



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Applicazione di un sistema di accumulo costituito da batterie al Litio
ad un impianto funicolare: risoluzione dei problemi termici e
gestione delle potenze

Manlio Pasquali, Francesco Vellucci

APPLICAZIONE DI UN SISTEMA DI ACCUMULO COSTITUITO DA BATTERIE AL LITIO AD UN IMPIANTO FUNICOLARE: RISOLUZIONE DEI PROBLEMI TERMICI E GESTIONE DELLE POTENZE

Manlio Pasquali, Francesco Vellucci (Enea)

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto: Sistemi avanzati di accumulo di energia

Responsabile Progetto: Mario Conte, ENEA

INDICE

1 Introduzione	4
2. Attività svolta e risultati ottenuti	5
2.1 Test del pacco batterie su ciclo di potenza – problema termico	5
2.2 Caratteristiche del nuovo case	7
2.3 Criteri di impostazione delle prove termiche	14
2.4 Prima prova termica	16
2.5 Seconda prova termica	18
3 Algoritmo di gestione del sistema di accumulo	20
3.1 Gestione termica	22
3.2 Considerazioni sulla stima dello stato di carica	22
3.3 Equalizzazione della tensione e carica del pacco batterie per la stima dell'invecchiamento	23
4 Conclusioni	25
5 Appendice: disegni di montaggio del case	26

1 INTRODUZIONE

L'attività in esame consiste nel dotare un impianto funicolare di un sistema di accumulo costituito da batterie al litio, sistema adatto a recuperare l'energia prodotta dalla funicolare nella fase di discesa della vettura per poi restituirla nella fase di salita diminuendo così l'assorbimento di potenza ed energia dalla rete.

Nelle prime due annualità si è individuato un impianto di riferimento, quello della funicolare di San Vigilio, che collega Bergamo bassa con Bergamo alta, si sono stretti accordi di collaborazione con la ATB di Bergamo, gestore dell'impianto, e la EEI di Vicenza, costruttore dell'azionamento che lo pilota, il tutto con l'aiuto dell'Università di Pisa coinvolta insieme ad Enea nel progetto.

La particolarità della Funicolare di San Vigilio è quella di essere costituita da una sola vettura, pertanto, non avendo un contrappeso, si ha che l'azionamento elettrico dell'impianto deve fornire potenza ed energia nella fase di trazione ed assorbirne nella fase di frenatura: questa particolarità rende l'impianto ideale per l'introduzione di un accumulo elettrochimico stazionario, quindi non vincolato a soddisfare limitazioni di peso e volume particolarmente restrittive come nel caso automobilistico. L'accumulo in questione sarà posto all'interno di una stanza sotterranea, ventilata e che garantisce una temperatura ambiente variabile tra 15 e 20 °C sia d'inverno che di estate.

Il lavoro delle scorse annualità aveva portato sia ad individuare l'impianto che a dimensionare il pacco batterie, scelto in base alla disponibilità del mercato: si sottolinea che nel caso di batterie al litio è importante disporre di un sistema elettronico di supervisione molto affidabile, il cosiddetto BMS (Battery Management System) senza il quale il pacco potrebbe addirittura danneggiarsi.

La ricerca delle batterie da acquistare è stata quindi legata a quella del BMS: alla fine si sono adottate le batterie per trazione elettrica EIG da 40 Ah utilizzate nei veicoli MicroVett, costruttore di veicoli elettrici, che per la sua attività ha realizzato un BMS fornito ad Enea insieme al sistema di accumulo.

Il dimensionamento delle batterie è avvenuto simulandone il comportamento sul ciclo più pesante che la funicolare può subire: i parametri inseriti nella simulazione sono stati ricavati dalle poche informazioni presenti sul data sheet del prodotto, in particolare non si avevano informazioni sui parametri dinamici delle celle e sulle caratteristiche di smaltimento termico del pacco.

Una volta portate in Enea le batterie sono state testate per verificarne l'integrità ed inviate velocemente a Vicenza, alla EEI, per integrarle nel sistema in scala che è stato costruito come prototipo dell'azionamento della funicolare.

A Vicenza si è verificato che l'integrazione della parte di segnale non pone problemi ma sono emersi gravi problemi dal punto di vista termico (inizio ultima annualità) in quanto il pacco, a causa della concezione del case (il contenitore), non riesce a dissipare calore.

Eseguendo cinque cicli di lavoro a metà della potenza di dimensionamento prevista per l'applicazione con il pacco posto nel contenitore originario si osserva che le batterie raggiungono una temperatura di funzionamento che ne compromette la vita utile.

