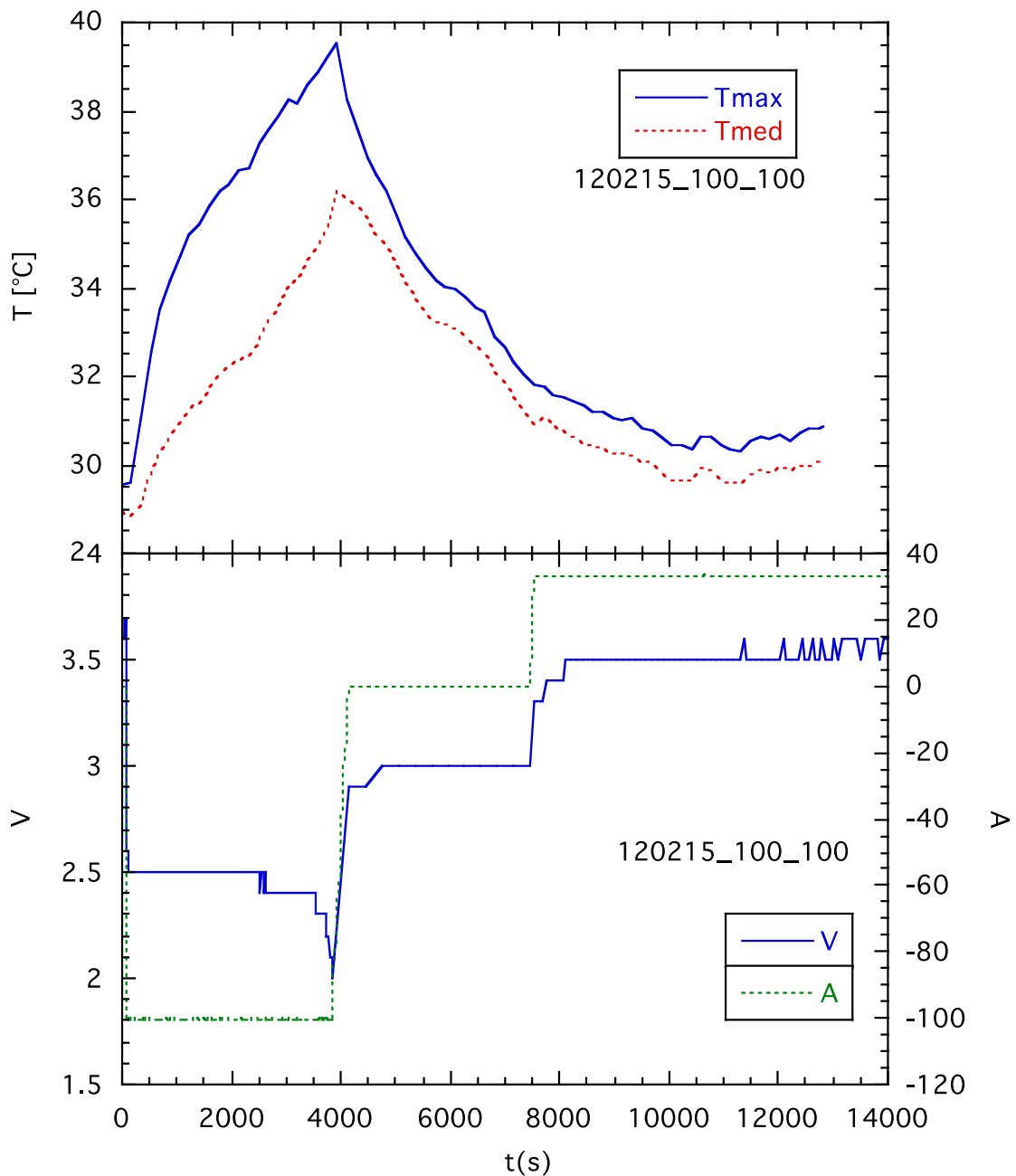


Fig. 13 – Scarica a 100 A per 3850 s, pausa di 3600 s e ricarica a 33 A

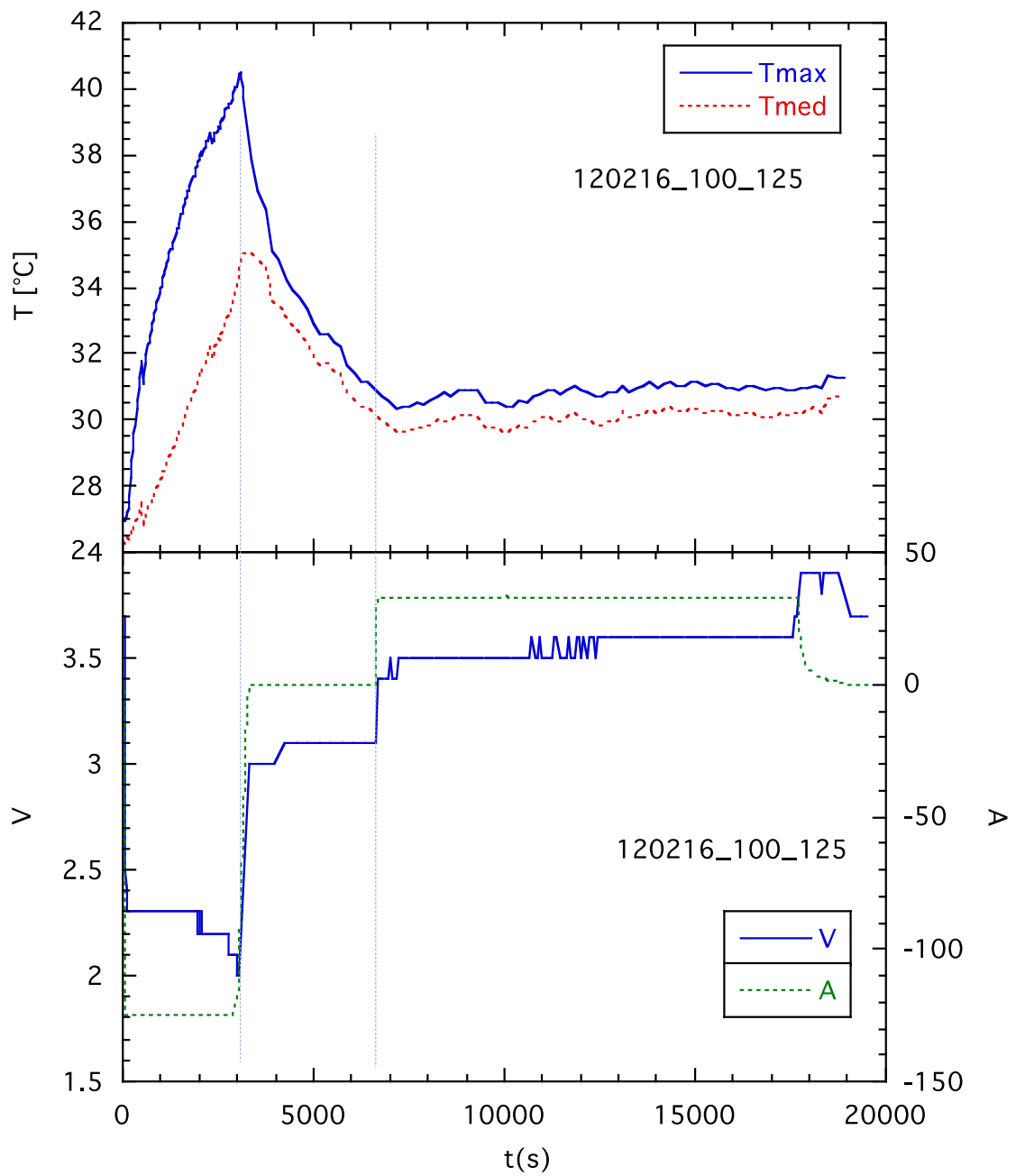


Fig. 14 – Scarica a 125 A per 3000 s, pausa di 3600 s e ricarica a 33 A

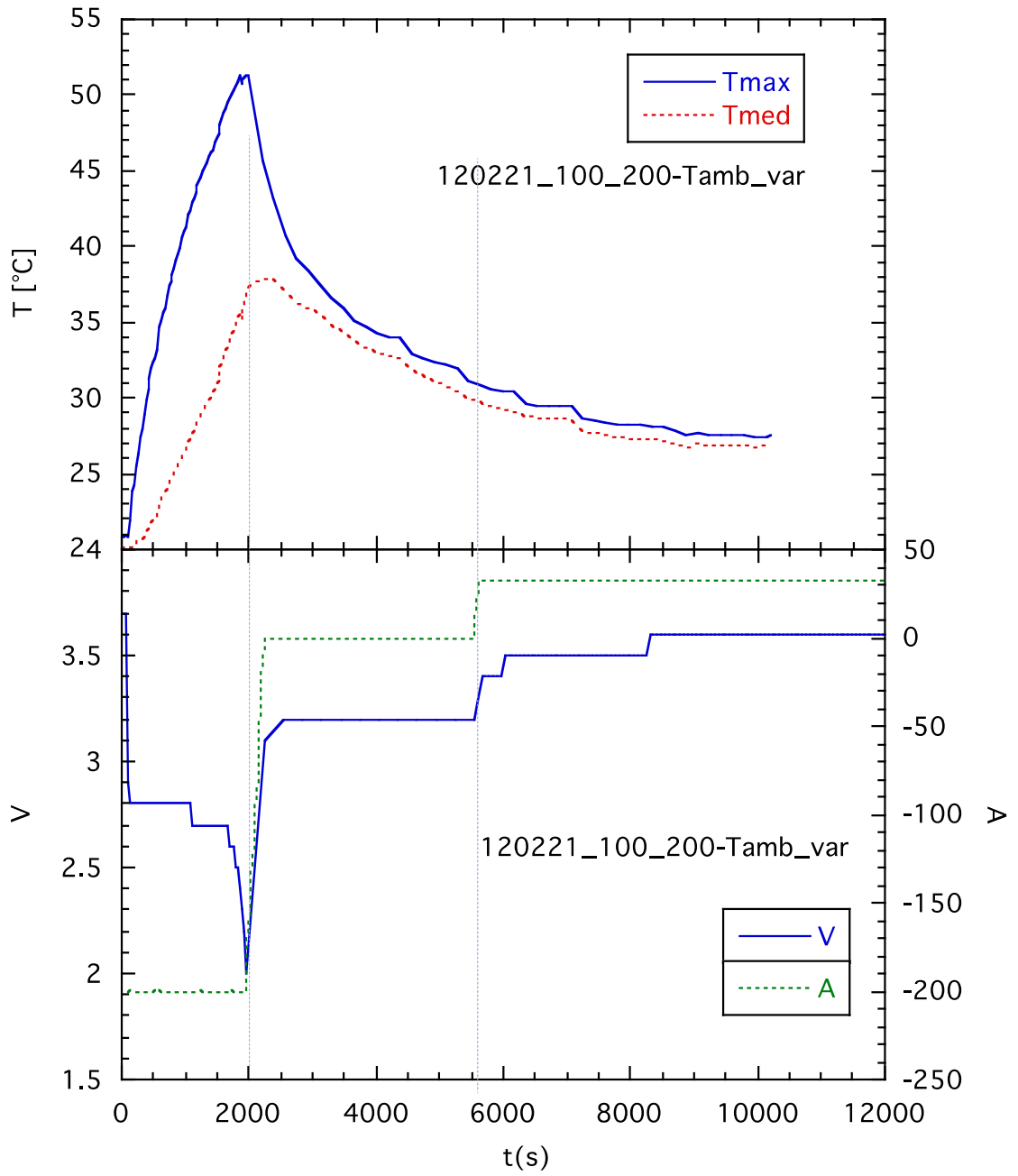


Fig. 15 – Scarica a 200 A per 2000 s, pausa di 3600 s e ricarica a 33 A

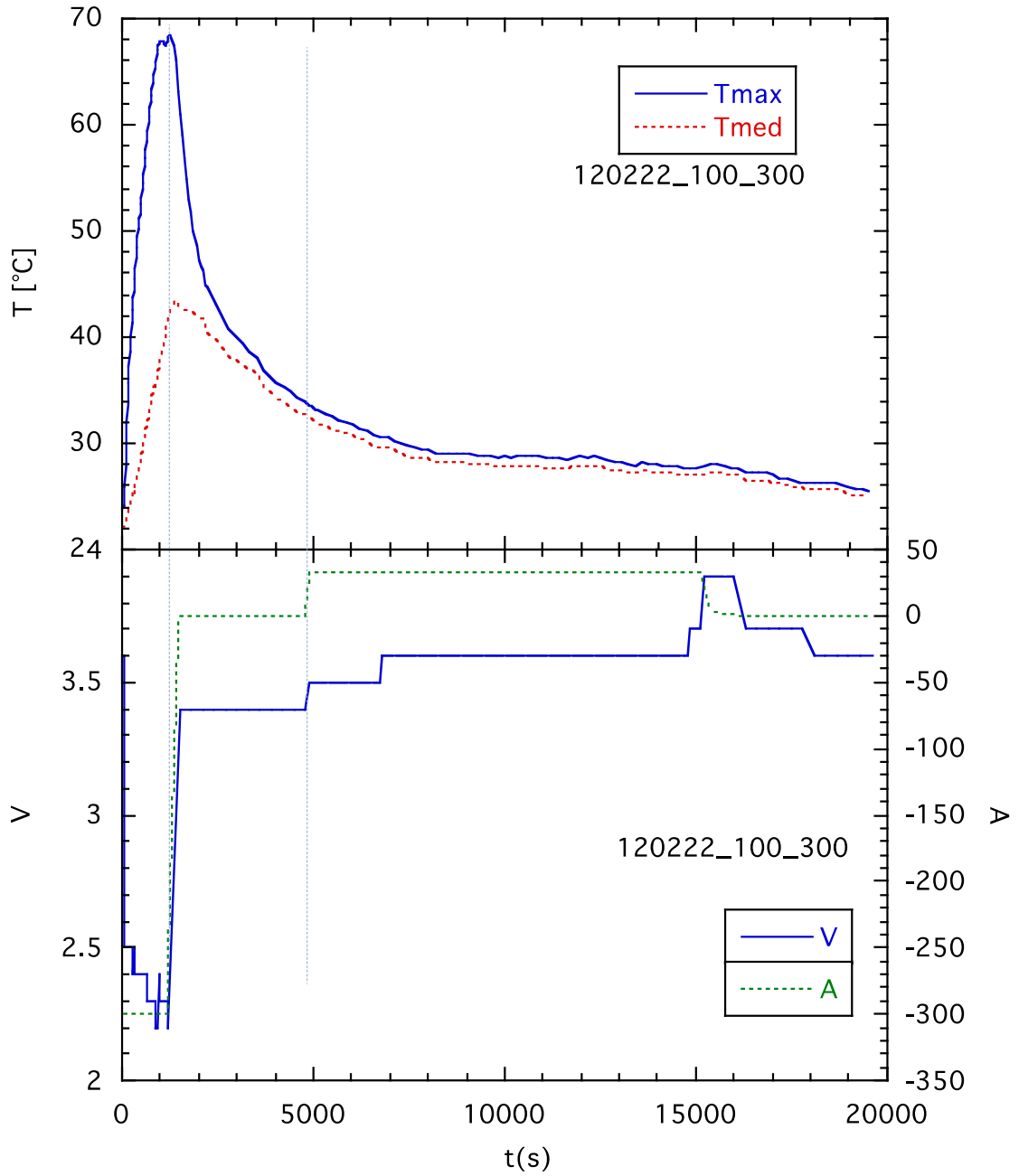


Fig. 16 – Scarica a 300 A per 1200 s, pausa di 3600 s e ricarica a 33 A

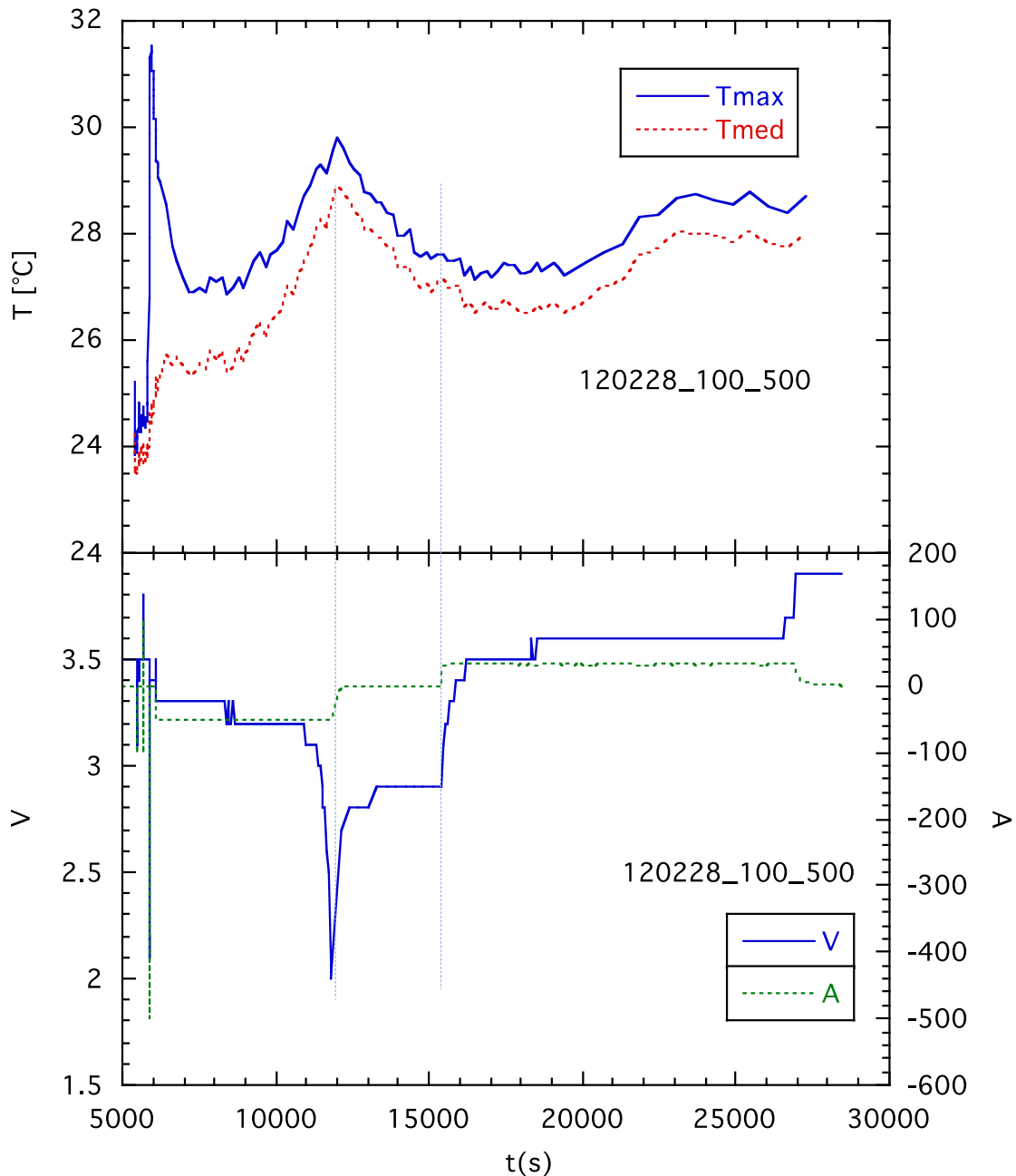


Fig. 17 – Scarica a 500 A per 30 s, pausa di 180 s, scarica a 50 A per 5700 s e ricarica a 33 A

2.2 Impianto sperimentale BA.CO. (Battery COoling)

Presso i laboratori TERM e VEBIM dell'Unità tecnica UTTEI dell'ENEA-Casaccia, è stato realizzato un impianto sperimentale per la valutazione della capacità di raffreddamento delle batterie con l'utilizzo di aria. L'impianto è dimensionato per permettere prove a diverse velocità e temperature dell'aria, per la verifica di limiti nelle condizioni di funzionamento tipiche.

Nella simulazione di un modulo, all'impianto BACO viene richiesto il raffreddamento di 4 batterie al litio, ciascuna con dimensioni 163 x 51 x 278mm e le seguenti caratteristiche: capacità 100 Ah, corrente massima I_{max} 300 A, tensione nominale V_{nom} 3,2V, potenza nominale W_{nom} pari al prodotto $V \cdot I = 960$ W, resistenza interna 1 m Ω .

Da ciò si ottiene la potenza massima da asportare con il fluido refrigerante per ogni singola batteria:

$W_{\text{dis}} = R_i \cdot I^2 = 90$ W (pari al 9.4% della potenza nominale), quindi la potenza termica totale da asportare $W_t = 4 W_{\text{dis}}$ diviene 360 W.

Imponendo per l'aria un riscaldamento massimo $\Delta T = 2^\circ\text{C}$, la portata in massa di aria necessaria è

$$\Gamma = W_t / (c_p \Delta T) = 0,1793 \text{ kg/s} \quad (1)$$

mentre quella in volume vale

$$Q = \Gamma / \rho = 9052 \text{ l/min} = 543 \text{ m}^3/\text{h}$$

Ponendo le batterie distanziate di 1 cm, l'area di passaggio è $A_p = 6480 \text{ mm}^2$. Dalla formula precedente la velocità nei canali è:

$$u = Q/A_p = 23,28 \text{ m/s} \quad (2)$$

La perdita di carico prevista:

$$\Delta p = \frac{1}{2} f \rho u^2 (L/D)$$

risulta 111Pa ed è stata ottenuta usando, per il calcolo del fattore di Fanning f , la correlazione di Gnielinski

$$f = (1,82 \text{ Log}_{10} \text{Re} - 1,64)^{-2} \quad (3)$$

Da questa si può calcolare la potenza del ventilatore, supponendo un rendimento $\eta = 25\%$:

$$P = Q \cdot \Delta p \cdot \eta = 67 \text{ W}$$

Nel circuito di prova è stato previsto anche un riscaldatore per riscaldare l'aria ed eseguire prove a temperatura superiore a quella ambiente. La potenza massima richiesta per il preriscaldatore, dalla (1) nel caso in cui l'aria entri nel circuito a $T_i = 20^\circ\text{C}$ e debba essere scaldata fino a $T_{\text{max}} = 40^\circ\text{C}$, è:

$$W_s = \Gamma c_p \Delta T = 3600 \text{ W}$$

Per la misura della portata di aria, è stato installato un anemometro in un canale con diametro $D_{\text{canale}} = 12 \text{ cm}$, ed area $A_{\text{canale}} = 0,0113 \text{ m}^2$ e quindi la velocità massima prevista per l'anemometro è data dalla (2) con $A_p = 0,0113 \text{ m}^2$: si ottiene $u = 15,2 \text{ m/s}$.

Il coefficiente di scambio richiesto, con $\Delta T_{\text{parete-fluido}} = 20 \text{ K}$ è:

$$q'' = W_e / 2 \cdot S_L = 1021 \text{ W/m}^2$$

$$h = q'' / \Delta T = 51 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Il coefficiente di scambio termico laminare, calcolato per la geometria scelta, va da $36 \text{ W/m}^2\text{K}$ (corr. di Bejan-Krauss) a $70 \text{ W/m}^2\text{K}$ (corr. di Gnielinski) e a 101 (Dittus-Boelter)

Le correlazioni sono le seguenti:

Tab. 9 – Correlazioni per il calcolo dello scambio termico	
Bejan-Krauss	$h = 3.886 (u/L)^{0.5}$
Gnielinski	$Nu = f/8 * Pr * (Re - 1000) / \{1 + 12.7 \sqrt{f/8(Pr^2/3-1)}\}$, con f dalla (3)
Dittus-Boelter	$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$

Dove

$$h = Nu k / D$$

L'impianto sperimentale è stato realizzato presso il laboratorio UTTEI-TERM con le caratteristiche riassunte nel paragrafo precedente. In Fig. 118 è mostrato lo schema dell'impianto, che è costituito da:

- un sistema di soffiaggio dell'aria (quattro ventilatori assiali a 24Vcc della EBM-PAPST 4114NH3);

- un preriscaldatore elettrico per ottenere aria alla temperatura voluta;
- un anemometro SCHMIDT ss20.500 per la misura della portata di aria;
- un canale di lunghezza sufficiente a ottenere il profilo pienamente sviluppato come richiesto dall’anemometro;
- la sezione di prova contenente una termocoppia per l’aria di ingresso e il pacco di batterie, distanziate di 1 cm e strumentate come suggerito dall’esperienza precedente fatta con la termocamera: le quattro batterie sono state monitorate attraverso 14 termocoppie posizionate come mostrato in Fig. 119, con tutte le batterie monitorate nel punto più caldo (27 mm sotto il polo negativo) e quelle centrali anche sotto il positivo e nella zona centrale;
- due termocoppie dopo un miscelatore dell’aria per ottenere la temperatura media in uscita;
- il ciclatore Eltra E-8304 che provvede alla scarica e ricarica delle batterie registrando la tensione e la corrente fornita nel tempo;
- un sistema di acquisizione dati, realizzato in Labview, che provvede alla registrazione dei valori dei sensori e alla regolazione della temperatura di ingresso (tramite il controllo della tensione del riscaldatore con una routine P.I.D.).

Le Fig. da 20 a 22 mostrano la realizzazione dell’impianto, il sistema di visualizzazione ed acquisizione delle temperature, e la disposizione delle batterie con relative termocoppie all’interno della sezione di prova.

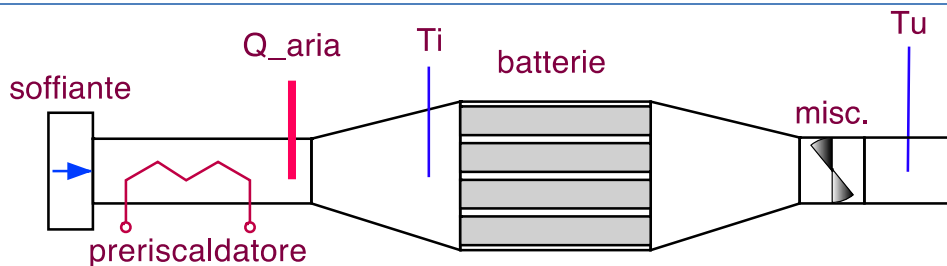
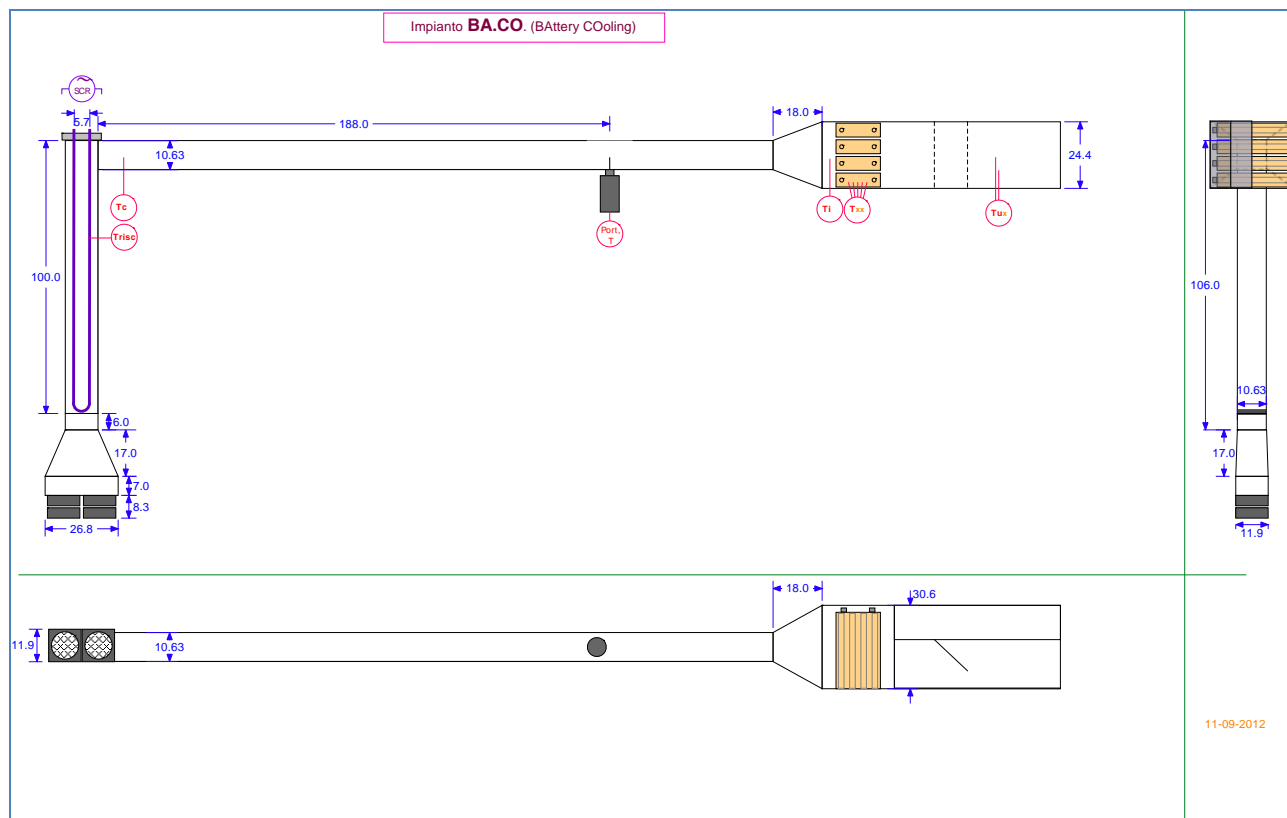


Fig. 18 –Impianto sperimentale per raffreddamento ad aria: dimensioni e schema di funzionamento

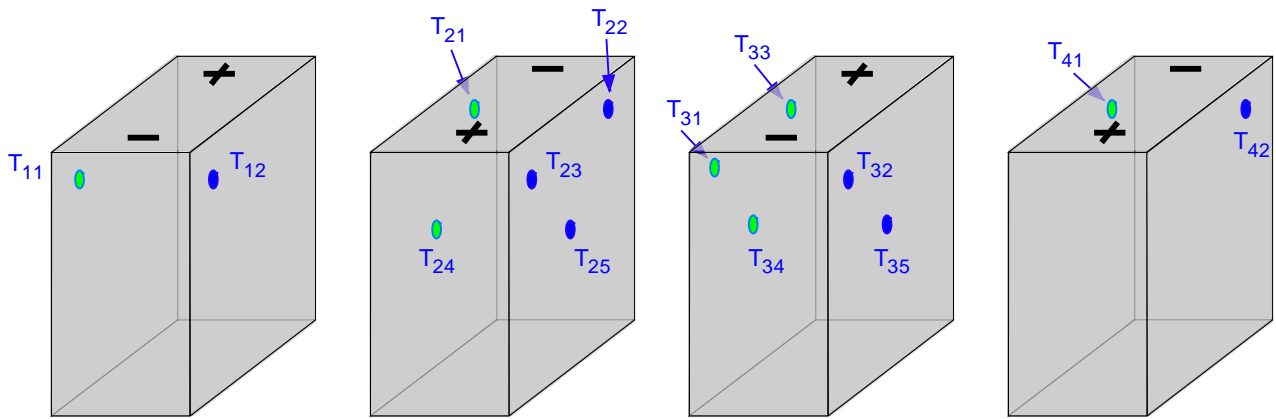


Fig. 19 – disposizione delle termocoppie sulle batterie



Fig. 20 – Realizzazione dell'impianto BA.CO



Fig. 21 – Monitoraggio ed acquisizione delle temperature con impianto BACO



Fig. 22 – Disposizione e strumentazione delle batterie all’interno della sezione di prova