Per risolvere il problema si è deciso di raddoppiare la capacità delle batterie, utilizzando un nuovo pacco identico al primo, e di progettare e realizzare un case totalmente nuovo pensato per questa applicazione. L'operazione ha richiesto tempo a causa di una serie di problemi burocratici e dei tempi necessari a reperire le batterie, sempre fornite da Microvett, ma ha portato alla realizzazione ed al testing del nuovo sistema, che ha fornito risultati eccellenti. Attualmente le batterie sono a Bergamo, installate in un locale sotterraneo che ospita parte dell'impianto elettrico della funicolare. Dato che EEI ha avuto un ritardo nei tempi di consegna del convertitore che andrà associato all'accumulo non è stato ancora realizzato un test finale sull'applicazione, ma, a parte l'esercizio vero e proprio del sistema e la verifica della durata della vita, dal punto di vista dello sviluppo del sistema di accumulo e del suo interfacciamento con il convertitore il lavoro è da ritenersi concluso.

2. ATTIVITÀ SVOLTA E RISULTATI OTTENUTI

La terza annualità del progetto è stata incentrata sulla analisi delle cause del problema termico rilevato sul pacco EIG e sulla risoluzione dello stesso ottenuta tramite il raddoppio della capacità della batteria e la progettazione e realizzazione di un nuovo contenitore.

2.1 TEST DEL PACCO BATTERIE SU CICLO DI POTENZA – PROBLEMA TERMICO

Si ricorda che il sistema originario acquistato da Enea era costituito da 5 moduli batterie litio-ioni 86.4V – 40Ah ottenuti dalla connessione in serie di 24 unità da 40Ah, essendo ciascuna unità realizzata da 2 celle da 20Ah in parallelo: nelle foto sono mostrati i moduli montati nella sala prove Enea.



Fig. 1 Pacco batterie EIG da 40 Ah 86 V

Prima di spedire i moduli a Vicenza in Enea si era lavorato sia sulle connessioni di potenza (che si è deciso di realizzare tramite bus bar acquistate per questo scopo) sia su quelle di segnale: l'immagine seguente mostra il sistema assemblato nel laboratorio Enea.



Fig 2 Connessioni di potenza e di segnale

A Vicenza si è rimontato il pacco batterie, lo si è collegato all'inverter realizzato da EEI e si sono stabiliti i protocolli per lo scambio di informazioni tra il controllore dell'inverter ed il BMS delle batterie.

Una volta eseguite queste operazioni si è sottoposto il pacco ad un ciclo di lavoro di potenza pari alla metà della massima possibile nel ciclo reale: la tabella seguente riporta i risultati della prova.

PROVE CONDOTTE SUL CICLO REALE, META' POTENZA

Numero di cicli	Temperatura delle celle centrali del modulo	Note
1	+40.0°C	
2	+41.0°C	
3 ÷ 4	+44.6°C	
5	+46.0°C	
6 ÷ 7	+50.0°C	Allarme di sovratemperatura

Tab. 1 Risultati della prova a metà potenza

In termini di andamenti di tensione e corrente il comportamento del pacco ha soddisfatto e specifiche, ma la temperatura è salita oltre il limite consentito.

La figura seguente riporta l'andamento delle tensioni di batteria reale e simulato in funzione della stessa corrente in ingresso:

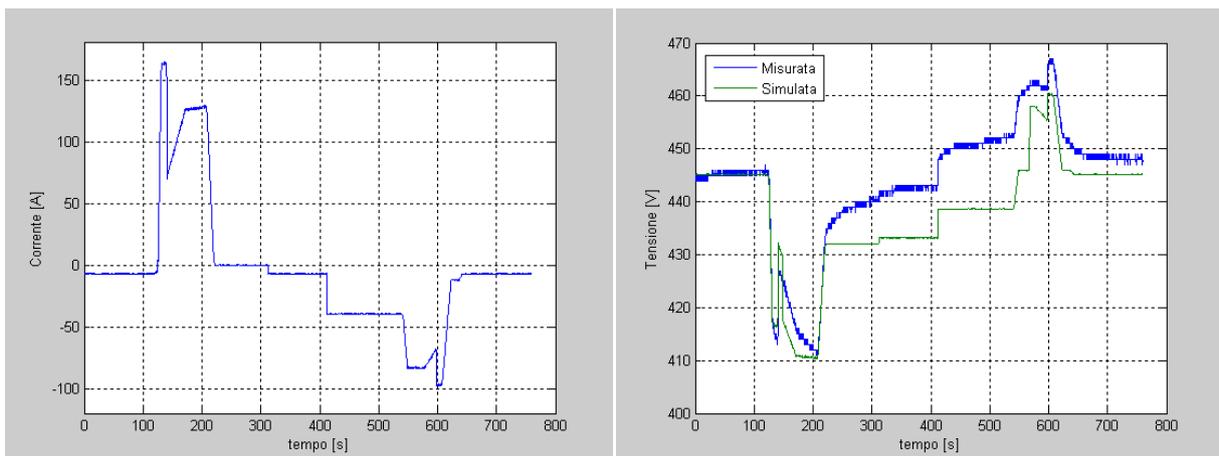


Fig. 3 a) Andamento della corrente di batteria b) corrispondente andamento delle tensioni

Il modello non poteva fornire un dettaglio maggiore perché dai data sheet non si avevano informazioni sulla dinamica delle batterie, ma la sua capacità previsionale è comunque sufficiente per dimensionare il sistema di accumulo.