2.3 Impianto per prova di raffreddamento con acqua

Il raffreddamento ad acqua, visto che la caratterizzazione termica precedentemente descritta aveva evidenziato ridotte necessità di raffreddamento delle batterie (si da poter ritenere sin dall’inizio che l’aria potesse svolgere idoneamente la funzione di fluido refrigerante), ha subito pertanto un ridimensionamento, per cui il relativo circuito di raffreddamento è stato realizzato in una versione molto semplificata, a mo’ di vaschetta, con un ingresso ed un’uscita dell’acqua a portata regolabile mediante un rubinetto, in cui le batterie sono state immerse fino ad un certo livello e fatte lambire dall’acqua. Ciò è stato possibile in considerazione dell’involucro ermetico delle batterie ed ha consentito di effettuare comunque una sperimentazione indicativa, risparmiando gli oneri della costruzione di un circuito sofisticato. La Fig. 23 illustra l’impianto durante la fase di allestimento e la Fig. 24 durante l’esecuzione delle prove: le batterie, distanziate di 1cm come nel caso dell’aria, sono disposte in un contenitore ove entra acqua attraverso un tubo collegato ad un rubinetto della rete idrica, che immette l’acqua nel recipiente dal basso in modo da non creare oscillazioni di livello e danneggiare le batterie, che sono immerse tipo “pool boiling” fino a circa 1cm dal piano ove giacciono i poli. La portata è regolabile mediante il rubinetto ed è calcolabile attraverso una bilancia abbinata ad un cronometro, su cui è disposto il recipiente in cui il tubo di scarico convoglia l’acqua in uscita. L’imboccatura del tubo di scarico è posta in corrispondenza del livello che si vuole mantenere nel recipiente. Le batterie sono strumentate con le medesime termocoppie usate nelle prove con raffreddamento ad aria, disposte identicamente. Anche il sistema di visualizzazione ed acquisizione dati è lo stesso.



Fig. 23 – Impianto per prova di raffreddamento con acqua

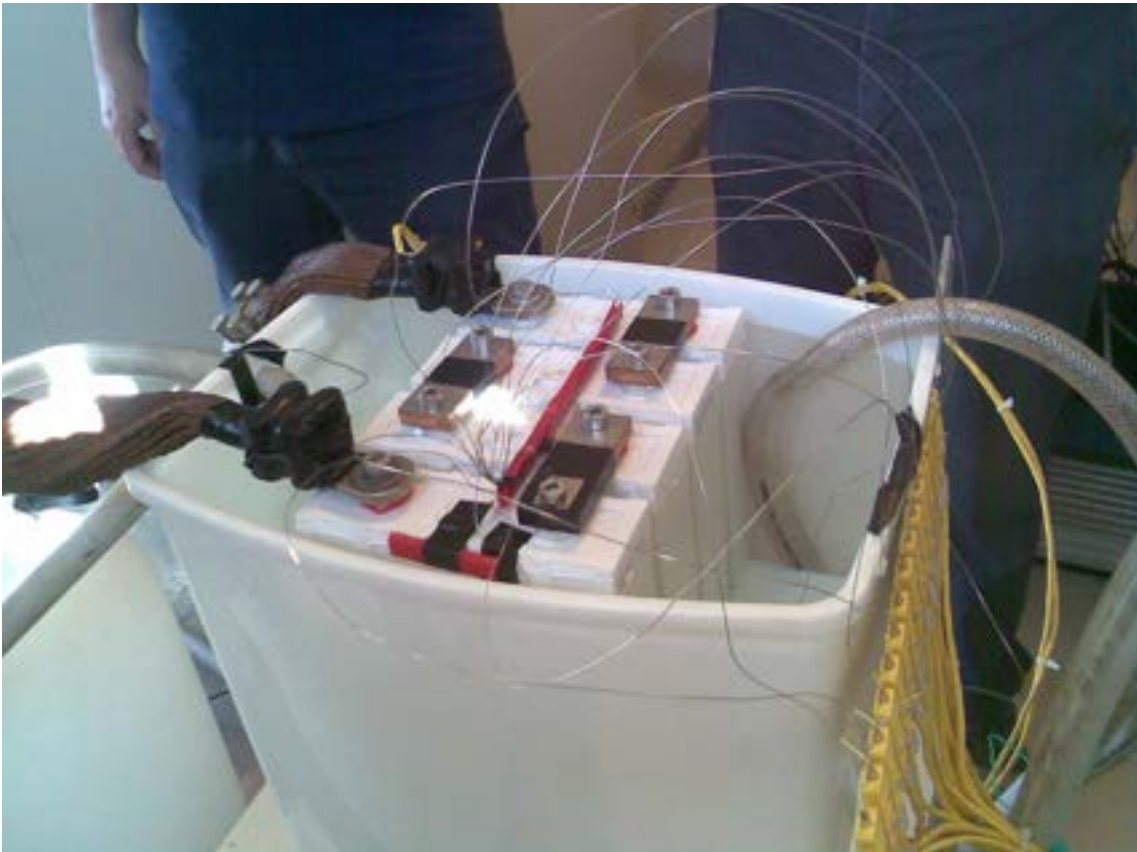


Fig. 24 – Prova di raffreddamento con acqua

2.4 Prove di raffreddamento ad aria e ad acqua

Le prove di raffreddamento, sia con aria che con acqua, sono state eseguite facendo lavorare le batterie nelle peggiori condizioni di esercizio in carica e scarica: secondo i dati forniti dal Costruttore e confermati dalle prove di caratterizzazione elettrica e termica, questo avviene nella carica 1C, cioè ad un valore di corrente pari alla capacità nominale delle batterie, nel nostro caso 100A, e soprattutto nella scarica continuativa a 3C, cioè a 300A. Pertanto, partendo dalla condizione di batterie scariche, al ciclatore è stato impostato un ciclo di lavoro composto da una carica CC/CV @ 1C (corrente costante 100A fino alla tensione di 15V e quindi tensione costante e corrente decrescente fino ad 1A, condizione di fine carica) e, dopo una pausa di circa 1h, una scarica 3C (corrente costante 300A fino al raggiungimento della tensione 10V, condizione di fine scarica).

Il limitato tempo a disposizione, causa il tardivo arrivo della componentistica dell'impianto ad aria e la stringente necessità di definire velocemente il tipo di raffreddamento per poter avviare la realizzazione in tempo compatibile con il fine attività, non hanno consentito di eseguire un numero elevato di prove, pertanto si è dovuto optare per poche prove significative: nel caso del raffreddamento ad aria, è stata utilizzata una portata pari a 100m³/h, che è l'ordine di grandezza delle portate che si riescono a raggiungere con ventole a basso assorbimento e ridotte dimensioni (tipo quelle dei PC, che sono poi quelle che sarebbe possibile montare con le geometrie in gioco), mentre la prova con acqua è stata fatta con la portata di 100l/h, che è una portata facilmente ottenibile con una piccola pompa di circolazione.

I risultati sono presentati in forma congiunta nelle Fig. 25 e 26.

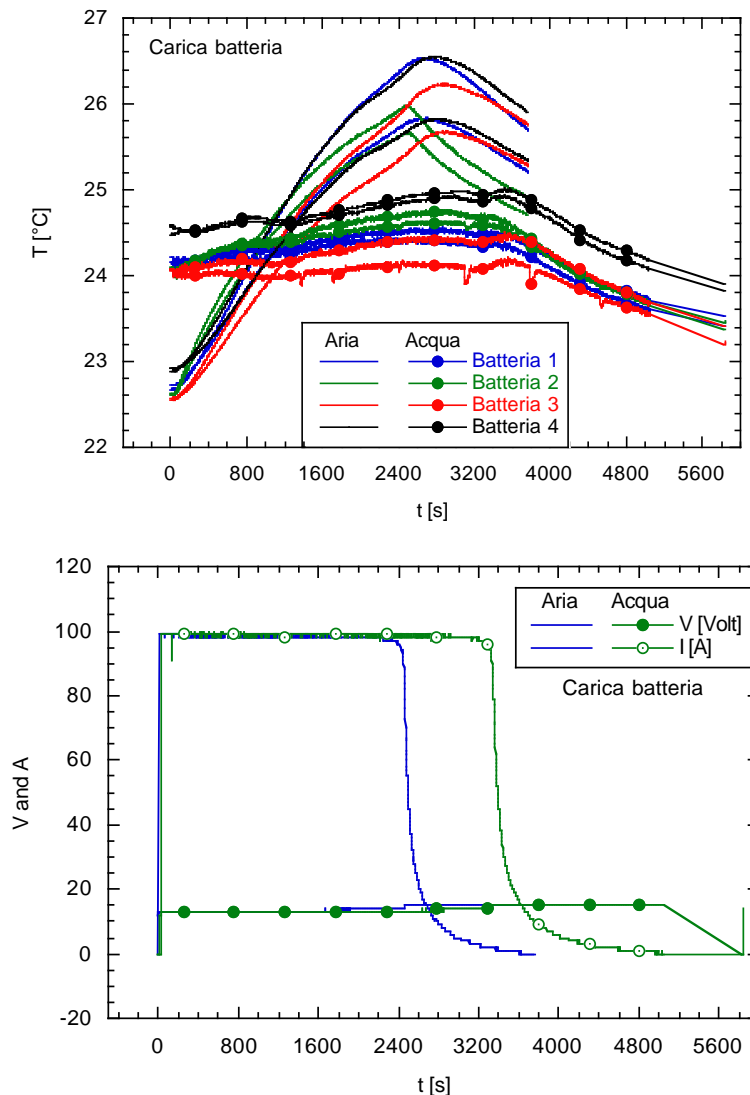


Fig. 25 – Carica 1C con raffreddamento ad aria e ad acqua

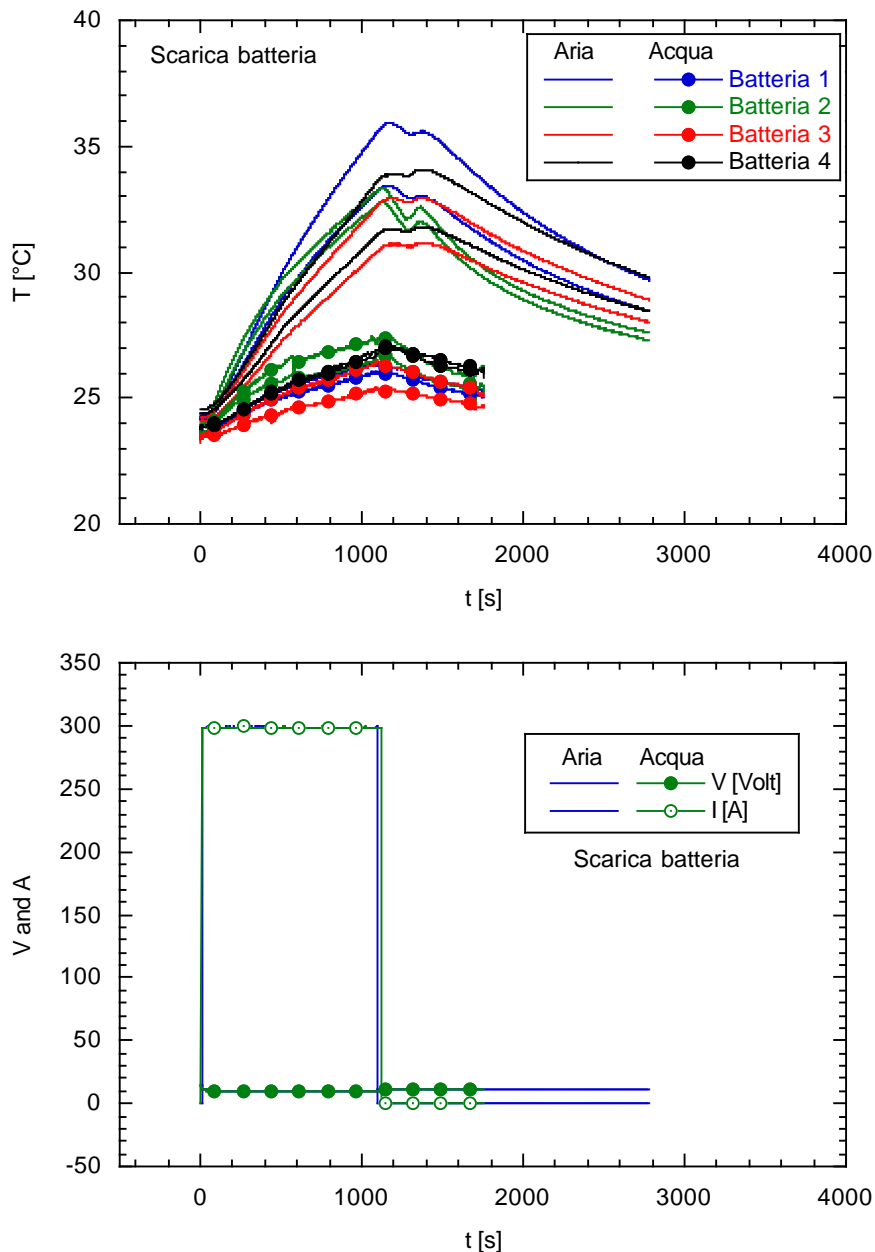


Fig. 26 – Scarica 3C con raffreddamento ad aria e ad acqua

In entrambe le figure, sono state indicati con il blu gli andamenti di temperatura registrati da tutte le termocoppie montate sulla batteria 1 come da Fig. 19, analogamente sono state indicate con il verde, il rosso ed il nero, tutte le curve afferenti alle termocoppie montate rispettivamente sulla batteria 2, 3 e 4 (per intenderci le batterie 1 e 4 sono quelle esterne, le 2 e 3 interne), sempre con riferimento alla Fig. 19.

L'analisi dei profili di temperatura mostra come in carica la temperatura massima sia 25°C nel caso del raffreddamento ad acqua, 26,5°C nel caso del raffreddamento ad aria. Si tratta di temperature di assoluta tranquillità, tanto da far pensare che le batterie hanno la potenzialità per affrontare cariche più impegnative, 1,5÷2C, che le rende molto interessanti in ambito di ricarica rapida.

In scarica 3C invece le temperature sono più alte: 27,5°C nel caso del raffreddamento ad acqua, +36°C nel caso del raffreddamento ad aria. Entrambi i sistemi di raffreddamento si sono mostrati efficienti, infatti le temperature si sono mantenute ben al di sotto dei limiti dichiarati dal Costruttore (+65°C) e soprattutto ben al di sotto dei valori registrati nell'analogo prova condotta nella fase di caratterizzazione termica senza raffreddamento. Il confronto di efficienza depone a favore del raffreddamento ad acqua.

2.5 Sistema di raffreddamento dei moduli batterie

Le prove di caratterizzazione elettrica a bassa temperatura e le prove d'avviamento a freddo hanno mostrato inoltre che le batterie non necessitano di riscaldamento nel funzionamento a freddo. Il sistema di gestione termica del modulo consiste quindi in un sistema di raffreddamento. Nonostante il confronto di efficienza tra raffreddamento ad acqua e ad aria sia a favore del raffreddamento ad acqua, nella scelta del sistema di raffreddamento da adottare nei moduli batterie si è optato per il raffreddamento ad aria, perché comunque efficiente ma più semplice ed economico da realizzare in confronto al raffreddamento ad acqua (circuito chiuso, due scambiatori, pompa di circolazione e suo alloggiamento, tenute ... sono tutti problemi in più, che non conviene affrontare visto che il raffreddamento ad aria è comunque utile alla causa).

Per il posizionamento dei ventilatori è stato deciso di escludere il montaggio sulle superfici laterali del modulo perché, nelle applicazioni come batterie d'avviamento o trazione di veicoli elettrici off-road, tali superfici spesso non si trovano in buone condizioni per favorire la circolazione dell'aria di raffreddamento, a causa di altri elementi posti in vicinanza o degli angusti spazi in cui i moduli vengono montati. Se si pensa poi al montaggio di più moduli affiancati, i moduli si potrebbero ostacolare a vicenda. Per cui è stato deciso di montare i ventilatori sul coperchio del contenitore meccanico del modulo batterie. Per la scelta della portata ci si è orientati verso la portata che in fase di prova si è dimostrata favorevole, $100\text{Nm}^3/\text{h}$.

Tenendo conto anche dei vincoli geometrici legati all'alloggiamento sul coperchio, il raffreddamento viene realizzato mediante tre ventilatori $50 \times 50 \times 20\text{mm}$ da 12V_{dc} che si alimentano direttamente dal modulo (assorbimento complessivo 500mA) e si attivano quando la temperatura registrata dai sensori posti sulle singole batterie raggiunge il valore $+45^\circ\text{C}$: detti ventilatori aspirano aria che entra attraverso le aperture realizzate nella parte inferiore delle superfici laterali del modulo e lambisce le batterie nel suo percorso dal basso verso l'alto fino all'uscita, attraversando l'interspazio appositamente lasciato tra di esse per creare i canali di ventilazione. Tra l'altro, il moto dell'aria dal basso verso l'alto risulta in equicorrente rispetto ai flussi convettivi naturali. Le caratteristiche principali del singolo ventilatore sono riportate nella Tab. 10.

Tab. 10 – Caratteristiche principali dei ventilatore	
Alimentazione	12V_{dc}
Assorbimento	160mA
Dimensioni	$50 \times 50 \times 20\text{mm}$
Portata	$34,5\text{Nm}^3/\text{h}$
Prevalenza	$75,5\text{Pa}$
Velocità di rotazione	$7.000 \text{ giri}/\text{min}$

3. Prove di BMS commerciali

Relativamente al sistema elettronico di controllo BMS (Battery Management System), sono stati posti in funzione i sistemi commerciali di diversa tipologia approvvigionati l'anno precedente, per i quali era stato fatto un confronto a livello di specifica ma non era stato possibile testarli in esercizio perché consegnati a ridosso della scadenza delle attività. Dei tre sistemi commerciali approvvigionati, due sono con bilanciamento di tipo passivo (le batterie più cariche sono scaricate su elementi dissipativi, i.e. resistenze) ed uno di tipo semiattivo. Inoltre, tramite Accordo di Collaborazione stipulato nel presente anno, l'Università di Pisa ha fornito un BMS di propria concezione, con bilanciamento di tipo attivo (le celle più cariche vengono scaricate a vantaggio di quelle meno cariche, evitando in tal modo dissipazioni energetiche) [3]. Le prove sono state svolte sottoponendo a cicli di carica (CC/CV @ C/3) e scarica (corrente costante C/2) un sistema composto da 16 batterie da 100Ah connesse in serie per una tensione totale nominale di 48V, a cui è stato collegato il BMS in esame. Le caratteristiche dell'insieme di 16 batterie sono riportate nella Tab. 11.

Tab. 11 – Principali caratteristiche della serie di 16 batterie da 100Ah		
<i>Specifica</i>		<i>Valore</i>
Tensione nominale [V]		51,2
Capacità nominale [Ah]		100
Energia [Wh]		5120
Temperatura di esercizio in scarica		-20 ÷ +65°C
Temperatura di esercizio in carica		0 ÷ +45°C
Scarica @ +23°C	Massima corrente continuativa [A]	300
	Picco @ 60 sec [A]	500
	Cut-off [V]	40
Carica @ +23°C	Metodo di carica	CC/CV (58,4V)
	Massima corrente di carica [A]	100
	Cut-off [V]	61,6

I sistemi elettronici sono stati confrontati con riguardo ai seguenti aspetti tecnici:

- funzione di protezione (disconnessione del sistema batterie al verificarsi di situazioni anomale di esercizio, attraverso l'apertura di contattori posti in serie al sistema batterie, in corrispondenza dei poli),
- funzione di monitoraggio (visualizzazione delle tensioni delle singole batterie e dei parametri globali del sistema batterie),
- funzione di acquisizione dati (registrazione dei valori visualizzati),
- funzione di equalizzazione (livellamento delle tensioni delle singole batterie).

I cicli di carica e scarica sono stati realizzati presso il Laboratorio Prova Batterie del Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA, per mezzo del ciclatore Eltra E-8304 (48 ÷ 360Vmax; 0 ÷ 350Amax).

Segue la rassegna dei BMS provati e dei risultati ottenuti.

3.1 BMS n. 1

Il BMS n.1 (denominato tipo C nel report [1] relativo alla precedente annualità dell'accordo di Programma) è rappresentato in esercizio nella Fig. 27. Esso è concepito secondo lo schema "master & slave" ed è costituito da quattro componenti principali:

- l'unità centrale, con funzione di scheda master,
- l'unità ausiliaria, con funzione di scheda slave, completa di CAN BUS (per la comunicazione con la scheda master) cavi di collegamento alle singole batterie e due cavi con termistori (per la raccolta delle tensioni parziali e due temperature),
- sensore di corrente 500 A,
- monitor touch screen 5.7".

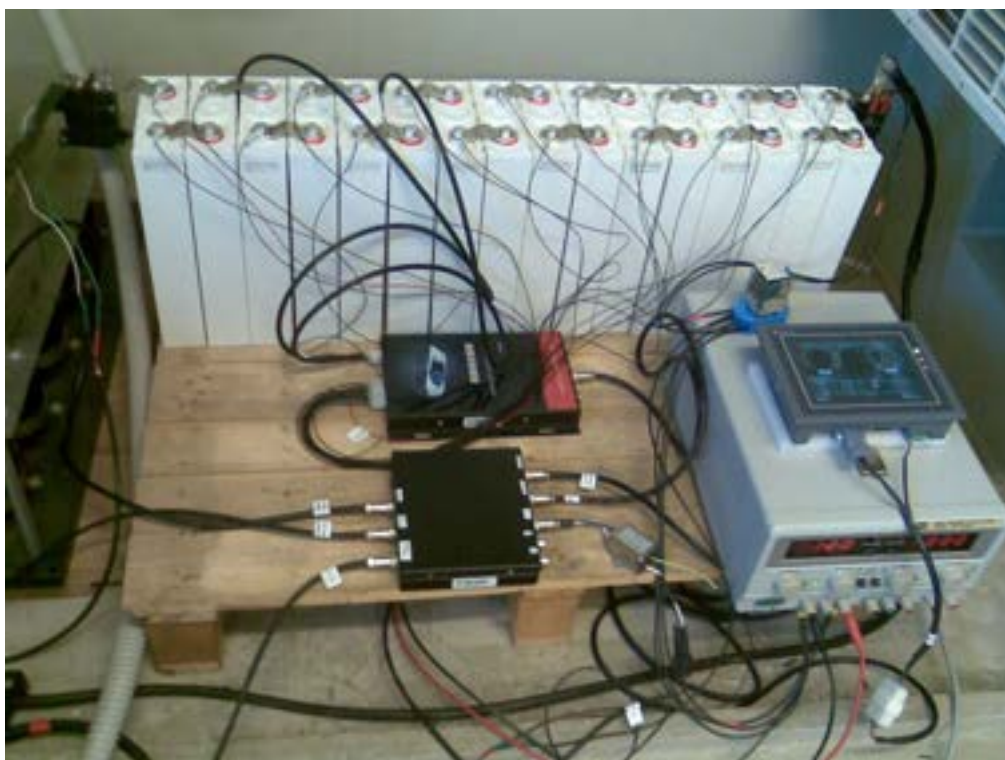


Fig. 27 – BMS n. 1 in esercizio

L'unità master deve essere alimentata tramite una sorgente esterna a 12V (in basso a destra nella Fig. 27). La funzione di protezione in carica viene assicurata tramite un relè (in alto a sinistra in Fig. 27) che disconnette le batterie dal ciclatore quando si raggiunge una condizione di allarme. Le caratteristiche di intervento del relè sono riportate nella Tab. 12.

Tab. 12 – Parametri di intervento in carica del relè di protezione	
Tensione massima della singola batteria	3,90V
Rilascio dell'allarme per tensione massima singola batteria	3,80V
Tensione massima di pacco	60,0V
Rilascio dell'allarme per tensione massima di pacco	56,0V
Tempo di ritardo massimo	3,0s

La protezione di protezione in scarica avviene attraverso un contatto che è chiuso nelle normali condizioni di funzionamento e viene aperto dal BMS al verificarsi di una condizione di allarme. Se il ciclatore fosse stato dotato di ingresso BMS, tale contatto si sarebbe potuto utilizzare per comunicare l'allarme direttamente al ciclatore. In assenza dell'ingresso BMS, nell'esecuzione delle prove tale contatto è stato utilizzato in abbinamento all'alimentatore 12V per chiudere/aprire un relè montato sul polo negativo (in alto a destra nella Fig. 27). La Tab. 13 riporta le caratteristiche di intervento della protezione in scarica.

Tab. 13 – Parametri di intervento della protezione in scarica	
Tensione minima della singola batteria	2,00V
Rilascio dell'allarme per tensione minima singola batteria	2,30V
Tensione massima di pacco	40,0V
Tempo di ritardo massimo	1,0s

Attraverso il monitor touch screen da 5.7", illustrato nella Fig. 28 e Fig. 29, vengono visualizzati i seguenti parametri: tensione di pacco, corrente, stato di carica, tensione massima/minima con identificazione della batteria che si trova alla tensione massima/minima, temperatura massima, tensione delle singole batterie.



Fig. 28 – Menù principale di visualizzazione

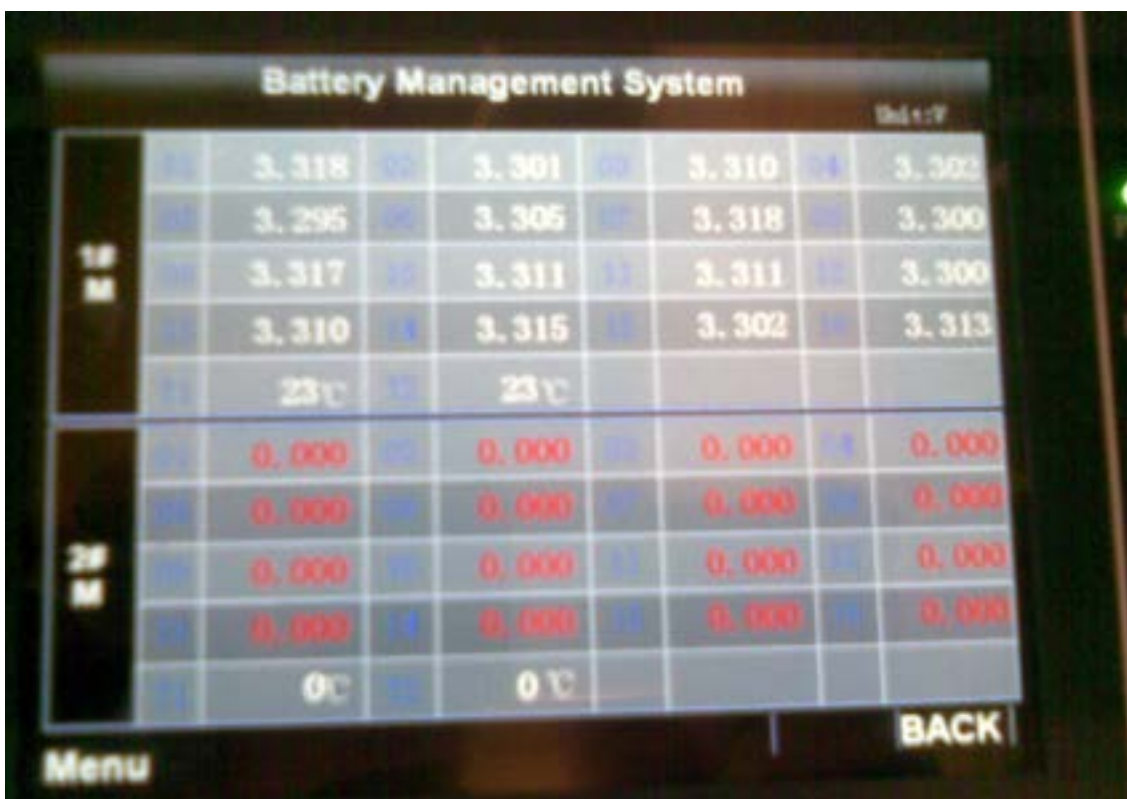


Fig. 29 – Visualizzazione delle tensioni parziali

I parametri suddetti vengono forniti in sola visualizzazione, non c'è registrazione dei dati.

L'equalizzazione avviene durante la carica ed è effettuata all'interno dell'unità ausiliaria (slave) attraverso componentistica di tipo passivo: l'assenza di registrazione dei dati non ha reso possibile quantificare durante le prove i parametri dell'equalizzazione.

3.2 BMS n. 2

Il BMS n. 2 (denominato tipo A nel report [1] relativo alla precedente annualità dell'accordo di Programma) è costituito da un'unità centrale, chiamata "RX", tre unità periferiche chiamate "TX", un sensore isolato di corrente ed il software di gestione. L'intero sistema, in esercizio, è rappresentato nella Fig. 30.

La singola unità TX monitora singolarmente la tensione e la temperatura di 6 batterie, autoalimentandosi dalle stesse (consumo in stand-by < 1µA per cella, in lettura e trasmissione dati < 15mA), trasmette (da qui il nome "TX", trasmittente) le informazioni all'unità ricevente (da cui il nome "RX", ricevente) mediante comunicazione CAN ed avvia la funzione di bilanciamento. Essendo il numero delle batterie pari a 16, due delle schede "TX" sono connesse ciascuna a 6 batterie, mentre la terza è connessa a 4 batterie.

L'unità ricevente RX, alimentata a 12-24V_{DC} (consumo max. 400mA @ 24V_{DC}) tramite una sorgente ausiliaria (nel caso in esame, è stato usato un alimentatore), riceve da parte delle TX le informazioni di tensione e temperatura delle singole batterie, campiona la corrente mediante un sensore ad effetto Hall isolato collocato sul cavo di potenza (polo positivo) del sistema batterie. Tale unità, inoltre, elabora i dati in conseguenza a quanto raccolto ed invia i risultati su linee di comunicazione CAN, USB o RS232.



Fig. 30 – BMS n. 2 in esercizio

Ci sono due livelli di protezione: warning ed allarme. Il BMS rende disponibili due uscite relè con contatti in scambio per inviare segnalazioni di warning quando la tensione minima delle singole batterie è uguale a 3,35V e quando la tensione massima è pari a 4,20V. Se la situazione di warning permane ed evolve a livello di allarme (tensione minima 3,30V, tensione massima 4,25V), il BMS apre il contattore posto in corrispondenza di uno dei poli del sistema batterie.