Il problema del surriscaldamento è dovuto alla conformazione del case delle batterie, costruito per non permettere la dispersione del calore: le figure seguenti mostrano la compattezza del pacco fornito da Microvett.

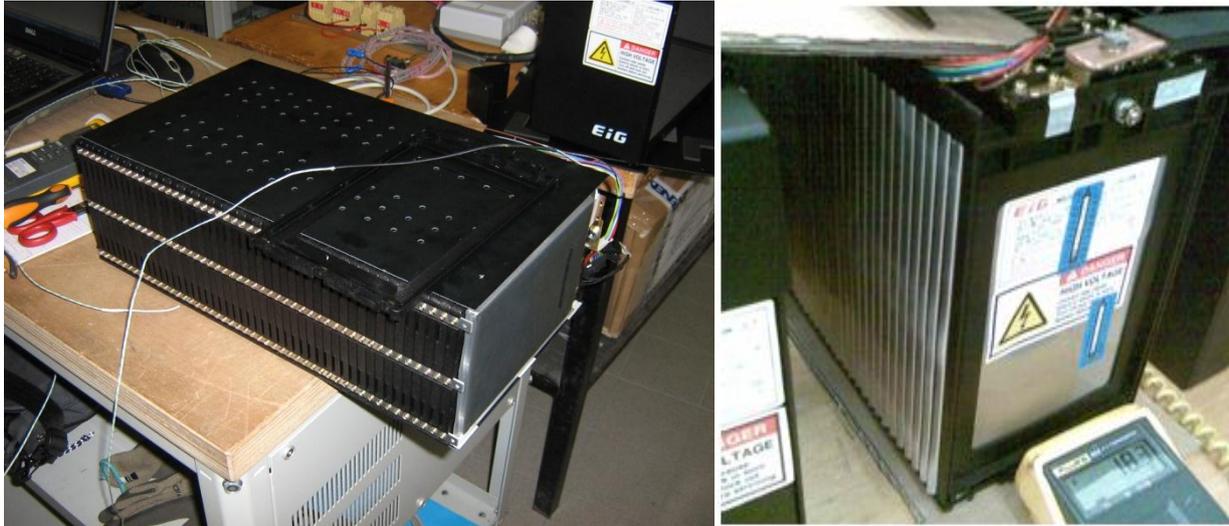


Fig 4 Il pacco batterie privo delle coperture laterali a) vista laterale b) i soli moduli

Dopo una serie di considerazioni si è deciso di ridurre le perdite di calore in ogni singola cella dimezzando la corrente che essa deve erogare e di realizzare un case di concezione totalmente opposta a quello Microvett. Per dimezzare le correnti, e quindi ridurre a circa un quarto le perdite per effetto Joule nella cella, occorre raddoppiare la capacità delle batterie, cosa che si ottiene accoppiando quattro celle e non due: i vincoli sulla tensione obbligano quindi a costruire un sistema con capacità doppia di quella originale e tensione equivalente ad esso.

2.2 CARATTERISTICHE DEL NUOVO CASE

Il nuovo case deve soddisfare esigenze completamente diverse da quello preesistente: infatti il primo è destinato a una applicazione veicolare di trazione elettrica pura, dove la necessità è quella di occupare poco spazio, le batterie erogano una corrente piccola rispetto alla loro capacità ed il calore deve essere mantenuto e non smaltito. Il nuovo contenitore dovrà operare in un ambiente a temperatura quasi costante, aerato, dove i problemi legati al peso ed alla occupazione di volume sono minori che nel caso veicolare (ma sentiti): per contro dovrà soddisfare le normative di sicurezza relative agli impianti elettrici, potrà essere esposto alla polvere, dovrà essere facilmente maneggiabile ed ispezionabile da un tecnico, dovrà operare ad alte correnti impulsive e garantire lo smaltimento del calore.

Sinteticamente il case deve essere:

- 1) Adatto ad usi stazionari
- 2) Con possibilità di scambiare calore con l'esterno senza ventilazione aggiuntiva
- 3) Previsto comunque di ventilazione aggiuntiva
- 4) Trasportabile
- 5) Sovradimensionato rispetto alle correnti di lavoro
- 6) Rispondente alle normative di sicurezza
- 7) Compatibile con i vecchi sistemi di collegamento delle batterie
- 8) Compatibile con il montaggio delle schede del sistema di supervisione

Con i tempi a disposizione non si era in grado di effettuare uno studio termico approfondito del sistema: si è allora deciso di sovradimensionare il tutto sia dal punto di vista dello scambio termico con l'esterno che da quello del dimensionamento delle connessioni interne tra le celle. Per illustrare le scelte fatte più che ai disegni di progetto è conveniente ricorrere alle immagini riprese nelle varie fasi di realizzazione del lavoro.