I principali parametri acquisiti e trasmessi sono: le tensioni di tutte le batterie, la tensione e la corrente di pacco, lo stato di carica "SOC" del pacco, eventuali allarmi di tensione massima o minima di pacco o di singola batteria, allarmi di temperatura. Attraverso il pacchetto software ed un PC dotato di porta USB o RS232, è possibile rilevare e visualizzare numericamente ed in forma grafica tutti i dati sopraelencati. E' possibile variare la frequenza di acquisizione nel range che va da 1 acquisizione ogni 600 secondi ad 1 acquisizione al secondo.

L'equalizzazione avviene durante le fasi di carica e pausa, ed è operata dalla scheda "TX" su richiesta dell'unità principale "RX". La potenza tipica usata durante l'equalizzazione è 2W per batteria, viene bilanciata una batteria per volta del gruppo di 6 che fa capo alla "TX". La tensione minima per start equalizzazione è 3,5V mentre la tensione massima di batteria per fine equalizzazione è 4,10V.

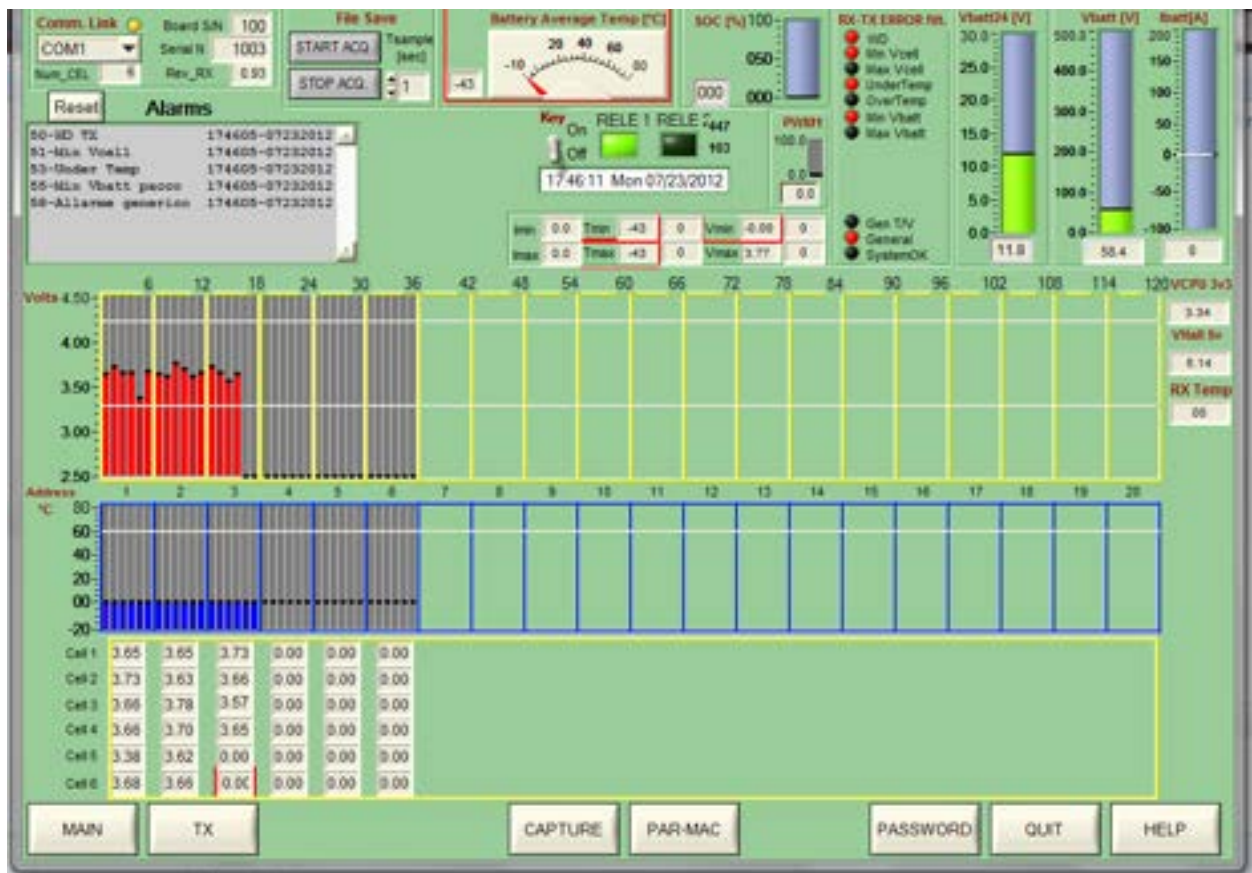


Fig. 31 – Interfaccia principale del BMS n. 2

La Fig. 31 mostra l'interfaccia principale del BMS in esame, ove sono visibili la tensione e la temperatura delle singole batterie (la temperatura indicata non è realistica in quanto i sensori di temperatura non sono collegati) con indicazione dei rispettivi valori massimi e minimi ed individuazione delle batterie ove tali valori si verificano, i parametri generali del pacco (tensione, corrente, stato di carica, temperatura media), la tensione di alimentazione dell'unità centrale, lo stato dei relè per la trasmissione degli allarmi ed una finestra di visualizzazione degli stessi con l'indicazione del tipo di allarme e del giorno e ora in cui si è verificato. Inoltre è presente la finestra di impostazione della frequenza di acquisizione, come spiegato dianzi.

Il limite di questo BMS è stato il fatto che è impostato per valori che sono caratteristici delle batterie al litio con catodo di tecnologia NMC (nickel-cobalto-manganese), e perciò non adatti per batterie al litio con catodo di tecnologia LFP (litio-ferrofosfato), come evidenziato nella Tab. 14.

Tab. 14 – Valori impostati nel BMS n. 2 per l'intervento delle protezioni		
	Valore impostato	Valore richiesto per batterie LFP
Warning per tensione minima di batteria	3,35V	2,55V
Warning per tensione massima di batteria	4,20V	3,85V
Allarme per tensione minima di batteria	3,30V	2,50V
Allarme per tensione massima di batteria	4,25V	3,90V

Ciò non ha consentito di poter lasciare il sistema batterie in funzionamento automatico, rendendo necessaria la presenza dell'operatore per vigilare sui valori monitorati ed interrompere le prove al verificarsi di condizioni di warning/allarme. Sono tuttora in atto, ma non ancora conclusi, dei contatti con il Fornitore che si sta adoperando per la fornitura e l'installazione di un aggiornamento del software che consenta di lavorare con i valori richiesti per batterie LFP.

A titolo di esempio, si riporta nella Fig. 32 un andamento tipico registrato nelle prove di carica /scarica.

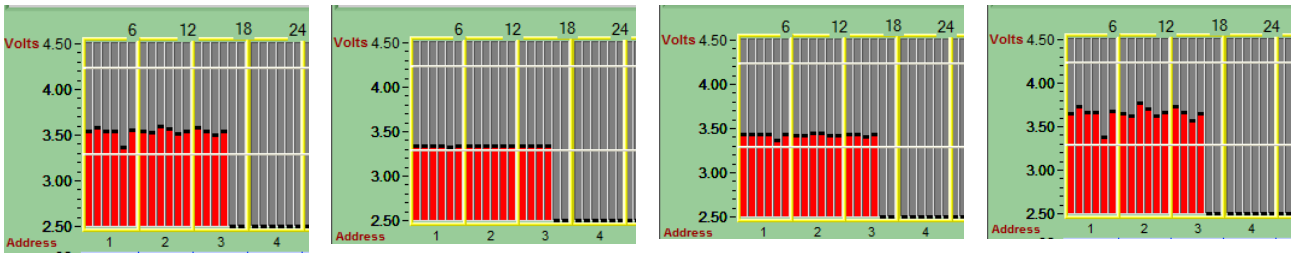


Fig. 32 – Andamento tipico durante prove di carica/scarica

Le batterie presentano una notevole disequalizzazione all’inizio della scarica (1^ immagine da sinistra), dopodiché si assiste ad un naturale livellamento delle tensioni (2^ immagine da sinistra), dovuto al fatto che le batterie si trovano tutte alla tensione 3,2V che corrisponde alla piatta della curva di scarica, ove non è possibile distinguere tra le batterie quale è più avanti nella scarica rispetto alle altre, lo stesso fenomeno si manifesta in carica per le medesime tensioni e motivazioni (non è possibile distinguere quale batteria è più avanti nella carica rispetto alle altre), poi la disequalizzazione inizia a ripresentarsi via via che la carica procede (3^ immagine da sinistra) fino ad esaltarsi in prossimità del fine carica (4^ immagine da sinistra).

N.B.: per motivi di sicurezza le prove non sono state condotte fino alla fine della scarica, per cui non è stata mostrata la fenomenologia che si manifesta in tali condizioni, ove per esperienza ci si attende uno sbilanciamento delle celle similmente a quanto descritto per il fine carica.

Anche in questo caso, non è stato possibile analizzare i dettagli della funzione di equalizzazione.

3.3 BMS n. 3

Il BMS n. 3 (denominato tipo B nel report [1] relativo alla precedente annualità dell’accordo di Programma) è costituito da una scheda master, “Battery Management Control Unit” (BMCU), e due schede slave “Local Monitoring Units” (LMU), ciascuna capace di monitorare fino ad 8 celle. Nella versione acquistata, illustrata in Fig. 33, le schede sono allocate in apposita custodia, ma è anche possibile la fornitura delle schede elettroniche sciolte.

Le schede LMU si alimentano direttamente dalle batterie ($4,5 \div 24 V_{DC}$, consumo < 50mA in esercizio, < 100 μA in stand-by) sono responsabili del monitoraggio e controllo a livello di singola batteria, del bilanciamento, della misura di temperatura in 2 punti del pacco batterie mediante altrettanti sensori e della scheda stessa mediante un sensore a bordo scheda.

La scheda BMCU deve essere alimentata sorgente esterna (nel caso in esame si è fatto uso di un alimentatore) a $9 \div 32 V_{DC}$ (consumo < 80mA in esercizio, < 200 μA in stand-by). Essa ospita l’intelligenza di sistema, includendo il modello della batteria, la logica di controllo dei contattori per la funzione di protezione, la memoria, l’interfaccia dati, ed il bus dati (CAN per interfaccia con sistemi esterni, RS232 per interfaccia PC di diagnostica).



Fig. 33 – BMS n. 3 in esercizio

Il sistema è scalabile fino ad una capacità massima di 256 celle, ottenibile connettendo 32 schede LMU alla scheda centrale BMCU. Inoltre è configurabile per tutte le chimiche di batterie al litio ed il software PC consente la configurazione on site dei parametri del sistema batterie. In fase di setting, Fig. 34, è possibile impostare i parametri del pacco e delle batterie (capacità, numero di stringhe in parallelo, limiti di corrente e tensione). Si può anche aggiungere un modello batteria per migliorare la stima dello stato di carica.

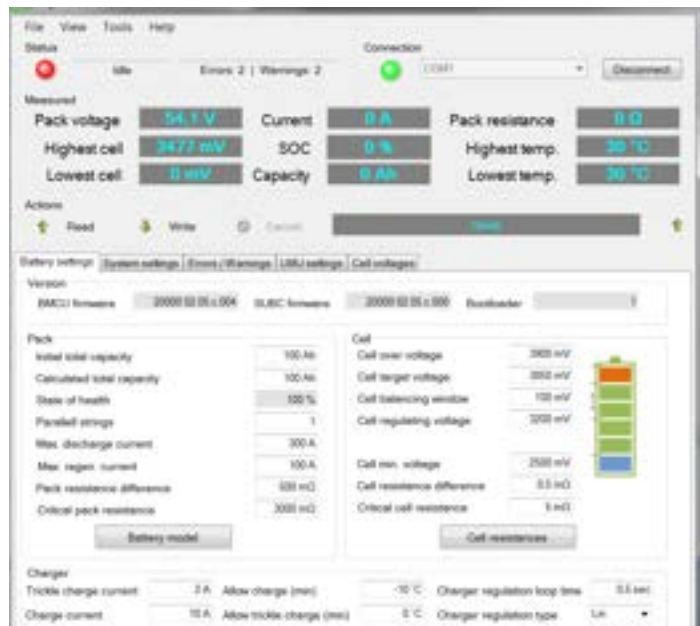


Fig. 34 – Una delle fasi di setting del BMS n. 3

La funzione di protezione individuale delle batterie si realizza a due livelli: avviso (warning) ed allarme/errore. Gli avvisi vengono emessi a fronte di potenziali problemi prima che essi diventino critici e sono mostrati dall'interfaccia PC (in alto a sinistra nelle Fig. 34 e 35). Al verificarsi dell'errore il BMS comanda la disconnessione del pacco batterie dal ciclatore. Le condizioni di errore/evento in cui il BMS apre il/i contattore/i sono mostrate nelle Fig. 35 e sono completamente configurabili, con inclusa la possibilità di scegliere il ritardo del tempo di apertura dei contattori e reset degli stessi in corrispondenza di ciascuno degli eventi.

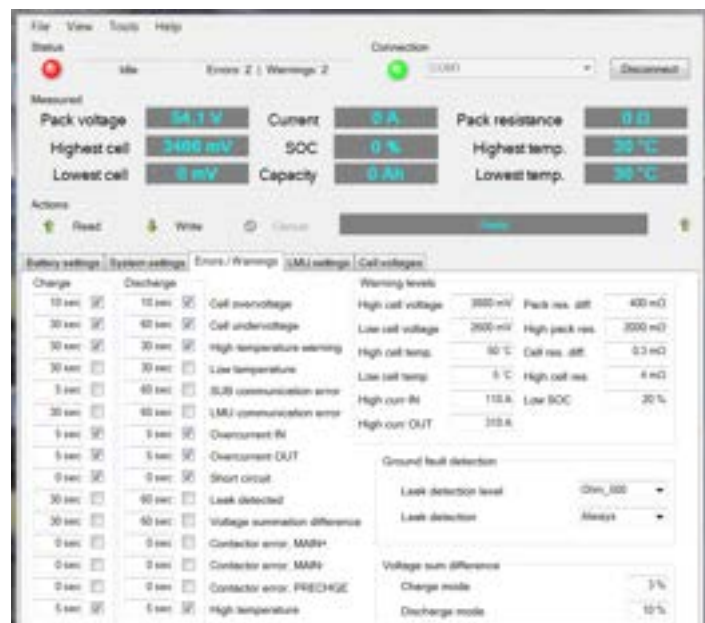


Fig. 35 – Setting degli avvisi ed allarmi

Tra le funzioni monitorate a livello di protezione si annoverano overvoltage, undervoltage, oltre a rilevazione fughe di corrente, corto circuiti e guasto dell'isolamento.

In tempo reale si ha la visualizzazione dei dati l'interfaccia PC RS232: misura di SOC, SOH, (state of health) corrente di pacco, tensione a livello di pacco e singola batteria, temperatura in due punti (un sensore NTC per ogni scheda LMU), resistenza interna di tutte le batterie (misurata durante le fasi di carica e solamente tra il 30% ed il 70% del SOC). La Fig. 36 illustra, ad esempio, la tensione di tutte le celle, oltre i parametri globali del pacco.



Fig. 36 – Visualizzazione delle tensioni parziali

I dati visualizzati possono essere registrati: il BMS produce un file .csv (comma separate values) facilmente apribile con Excel). E' possibile registrare 5 parametri a scelta (fase di logging) , oltre la tensione di tutte le batterie, con un tempo di acquisizione impostabile nell'intervallo da 1 a 120 secondi (Figura 37).



Fig. 37 – Fase di logging

L'equalizzazione è di tipo passivo, durante il processo di carica, usando resistori sulla scheda LMU, con corrente di bilanciamento delle batterie fino a 0,5A, regolata da PWM. In fase di impostazione si può fissare l'ampiezza della finestra di equalizzazione, cioè la massima divergenza fra la tensione delle batterie quando il pacco è bilanciato: più si riduce il valore di tale ampiezza, maggiore sarà il tempo impiegato dal BMS per equalizzare le batterie.