La figura seguente mostra come le singole celle siano state poste ad una distanza di 5 mm l'una dall'altra: in questo modo ci si è assicurati la possibilità della circolazione interna di aria.

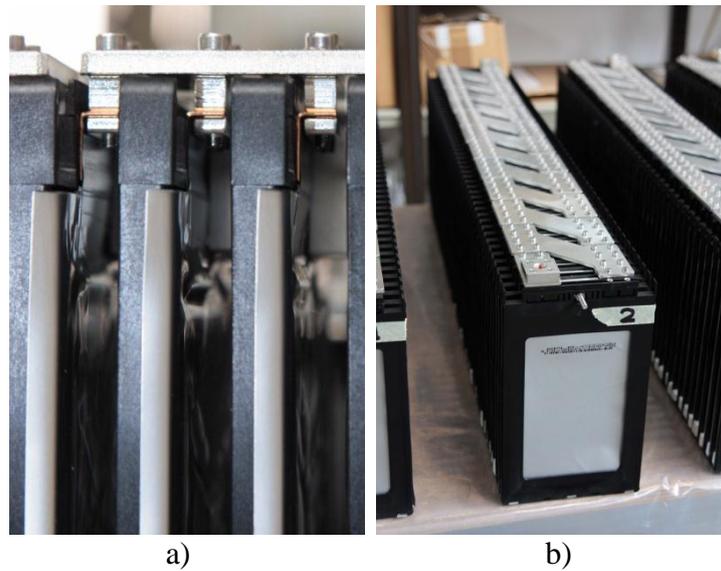


Fig. 5 Spaziatura delle singole celle a) vista laterale b) frontale

Le celle sono fornite da Microvett complete di una maschera di plastica che ne assicura il corretto fissaggio ai conduttori delle vie interne e le protegge una ad una da deformazioni ed eventuali urti. La maschera permette il passaggio di un tirante nella sua parte frontale alta e di tre lamierini per bloccare la struttura alla base: questo ha posto dei problemi nel disegno dei nuovi collegamenti perché il sistema di montaggio delle singole celle ed i collegamenti elettrici devono essere compatibili con quelli utilizzati nel case precedente ma in questo caso devono però permettere di mettere in parallelo quattro celle e non più due, nella figura 5 a) e 5 b) è evidenziata la soluzione ideata per ottenere questo scopo: in 5 a) si vedono i distanziali e la struttura di collegamento alle vie interne che è stata sovrapposta alla precedente, in 5 b) le celle impilate utilizzando il vecchio sistema di sostegno ed i nuovi distanziali. Di seguito sono mostrate la vecchia e la nuova soluzione in modo da poterle paragonare direttamente:

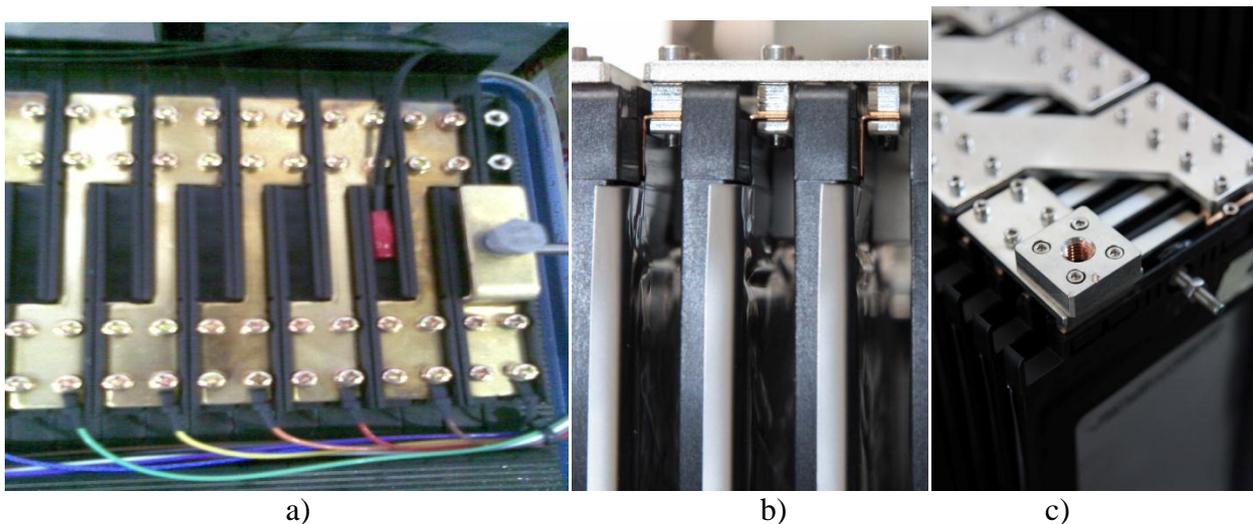


Fig. 6 Confronto tra il vecchio sistema di collegamento a) e la nuova soluzione b) c)

Si noti come la struttura delle vie interne sia cambiata totalmente, in Fig. 6 a) la corrente è costretta a passare per una piccola sezione, realizzando un fusibile di protezione, in Fig. 6 c) invece la

sezione è sempre sovrabbondante rispetto alle correnti previste e non sono presenti spigoli o strozzature. Il materiale originale dei collegamenti era ottone, per il nuovo contenitore si è utilizzato rame, rivestito in modo da proteggerlo dalla corrosione: si è dimensionata la sezione per una portata continuativa di 350 A.