Il limite riscontrato su questo BMS è stato che la tensione registrata ai capi dei contattori montati in corrispondenza dei poli è risultata 7,5V invece dei 12V previsti e necessari per chiudere gli stessi: ne è risultato che i contattori sono rimasti aperti, per cui il pacco è rimasto isolato dal ciclatore (come avverrebbe in caso di corretto funzionamento, al verificarsi di condizioni d'allarme). Per poter usare il pacco

batterie si è dovuto fare a meno dei contattori, ma questo ha impedito, come già in precedenza, di lasciare il pacco batterie assistito dal BMS in funzionamento automatico, non presidiato, e quindi non è stato possibile farlo lavorare in condizioni prossime al fine carica, ove meglio si vede l'effetto dell'equalizzazione. Anche in questo caso è tuttora in corso uno scambio di informazioni tecniche con il Fornitore per cercare di risolvere il problema rilevato.

3.4 BMS n. 4

Tramite apposito Accordo di Collaborazione, l'Università di Pisa ha fornito un BMS di propria concezione, con bilanciamento di tipo attivo (le celle più cariche vengono scaricate a vantaggio di quelle meno cariche, evitando in tal modo dissipazioni energetiche, tecnologia molto nota in letteratura ma altrettanto difficile a trovarsi in pratica) [3]. Tale BMS, rappresentato in esercizio in Fig. 38, è stato sottoposto da ENEA a prove di confronto con i BMS commerciali di altra tipologia (passiva, semiattiva) sopra descritti, rappresentativi dello stato dell'arte.

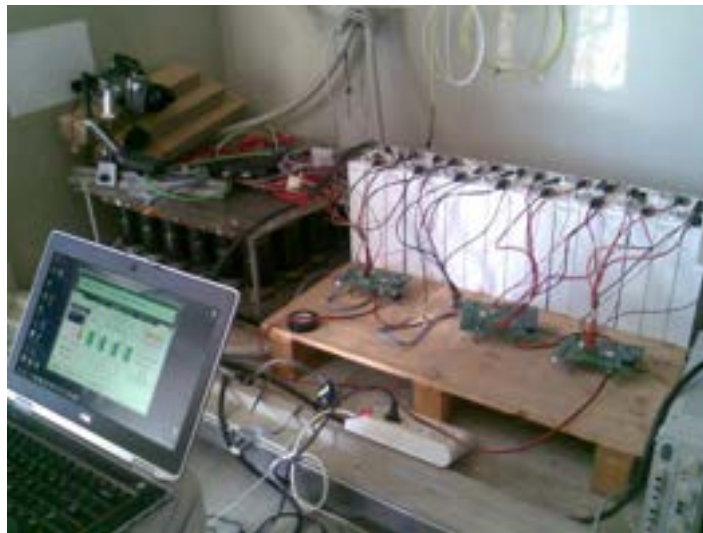


Fig. 38 – BMS n. 4 in esercizio

Il BMS è costituito da 4 schede elettroniche, ciascuna afferente a 4 batterie¹ ed avente la possibilità di funzionare come elemento "slave" o come elemento "master": in fase di configurazione del sistema è possibile definire, o meglio "battezzare", la scheda che assumerà il ruolo di master. E' inoltre possibile impostare la capacità delle batterie. Le 4 schede comunicano tra loro attraverso una linea di comunicazione CAN (cavo flessibile grigio in Fig. 38): ciascuna scheda è collegata alla precedente ed alla successiva, la prima ha una resistenza di chiusura della "catenella" CAN, l'ultima ha l'uscita CAN che va al PC attraverso un convertitore CAN/USB. Ciascuna scheda è collegata al gruppo di 4 celle cui afferisce attraverso due set di cavi, che fanno capo ad altrettanti connettori: un primo set di cavi (facilmente individuabile perché ha i cavi più sottili rispetto all'altro) di segnale per l'acquisizione delle tensioni parziali (tensioni delle singole batterie) ed un secondo set di cavi di potenza: quest'ultimo set di cavi è quello utilizzato per il bilanciamento delle singole batterie del gruppo di 4 e, come sopra accennato, ha cavi di sezione maggiore rispetto a quelli di segnale. La motivazione di questa maggiorazione di sezione risiede nel fatto che il bilanciamento è di tipo attivo attraverso un convertitore DC/DC che risiede sulla scheda, il quale si alimenta con la tensione di 4 batterie (tensione di modulo) e va a caricare di volta in volta la batteria più scarica del gruppo di 4 con amperaggio che può giungere fino a 2A: l'alto amperaggio (si tenga presente che i BMS commerciali di tipo passivo lavorano nel migliore dei casi con correnti che sono dell'ordine di alcune centinaia di mA) richiede l'uso di sezioni maggiori rispetto ai cavi di segnale. E' inoltre possibile un trasferimento di energia da una scheda ad un'altra (e quindi da un gruppo di 4 batterie, un modulo, ad un altro) attraverso identici cavi che costituiscono il bus di bilanciamento (l'ultima scheda è connessa con la prima, a chiudere la catena per il bilanciamento intermodulare, così creata). Sono inoltre in dotazione due

¹ La Fig. 39 riporta tre sole schede perché, all'atto della ripresa fotografica, una scheda era stata temporaneamente scollegata

sensori di temperatura, per leggere la temperatura in due punti qualsivoglia del gruppo di 4 batterie afferenti ad una data scheda elettronica, ed un lettore di corrente (montato sul polo negativo dell'intero pacco batterie).

Per una trattazione dettagliata, meno descrittiva e più tecnica, si rimanda al già citato rapporto [3].

La funzione di protezione si esplica a due livelli: condizione di "alert", condizione di "error". La condizione di alert genera un segnale di allarme che rimane visualizzato per un certo tempo, detto "time alarm on", settabile in fase di impostazione. Trascorso il tempo "time alarm on", se la condizione di alert non è rientrata si passa al livello della condizione di "error", che determina l'apertura del contattore e di conseguenza la disconnessione del pacco batterie dal ciclatore. Nella Tab. 15 sono riportati i valori corrispondenti alla condizione di "alert" ed "error", anch'essi settabili in fase di configurazione.

	Alert	Error
Tensione massima di batteria	3,65V	3,85V
Tensione minima di batteria	2,70V	2,50V
Temperatura massima	45°C	+60°C
Temperatura minima	0°C	-10°C
Corrente massima in carica	100A	200A
Corrente massima in scarica	300A	500A

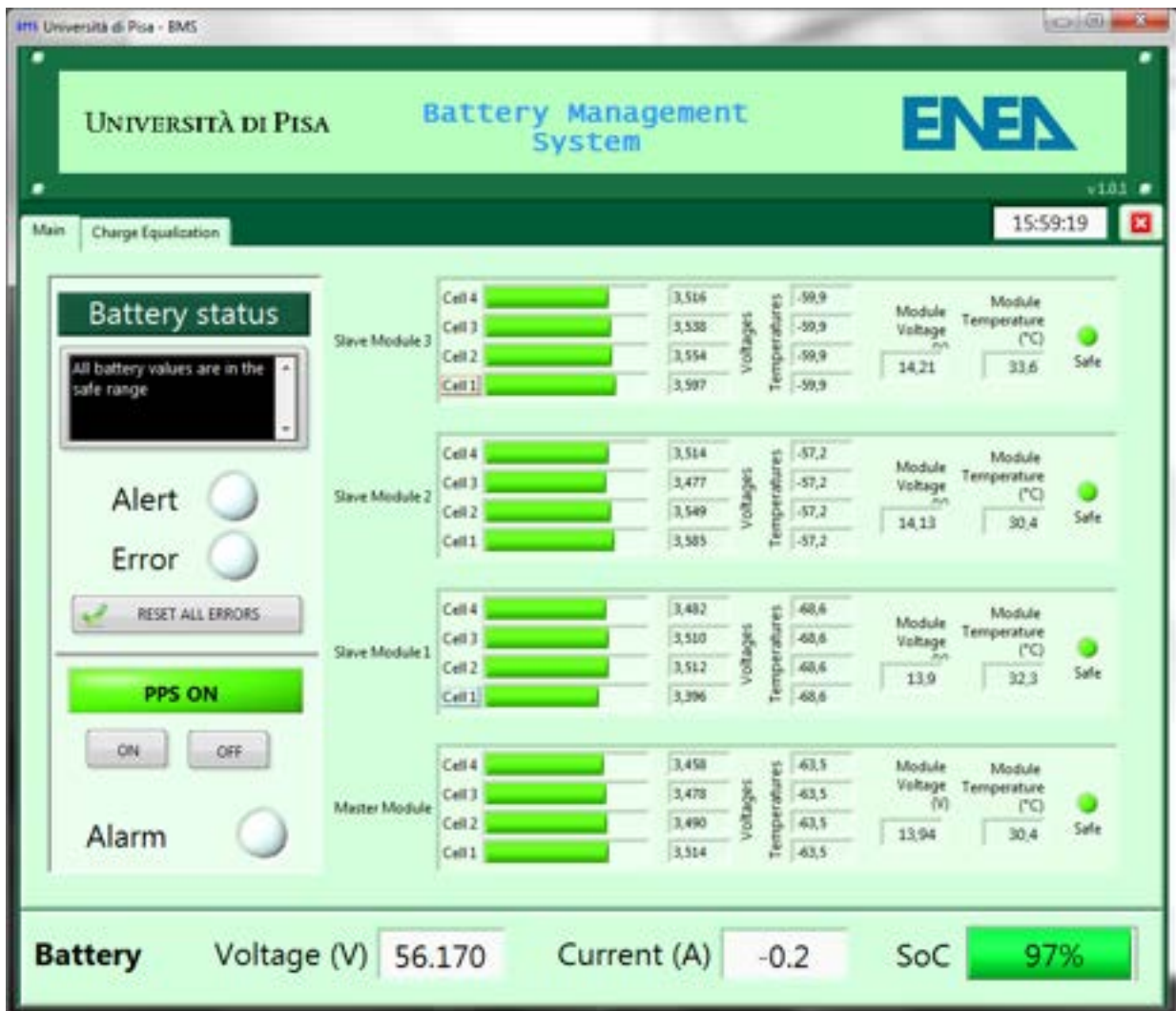


Fig. 39 – interfaccia PC del BMS n. 4

Come elemento ulteriore di sicurezza c'è il controllo manuale del contattore, tasto "PPS" in Fig. 39: quando si accende il BMS, il tasto di trova nello stato di OFF, corrispondente a contattore aperto. Per poter usare le batterie è necessario premere il tasto ON, che chiude il contattore e connette il pacco batterie al ciclatore. Visualizzazione ed acquisizione dati: in Fig. 39 è mostrata l'interfaccia PC del BMS, ove è visibile il dettaglio delle singole batterie² che costituiscono i gruppi da 4 ed anche il ruolo (master o slave) delle schede elettroniche. In condizioni normali, la barra che indica la tensione della singola batteria è verde, divenendo dapprima gialla e poi rossa quando si raggiungono condizioni di "alert" od "error". Il BMS crea automaticamente in una cartella di default un file con il nome del giorno di utilizzo. Nel caso di più utilizzi nello stesso giorno, i nuovi dati vengono sottoscritti a quelli registrati in precedenza. Attraverso il tasto "CTRL D" si entra nella finestra di Debug (Fig. 40), ove, oltre a poter impostare il valore di inizializzazione del SOC, è possibile con il tasto "Auxiliary Log" scegliere una seconda cartella di destinazione dove vengono registrati i dati: questa registrazione dei dati è in parallelo a quella di default suddetta e rimane attiva fin quando lo è il tasto "Auxiliary Log", ciò permette ad esempio di creare file diversi anche nell'ambito di uno stesso giorno di calendario. Inoltre è possibile impostare la frequenza di acquisizione, da un minimo di 1 campione/sec fino ad un massimo di 8 campioni/sec.

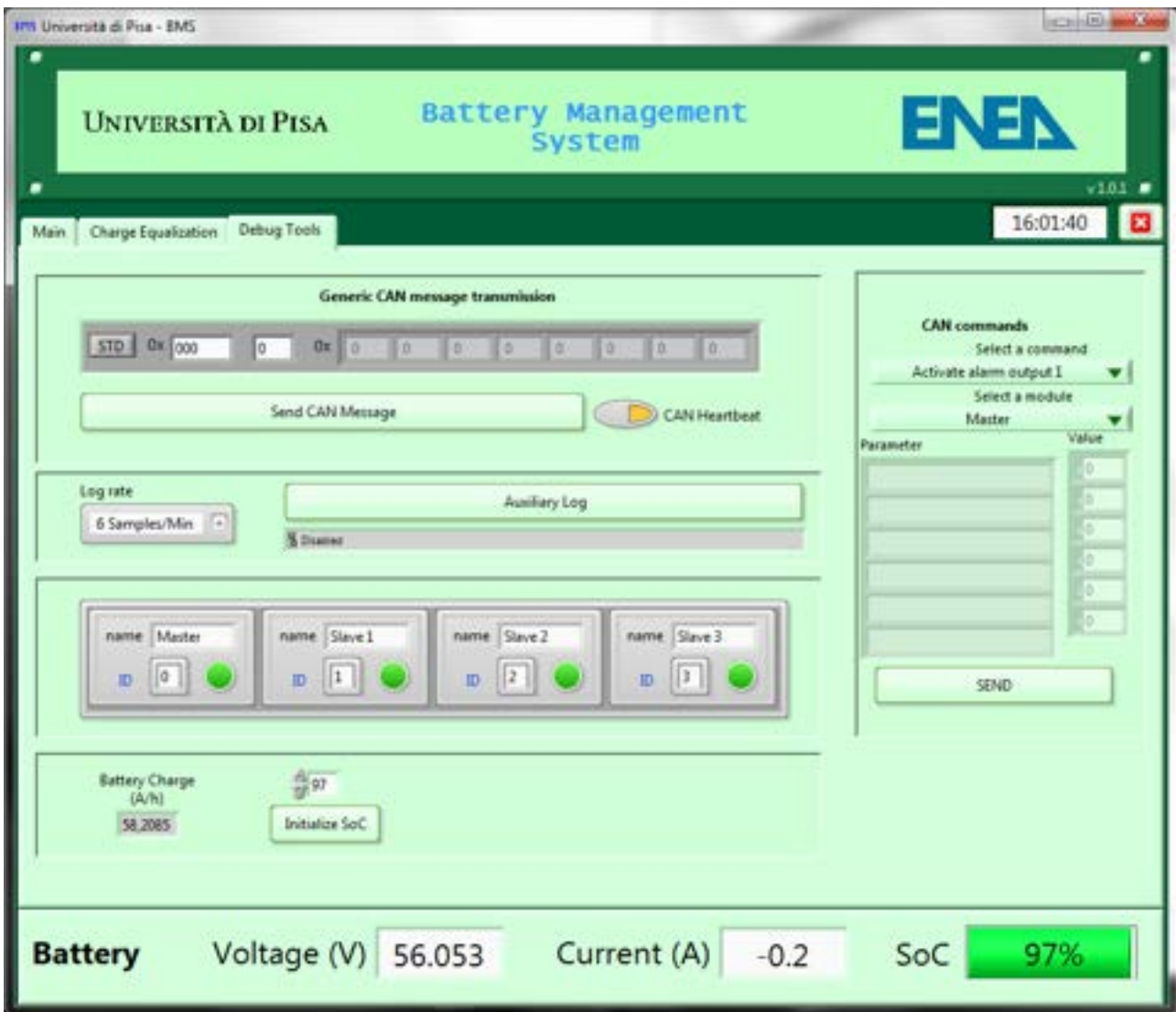


Fig. 40 - Finestra di debug

² N.B.: i valori di temperatura sono negativi in quanto i sensori di temperatura non erano collegati.

La Tab. 16 riporta la stringa di dati registrati.

Tab. 16 – Dati registrati																				
Tempo	Tensione di pacco	Corrente	Alert error	Alarm	PPS	Module ID	Cell1 V	T	Cell2 V	T	Cell3 V	T	Cell4 V	T	Cell MUX	Bal status	Bal current	Board Temp.	LTC Temp.	

Le opzioni di equalizzazione sono mostrate nella Fig. 41.

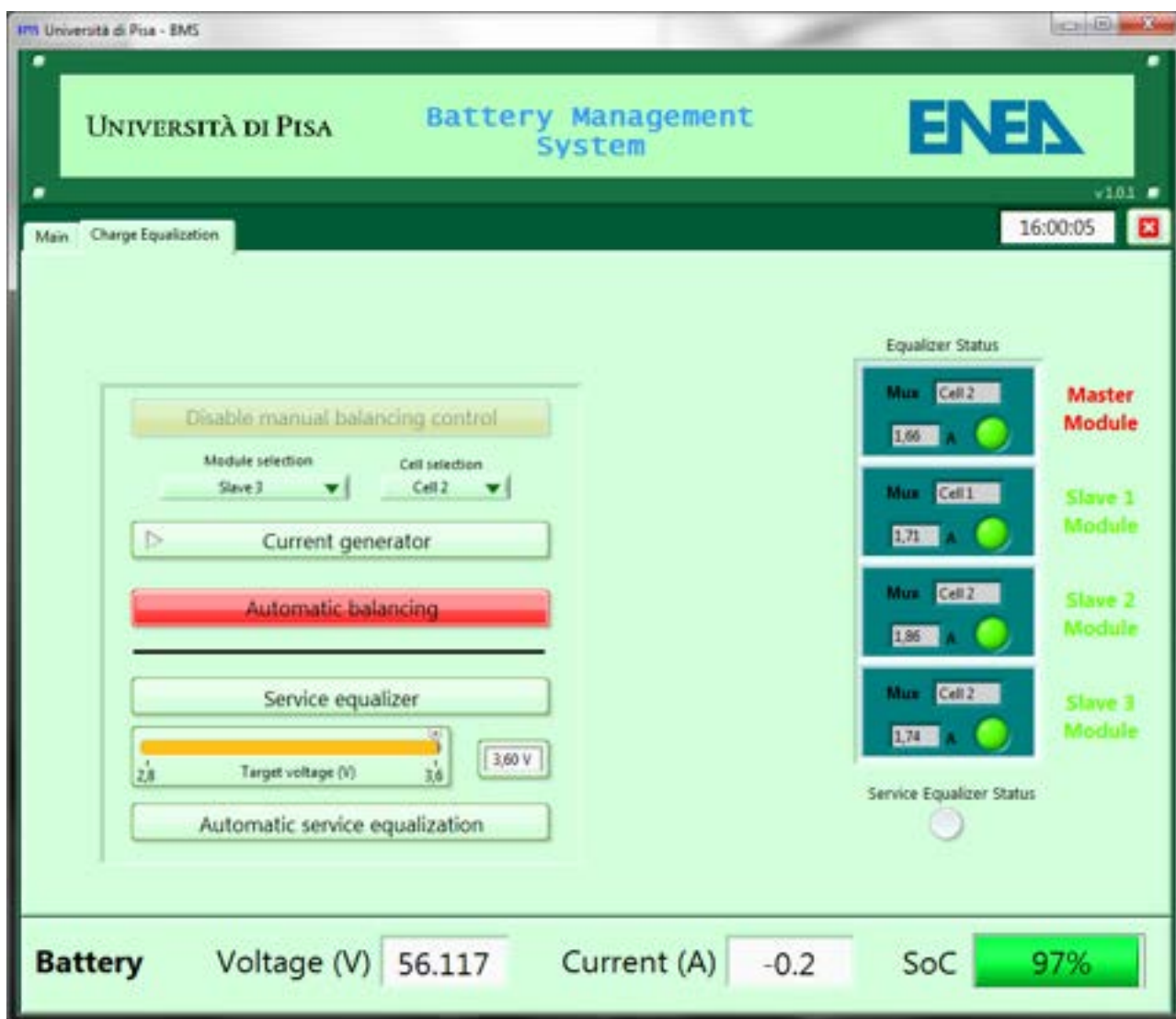


Fig. 41 – Pannello di comando dell’equalizzazione

Con il tasto “Enable manual balancing control” è possibile attivare l’equalizzazione manuale: si seleziona il modulo (gruppo di 4 batterie) e la batteria (si equalizza una batteria per volta), quindi si preme “current generator”. Attraverso il tasto “Automatic balancing” si attiva l’equalizzazione automatica in parallelo. Nella parte destra è mostrato per ogni modulo la cella che si sta equalizzando e la corrente che sta confluendo in essa: come si vede, possono confluire fino a 2A.

E’ anche disponibile un equalizzatore esterno, che fa la stessa cosa di quello interno, con la differenza che attinge da rete anziché dal gruppo di 4 batterie: ciò può essere utile, ad esempio, quando si vogliono caricare tutte le batterie alla tensione massima per costituire uno stato di riferimento di pacco batterie completamente carico. Anche l’equalizzatore esterno può avere un’attivazione completamente manuale, selezionando la singola batteria nel gruppo di 4 e premendo il tasto “Service equalizer”, oppure automatica,

impostando il valore di tensione voluta nella barra “Target voltage” e premendo il tasto “Automatic service equalization”.

Come detto, la tecnica di bilanciamento è di tipo attivo, con alimentazione dal gruppo di 4 batterie (o dalla rete, nel caso di equalizzatore esterno) ed indirizzamento della corrente di uscita sulla batteria del gruppo più scarica. I migliori risultati si ottengono con il pacco batterie in stato di pausa, è comunque possibile anche l’equalizzazione in carica con prestazioni tanto migliori quanto più è bassa la corrente di carica (a tale scopo può essere utile impostare la fase di carica ad alta corrente fino ad una certa tensione, dopodiché si prosegue la carica a bassa corrente).

3.5 Perfezionamento della specifica di fornitura del BMS

Come mostrato nel paragrafo precedente, tutti i BMS commerciali in fase applicativa hanno mostrato difficoltà che hanno richiesto l’intervento del Fornitore nella fase post-vendita per la messa a punto del sistema. Tale fase di messa a punto è ancora in corso. Non è stato quindi possibile sfruttare a pieno le potenzialità dei prodotti forniti. Nonostante ciò, le esperienze fatte sono state sufficienti per effettuare la scelta della tipologia di BMS da adottare per i moduli batterie finali. La scelta è stata motivata da ragioni tecniche ed economiche.

Fra le motivazioni tecniche si annoverano:

- l’equalizzazione attiva, prima tra tutte, che consente di bilanciare le batterie in modo più efficiente, evitando dissipazioni d’energia,
- la versatilità e flessibilità, che consentono l’adattamento a batterie di diversa taglia (30, 60 e 100Ah) e funzione (batterie d’avviamento, batterie di trazione per veicoli elettrici off-road), rispondendo alla finalità principale della presente annualità,
- la possibilità di poter utilizzare una scheda elettronica universale sia come elemento master che come slave, per tutte le applicazioni individuate nel PAR,
- la scalabilità/modularità,
- l’interfaccia particolarmente “friendly” che ne rende l’utilizzo semplice ed al contempo sicuro.

Riguardo alle considerazioni di tipo economico, torna utile il confronto dei costi di acquisto, riportato nella Tab. 17.

Tab. 17 – Costo d’acquisto dei vari BMS esaminati		
	Costo	Data d’acquisto
BMS n. 1	575,00 €	07/2011
BMS n. 2	3.660,00 €	05/2011
BMS n. 3	3.160,00 €	08/2011
BMS n. 4	410,00 €	05/2012

Alla luce di quanto sopra, il BMS fornito dall’Università di Pisa (n. 4) è sembrato il più rispondente alle aspettative e pertanto è stato confermato per la versione finale. Quindi sono state trasmesse all’Università di Pisa alcune richieste di perfezionamento e customizzazione del prodotto, per ottimizzarlo in funzione dell’applicazione ai moduli standard, che si riportano di seguito:

- aumentare il numero dei punti di misura della temperatura, in particolare è stato richiesto di poter monitorare le 4 batterie del modulo attraverso altrettanti sensori di misura, cablati fino alle batterie, per ogni scheda (la versione fornita per la valutazione iniziale prevedeva due temperature per ogni scheda elettronica), in aggiunta ad un sensore a bordo scheda, già presente nelle versione iniziale;
- possibilità di alimentare le ventole del sistema di raffreddamento, con attivazione automatica delle stesse quando la temperatura raggiunge un limite stabilito, impostabile in fase di configurazione;
- contenere gli ingombri dei contenitori sopra e sotto il circuito stampato, precisamente 15 mm lato componenti e 5 mm dal lato opposto, per ottemperare alle esigenze di alloggiamento della scheda all’interno dell’involucro di contenimento del modulo;
- dimensioni della scheda: 132 mm x 160 mm;

- prevedere su ciascun lato da 160mm una striscia di larghezza almeno 10mm libera da componenti o piste per consentire l'accoppiamento con le guide di posizionamento e montaggio della scheda all'interno del modulo;
- alloggiare tutti i connettori per la comunicazione con l'esterno e la connessione con le batterie sul lato alto (uno dei due lati da 132mm) della scheda in modo da rendere semplici le connessioni suddette;
- realizzare il collegamento della scheda elettronica alle batterie del modulo attraverso un cablaggio dotato di connettore che si accoppia con il corrispondente sulla scheda e terminali ad occhiello con foro di diametro pari alla dimensione del terminale delle batterie ($\varnothing 12\text{mm}$ per le batterie da 30Ah, $\varnothing 6\text{mm}$ per le batterie da 60Ah, $\varnothing 8\text{mm}$ per le batterie da 100Ah);
- individuare un connettore da pannello per la comunicazione con altri moduli e l'esterno, da collocare centralmente sul coperchio del contenitore, mantenendo all'interno uno spazio sufficiente per piegare i fili e far arrivare i connettori alla scheda;
- progettazione del cablaggio esterno per la comunicazione tra moduli e con l'esterno (es. pc).

Sulla base di tali richieste, l'Università di Pisa ha realizzato la progettazione della versione finale del BMS, che è trattata in [4], al quale si rimanda per i dettagli.

Le schede elettroniche alloggiate all'interno dei moduli dimostratori sono state successivamente approvvigionate dalla Digitech S.r.l., una ditta terzista specializzata nella costruzione di schede elettroniche, che le ha realizzate sulla base della specifica prodotta in forma congiunta dall'Università di Pisa/ENEA.

4. Realizzazione dei moduli batterie

Il modulo contiene: quattro batterie, la scheda elettronica di controllo, le connessioni interne di potenza e di segnale, i ventilatori, il connettore per la comunicazione all'esterno (con altri moduli nel caso di BMA slave, con il PC, il charger o la centralina del veicolo nel caso di BMS master).

All'interno del modulo le batterie sono disposte distanziate di 1 cm l'una dall'altra per creare i canali di ventilazione, come spiegato nel capitolo relativo alla gestione termica. Nel cercare il miglior compromesso tra dimensioni e prestazioni dei moduli, nel caso delle batterie da 30Ah e 60Ah le 4 unità sono state disposte secondo una matrice 2x2 (due righe e due colonne), nel caso invece delle batterie da 100Ah la migliore soluzione è risultata quella dei 4 elementi in linea (matrice 1x4). Causa le diverse dimensioni delle batterie in funzione della taglia, è stato necessario realizzare tre involucri: uno per i moduli da 30Ah (avviamento e trazione), uno per quelli da 60Ah (avviamento e trazione) ed uno per quello da 100Ah (il modulo da 100Ah si fa solo per l'applicazione di trazione).

Il sistema di gestione termica è invece lo stesso: tutti i moduli montano sul coperchio i tre ventilatori da 34,5Nm³/h 75,5Pa @ 7.000 giri/min. Detto sistema, essendo ottimizzato per il modulo da 100Ah, risulterà sovradimensionato per quelli da 60Ah e da 30Ah: si è preferito adottare questa scelta a vantaggio della standardizzazione (nell'ottica di una produzione di serie, sfruttare il fattore costo/quantità), in considerazione del fatto che, nel caso dei moduli da 30Ah e 60Ah, il sovradimensionamento si traduce in un tempo inferiore impiegato dai ventilatori, quando attivati, a raffreddare le batterie.

Anche la scheda elettronica è la stessa per tutti i tipi di modulo, essa viene collocata verticalmente in corrispondenza della mezzeria del modulo³ a mezzo dello scorrimento in guide prismatiche che ne consentono il montaggio ed il fissaggio: l'adattamento della scheda elettronica alle diverse dimensioni dei moduli è ottenuto realizzando guide di larghezza diversa, in tal modo l'elettronica rimane completamente universale (sempre come elemento di standardizzazione) mentre è la meccanica che si adegua ai vari tipi di modulo variando la dimensione in larghezza delle guide in modo da consentire l'alloggiamento della scheda elettronica: invece che mantenere fissa la dimensione delle guide e variare le dimensioni della scheda elettronica in funzione del modulo su cui va montata, si è preferito mantenere fissa la scheda e variare la dimensione delle guide in funzione del modulo; in questa maniera l'elettronica rimane completamente standard e la differenziazione pesa solamente sulla meccanica, che comunque è costretta ad adeguarsi al modulo perché sono diverse le batterie che costituiscono i vari tipi di modulo. Le Fig. 42 riporta i disegni dei moduli, evidenziando i parametri costruttivi dianzi accennati.

³ La posizione desiderata per l'alloggiamento della scheda elettronica era al di sopra delle batterie, nello spazio tra queste ed il coperchio dell'involucro, con i ventilatori montati direttamente a bordo della scheda elettronica, in apposite sedi ricavate sul circuito stampato. Tale soluzione richiedeva la realizzazione di un circuito stampato multistrato ed uno studio di ricollocazione dei componenti della scheda elettronica: questioni di tempi di consegna incompatibili con il termine delle attività del presente anno, non hanno consentito di posizionare la scheda elettronica come desiderato. Tale posizionamento verrà sicuramente realizzato nell'eventualità di un upgrade di perfezionamento/ingegnerizzazione e porterà ad una apprezzabile riduzione delle dimensioni in pianta senza un apprezzabile aumento dell'altezza del modulo, migliorando così il volume d'ingombro e quindi i valori delle prestazioni specifiche.