La base della struttura di contenimento che alloggia tutte le celle è sollevata dal terreno, ma non dispone di fori per il passaggio dell'aria, si vuole infatti evitare l'eventuale ingresso di polveri e di acqua.



Fig. 7 Struttura di contenimento a) Base b) Vista laterale con le celle

All'interno sono state inserite una striscia di materiale soffice pensata per smorzare eventuali urti subiti dalle batterie durante il trasporto e delle connessioni elettriche per la messa a terra di tutto il case. Si noti come le celle oltre ad essere separate dai distanziali sono tenute ferme da spugnette che assicurano lo smaltimento termico e facilitano il montaggio dell'insieme che è nel contempo resistente ed elastico (Fig. 8).



Fig. 8 Strutture di contenimento a) della base b) all'interno del pacco

Le termoresistenze necessarie all'elettronica sono state alloggiate tra le due celle centrali del pacco e le due ultime in testa allo stesso: sono state poste in contatto con la parte centrale alta del foglio (il punto più caldo) e fermate tramite le spugnette dei distanziali. La figura seguente mostra i collegamenti dell'elettronica, che hanno richiesto a loro volta una modifica rispetto agli originali della MicroVett.



Fig. 9 Collegamenti di segnale

Una delle superfici laterali del case ospita i ventilatori mentre l'altra e la copertura sono state completamente forate per favorire la circolazione dell'aria.



Fig. 10 Vista di insieme del case a) lato forato b) lato con i ventilatori

I fori del coperchio superiore hanno una forma tale da impedire l'ingresso della polvere, sono disposti in modo opposto tra i due lati del contenitore perché nel funzionamento aspirano l'aria (che viene espulsa dai ventilatori e non soffiata all'interno): in questo modo si minimizza l'influenza reciproca dei fori sui flussi d'aria. La connessione terminale frontale visibile nelle Fig. 10 a) e b) è la connessione di messa a terra, mentre in 10 b) si vede anche l'alimentazione delle ventole, che richiedono 24 w totali per contenitore. I fori passanti che si vedono in testa del case servono per agevolare il collegamento di potenza, che può avvenire sia frontalmente che lateralmente rispetto al contenitore senza che ci sia obbligo di piegare il cavo o la barra di rame che si utilizza per farlo. E' stato previsto un alloggiamento per il mux della Microvett e come già detto per poterlo utilizzare nella nuova configurazione si è dovuta modificare la sequenza dei collegamenti di segnale utilizzata precedentemente.



Fig. 11 a) Alloggiamento per il Mux b) schema di montaggio

La realizzazione delle lavorazioni meccaniche è stata eseguita dalla ditta RMP di Acilia, che collabora con Enea tramite un contratto eseguito con l'unità Utrinn-IFC: la RMP ha partecipato anche alla fase di progettazione del contenitore ed alla stesura dei disegni definitivi.

Per costruire il case si sono anche dovuti realizzare degli strumenti adatti al suo assemblaggio ed alla spedizione, ad esempio il fissaggio dei conduttori di potenza alle terminazioni delle celle è stato realizzato tramite delle viti: per poter fissare queste viti si è dovuto ideare uno strumento di supporto, poi tolto una volta eseguita l'operazione. Tra le altre cose anche l'inserimento delle celle nel contenitore finale è stato eseguito tramite una guida creata appositamente per questo scopo.

La figura 12 a) ripropone il dettaglio della 6 b) e mostra la guida in legno insieme alle celle assemblate.