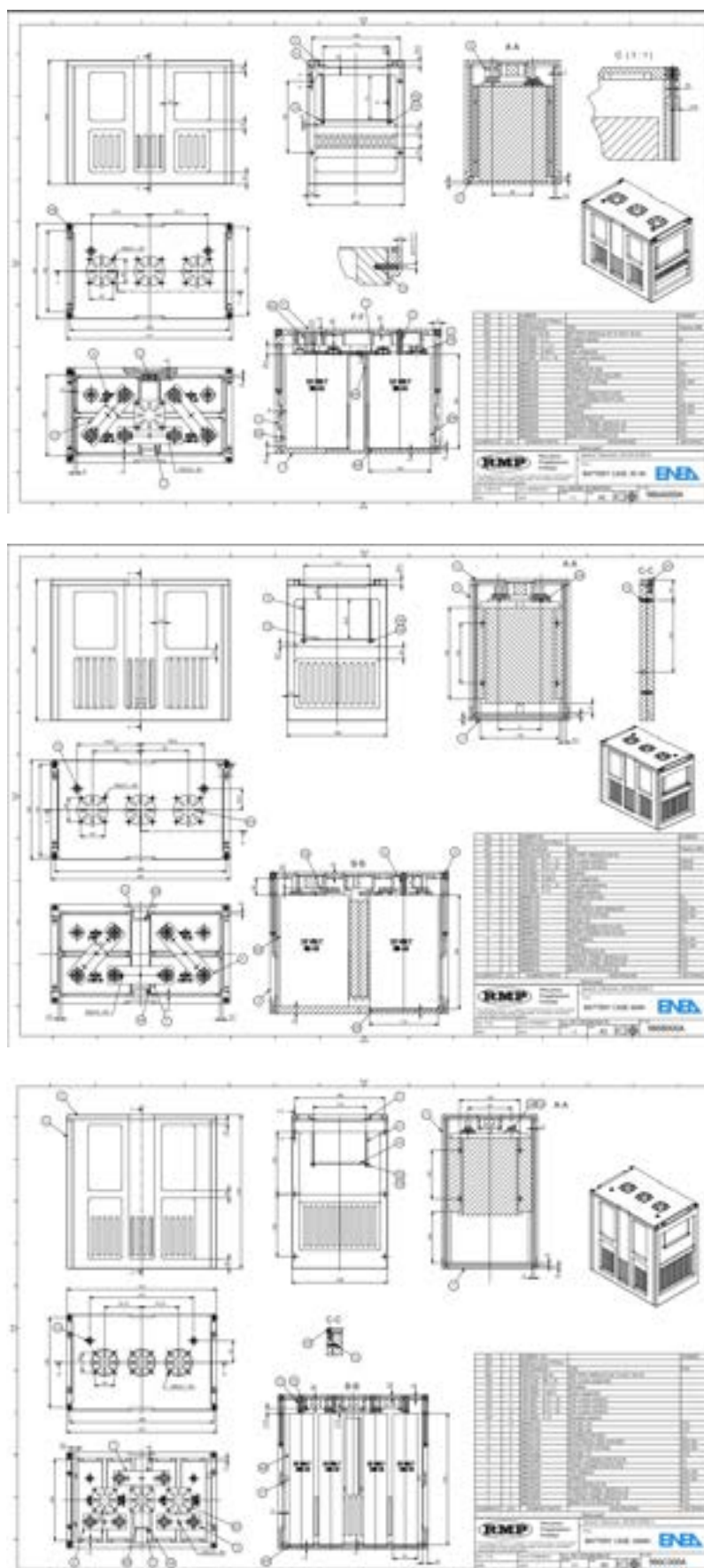


Fig. 42 – Modulo da 30Ah (in alto), 60Ah (al centro), 100Ah (in basso)

La Fig. 43 illustra la realizzazione dei 3 moduli: quello da 30Ah (sinistra), 60Ah (centro) e 100Ah (sinistra). Si tenga presente che, vista l'universalità della scheda elettronica di controllo e la sua possibilità di assolvere tanto alla funzione di slave quanto a quella di master, il modulo di avviamento e di trazione della stessa taglia sono identici. Per favorire l'alleggerimento, i moduli sono in materiale plastico ad alta resistenza meccanica.



Fig. 43 – Modulo da 30Ah, 60Ah, 100Ah

In Fig. 44 e 45 vengono mostrate le soluzioni adottate all'interno dei moduli.

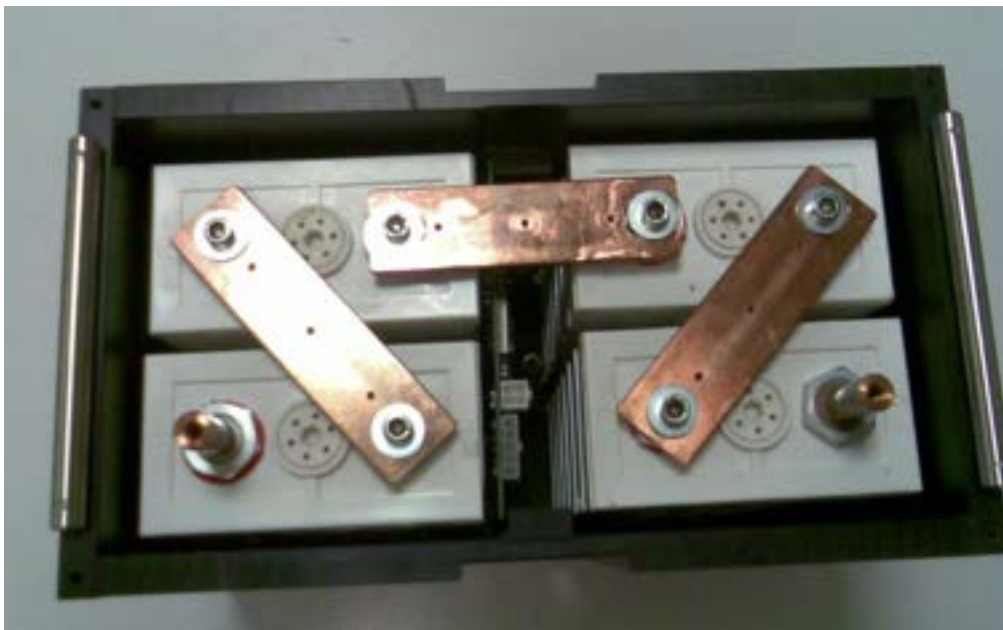


Fig. 44 – Interno del modulo da 100Ah

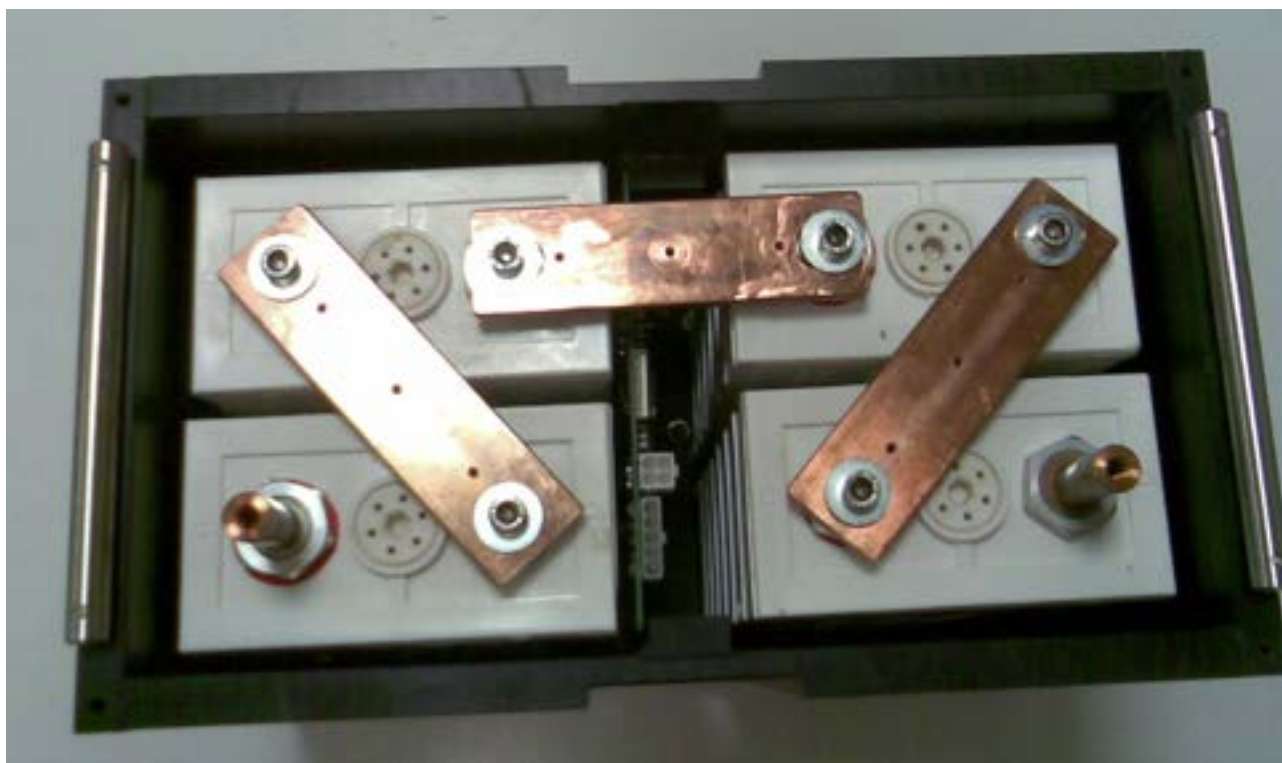


Fig. 45 – Soluzione adottata per l'interno del modulo da 30Ah e 60Ah

Infine, in Fig. 46, è mostrato il sistema batterie costituito da 4 moduli da 12V – 100Ah che costituisce il dimostratore per l'alimentazione di un piccolo veicolo da giardinaggio [1].



Fig. 46 – Sistema dimostratore 48V_n – 100Ah

A conclusione dell'argomento, si riporta una tabella riassuntiva riportando, per ciascun tipo di modulo, dimensioni e peso e, a seguire, un'analisi di costo basata sui costi sostenuti per la realizzazione dei moduli.

Capacità	Dimensioni	Peso	Densità di energia	Densità di potenza ⁴	Energia specifica	Potenza specifica ⁵	Gruppo BCI	Dimensioni gruppo BCI
[Ah]	L x W x H [mm]	[kg]	[Wh/dm ³]	[W/dm ³]	[Wh/kg]	[W/kg]		
30	277x160x208	8,3	42	125	47	139	48	278x175x190
60	297x166x236	12,3	66	198	63	188	27	306x175x225
100	310x186x318	19,1	70	210	67	201	76	334x179x216

Nell'ultima colonna si è riportato il gruppo BCI (che definisce gli standard dimensionali per batterie al piombo) in cui è possibile collocare i moduli con riferimento alle dimensioni in pianta (dimensione del modulo inferiore o compatibile con quella del gruppo BCI).

Modulo	Costo batterie	Costo meccanica ⁶	Costo elettronica	Costo totale
30Ah	120,00 €	1.200,00 €	410,00 €	1.730,00 €
60Ah	240,00 €	1.400,00 €	410,00 €	2.050,00 €
100Ah	400,00 €	1.750,00 €	410,00 €	2.560,00 €

⁴ Valore continuativo, non di picco

⁵ Valore continuativo, non di picco

⁶ Comprensivo di contenitore, connessioni interne di potenza, ventilatori

Conclusioni

Come da programma del presente anno di attività, sono stati realizzati un modulo per avviamento di piccolo taglia (30Ah) ed uno di grande taglia (60Ah), un modulo per trazione di veicoli off-road di piccola taglia (30Ah), uno di media taglia (60Ah) ed uno di grande taglia (100Ah). Inoltre, come dimostratore è stato realizzato un sistema batterie da 48V – 100Ah, costituito da quattro moduli standard per trazione di grande taglia (100Ah) connessi in serie, ciascuno dotato del proprio BMS di modulo, con un modulo che assume il ruolo di BMS master. Tali moduli sono adatti all'uso come batterie d'avviamento e trazione di veicoli elettrici off-road: a tale scopo, le tre tensioni e capacità standard (48, 96 e 192V, 30, 60, 90Ah) che nello studio riportato in [1] si sono dimostrate sufficienti per una vasta gamma di applicazioni nei settori suddetti, possono essere ottenute dalla connessione in serie di sistemi da 48V.

Dai valori riportati in tabella 19, risulterebbe per il modulo da 12V/100 Ah un prezzo unitario di 2000€/kWh, decisamente troppo per una applicazione commerciale. In realtà, in questo caso abbiamo a che fare con dei dimostratori funzionali, per la costruzione dei quali sono servite lavorazioni di macchina ed elettronica costruita su disegno con montaggio manuale, che fanno lievitare il prezzo iniziale delle celle da 3.2 V/100 Ah, pari a 400 €/kWh.

Gli analoghi moduli da 12V/100 Ah acquistati nel 2010, realizzati in serie, costavano già allora meno della metà (1.200 €), senza aver tutta la flessibilità dei nostri dimostratori, e nemmeno il bilanciamento attivo ed il raffreddamento incorporato. E solo quest'ultimo migliora l'energia estraibile in condizioni di funzionamento reale del 15-20%.

In una produzione di serie questi miglioramenti avrebbero un impatto quasi nullo sul costo del modulo, per cui si ritiene che il prezzo di vendita di questi moduli per una produzione di serie possa portarsi a 5÷600 €/kWh, di cui il 60% dovuto al costo delle celle al litio.

Qui si conclude il programma del presente anno di attività. Nel percorso successivo al loro concepimento, i moduli dovranno essere testati per validarne le prestazioni e l'affidabilità: la disponibilità dei moduli e delle attrezzature realizzate permetterà di approfondire le prove per un eventuale miglioramento. L'elettronica, in particolare, come ricordato in diverse note del presente documento e nel documento di report [4] dell'Università di Pisa, è suscettibile di miglioramenti e di riduzione del costo.

Successivamente alla fase di validazione ed eventuale miglioramento, si potrà pensare di cercare un partner industriale interessato quantomeno a provare i moduli batterie.

Riferimenti bibliografici

1. F. Vellucci, G. Pede, " Sviluppo di moduli batterie litio-ioni per avviamento e trazione non automotive", Report RdS 2011/27
2. M. Ceraolo, T. Huria, C. Zappacosta, "Sviluppo di moduli integrati, completi di BMS", report RdS 2011/318
3. F. Baronti, G. Fantechi, R. Roncella, R. Saletti, "Sviluppo di un BMS (Battery Management System) con sistema di bilanciamento attivo per sistema batterie al LiFePO_4 da 48Vn – 100Ah", Report RdS/2012/088
4. F. Baronti, G. Fantechi, R. Roncella, R. Saletti, "Progettazione definitiva del BMS per batterie d'avviamento e trazione non automotive", Report RdS/2012/089

Abbreviazioni ed acronimi

ρ	densità
Γ	portata in massa
μ	viscosità
A	area
BMCU	Battery Management Control Unit
C	valore di capacità nominale
C/n	valore di corrente pari alla capacità nominale diviso n
CC	carica a corrente costante
CC/CV	Carica a corrente costante/tensione costante
c_p	calore specifico a pressione costante
csv	comma separate values
CV	carica a tensione costante
D	diametro
F	fattore di attrito di Fanning
h	coefficiente di scambio termico
I	corrente
I_{CC}	corrente di avviamento a freddo, Cold Cranking Amperes
I_{HCE}	massimo valore di corrente che può essere usato per 30 secondi
k	conducibilità termica [W/m K]
L	lunghezza
LFP	litio-ferrofosfato
$LiFePO_4$	litio-ferrofosfato
LMU	Local Monitoring Unit
nC	valore di corrente pari ad n volte la capacità nominale
NMC	nickel-cobalto-manganese
Nu	numero di Nusselt
\varnothing	diametro
PPS	controllo manuale contattore
Pr	numero di Prandtl
Q	portata in volume
q''	flusso termico
R	resistenza
$R_{1C,cha}$	resistenza interna complessiva in carica 1C
$R_{1C,dch}$	resistenza interna complessiva in scarica 1C
Re	numero di Reynolds
$R_{HC,dch}$	resistenza interna complessiva in scarica a corrente elevata
RT	room temperature, temperatura ambiente
$R_{\Omega,cha}$	resistenza interna in carica
$R_{\Omega,dch}$	resistenza interna in scarica
S	superficie
SOC	stato di carica
SOH	stato di salute
T	temperatura
u	velocità
V	tensione
W	potenza