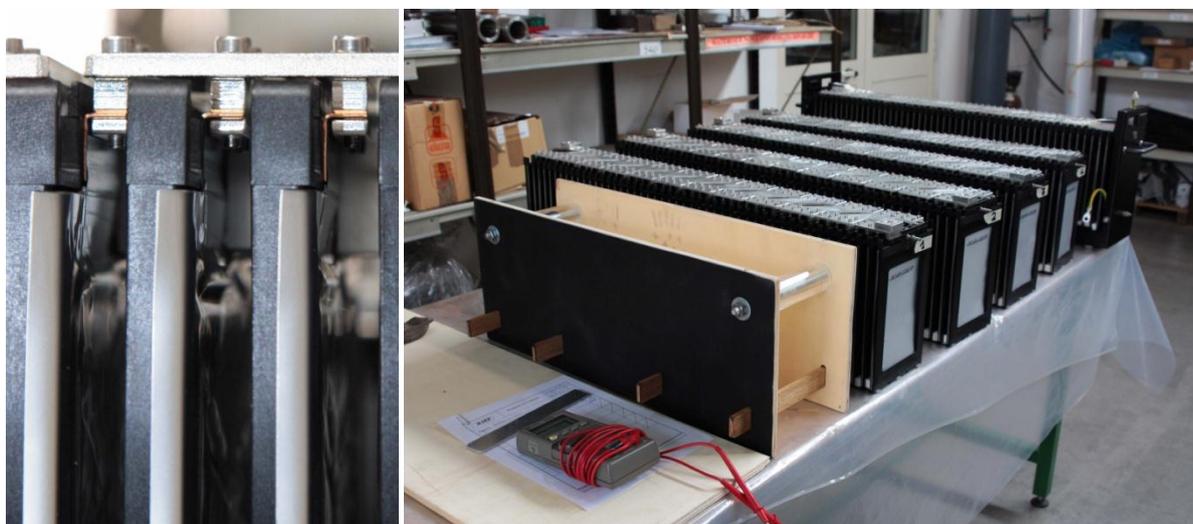


Fig. 12 a) dettaglio della chiusura delle viti b) guida per l'inserimento delle celle

Una volta realizzati e montati i contenitori l'insieme è stato testato in Enea: la foto seguente mostra le batterie assemblate in sala prove.



Fig. 13 Batterie in sala prove Enea

Di seguito invece vengono proposte due immagini relative alla fasi di montaggio finali nel locale che le ospita a Bergamo:



Fig. 14 a) Assemblaggio batterie nel locale di Bergamo b) Disposizione finale

Nel locale di Bergamo i moduli sono disposti sugli scaffali e posti in serie secondo il seguente schema:

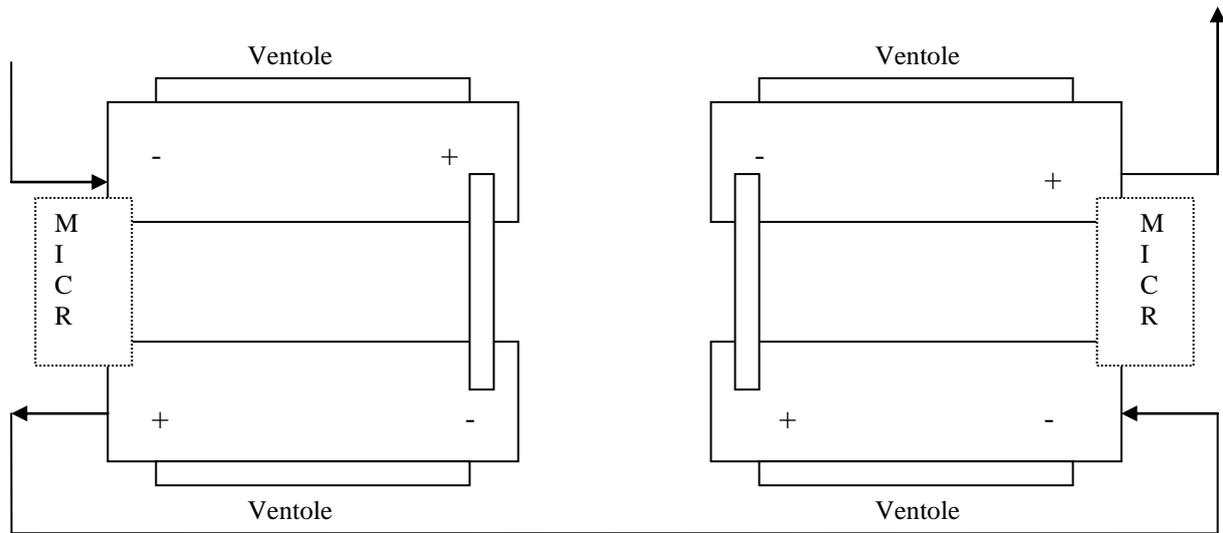


Fig. 15 Disposizione delle batterie nel locale di Bergamo

lo scaffale è distanziato dalle pareti e presenta notevoli spazi di aria tra i tre ripiani.

2.3 CRITERI DI IMPOSTAZIONE DELLE PROVE TERMICHE

Il ciclo su cui si era dimensionato l'accumulo è stato ricavato simulando la massima condizione di carico della vettura sia in salita che in discesa: per questo ciclo si era ricavato il seguente andamento della corrente totale di batteria:

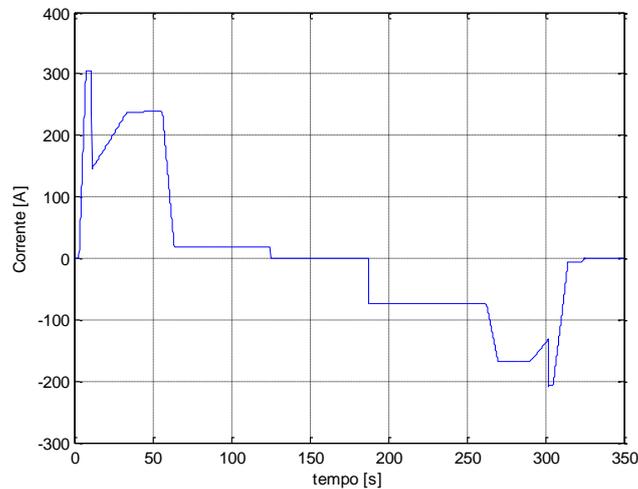


Fig. 16 Andamento della corrente di batteria nel ciclo di massima potenza

Il raddoppio della capacità della batteria comporta una leggera diminuzione della corrente totale dovuta al dimezzamento delle resistenze interne del pacco visto dal lato rete, in realtà anche le vie interne (ora in rame di grande sezione e precedentemente in ottone di piccola sezione) contribuiscono a questo fenomeno, ma in modo trascurabile: trascurando questi effetti si ha una maggiorazione delle perdite calcolate rispetto a quelle che si avrebbero nel ciclo reale a potenza massima.

Di seguito è rappresentato l'andamento maggiorato della potenza dispersa per effetto Joule in uno dei dieci pacchi che costituiscono il nuovo sistema di accumulo

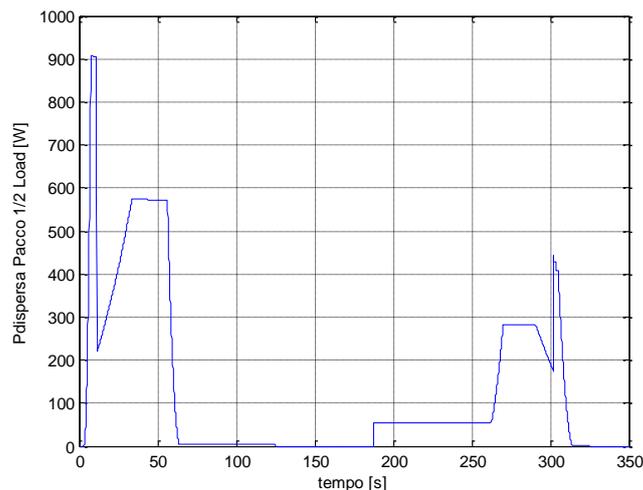


Fig. 17 Andamento delle perdite Joule nel singolo contenitore delle batterie

Le perdite determinano l'aumento di temperatura: tale aumento è tanto minore tanto maggiore è il tempo di raffreddamento dovuto alle pause nelle stazioni di partenza/arrivo.

Il tempo rappresentato nelle ascisse delle figure precedenti non corrisponde a quello reale di funzionamento dell'impianto, non essendo in esso contemplate le soste nelle stazioni.

Per realizzare la prova di laboratorio si sono considerati i picchi di corrente a cui è sottoposto il sistema:

Corrente totale [A]	Tempo [s]	Pdispersa [W]
328	4	900
248	23	580
72	75	55
-165	21	290
-202	3	440

Tab 2 Correnti di picco del ciclo e corrispondenti perdite Joule

Di queste correnti il ciclatore (la macchina da laboratorio che permette di imporre al pacco di batterie o un profilo di corrente o di tensione o di potenza) che è stato prescelto per effettuare il test non è in grado di imporre la più alta senza uscire dalla zona di lavoro di sicurezza.

Se si vuole valutare il comportamento elettrico del pacco (l'andamento delle tensioni in funzione delle correnti imposte al pacco) questo potrebbe essere un problema: ma la correttezza della risposta elettrica era già stata valutata a Vicenza, dove il pacco originario, di metà capacità dell'attuale, era stato sottoposto ad un profilo di corrente di ciclo maggiore della metà di quello ora considerato e non ha violato i limiti di funzionamento in tensione previsti precedentemente.

Per la prova termica si può definire un tempo ed una corrente equivalenti a quella del gradino semplicemente considerando di avere la stessa dissipazione prodotta da quella originale:

$$rI_1^2\Delta t_1 = rI_2^2\Delta t_2 \quad [1]$$

Operando in questo modo è possibile definire delle correnti di ciclo termicamente equivalenti. Occorre però considerare che nel dimensionamento si è imposto che tra inizio e fine ciclo lo stato di carica rimane invariato: deve quindi essere verificato anche il vincolo che la somma dei prodotti algebrici delle correnti per il tempo sia nulla.

$$\sum_i I_i \Delta t_i = 0 \quad [2]$$

Le figure seguenti mostrano la differenza tra il ciclo di dimensionamento e quello di massima potenza rilevato dall'Università di Pisa durante una settimana di misurazioni:

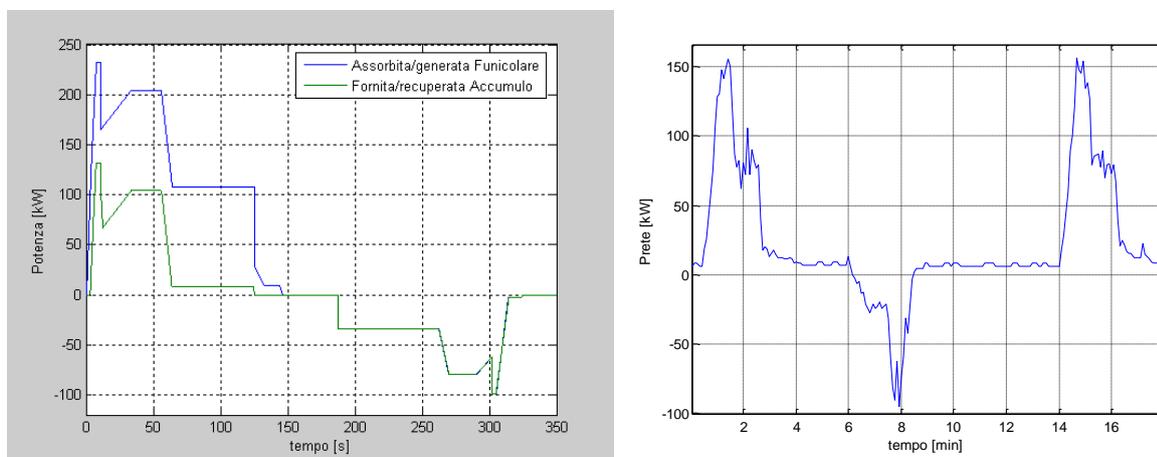


Fig. 18 a) Andamento delle potenze nel ciclo di dimensionamento b) ciclo reale

Il ciclo di dimensionamento dura meno di sei minuti, mentre il periodo di ripetizione del ciclo reale è di quattordici: questo vuol dire che ci sono otto minuti in cui il pacco batterie può raffreddarsi, inoltre la potenza massima rilevata in campo è risultata inferiore di circa 100 kW a quella considerata per il dimensionamento dell'accumulo.

Mentre il dato sulla potenza può variare nelle stagioni, e quindi non può essere preso a riferimento, il periodo di pausa nelle corse è invece costante: questo vuol dire che se nelle prove termiche si considera un periodo di sei minuti non si lascia il tempo al sistema di raffreddarsi. Da quanto detto si evince che se la prova si concludesse con un surriscaldamento il risultato sarebbe poco affidabile mentre se non si incontrano problemi termici non se ne avranno, a parità di condizioni ambientali nell'esercizio reale.

2.4 PRIMA PROVA TERMICA

Stante queste considerazioni si è deciso di provare il pacco in condizioni di funzionamento molto stressanti e si sono realizzati due profili di prova, di cui il secondo ha anche lo scopo di verificare che l'andamento delle tensioni in funzione delle correnti massime di lavoro previste rimanga nei limiti stabiliti in fase di simulazione. La prima prova consiste nel calcolare tramite la [1] la corrente media del ciclo equivalente termicamente a quelle mostrate in tabella 2 considerando un ciclo del periodo di sei minuti: tale prova schematizza quindi una condizione di lavoro molto più pesante di qualsiasi possibile condizione reale.

Il calcolo fornisce una corrente media di 90 A: si costruisce quindi un profilo di carica e scarica che viene mostrato direttamente con le impostazioni del ciclatore.

Profilo di lavoro - Batt120Cell438VnScarica+Carica.pro

Profilo [Modifica](#)

Descrizione breve

Descrizione estesa

Caratteristiche della fase

Condizioni di fine fase

	Tipologia	A	V/W	Reg.D	Tempo	Capacità	Tensione	Corrente	Rampa	Allarme ext
1	Pausa			1s	10s					
2	Scarica l cost.	90.0A		1s	180s	5.0Ah	320.0V min			
3	Pausa			1s	10s					
4	Carica l cost.	90.0A		1s	180s	5.0Ah	492.0V max			

Nessun microciclo attivo

Fig. 19 Profilo di corrente impostato al ciclatore

La lettura delle temperature è stata eseguita utilizzando le informazioni fornite dal BMS, che le acquisisce tramite venti termoresistenze (due per modulo): come detto precedentemente queste sono state poste a contatto delle celle più critiche dal punto di vista termico (centrali ed estreme ad

ognuno dei moduli), in particolare l'andamento riportato di seguito si riferisce ad una singola cella rappresentativa del pacco, ma il monitoraggio è avvenuto su tutte.

La prova è stata eseguita ponendo le batterie in un locale scarsamente aerato, ma non totalmente privo di scambi di aria con l'esterno: la temperatura del locale è rimasta sui 29 °C durante tutta l'esecuzione del test. Si è deciso di non utilizzare i ventilatori e di interrompere i cicli di corrente al superamento dei 43 °C da parte di una delle celle monitorate: una volta interrotta la prova si è registrato il raffreddamento naturale del sistema.

Di seguito si fornisce un particolare degli andamenti della corrente e della tensione totale di batteria registrati durante la prova e l'andamento complessivo della temperatura:

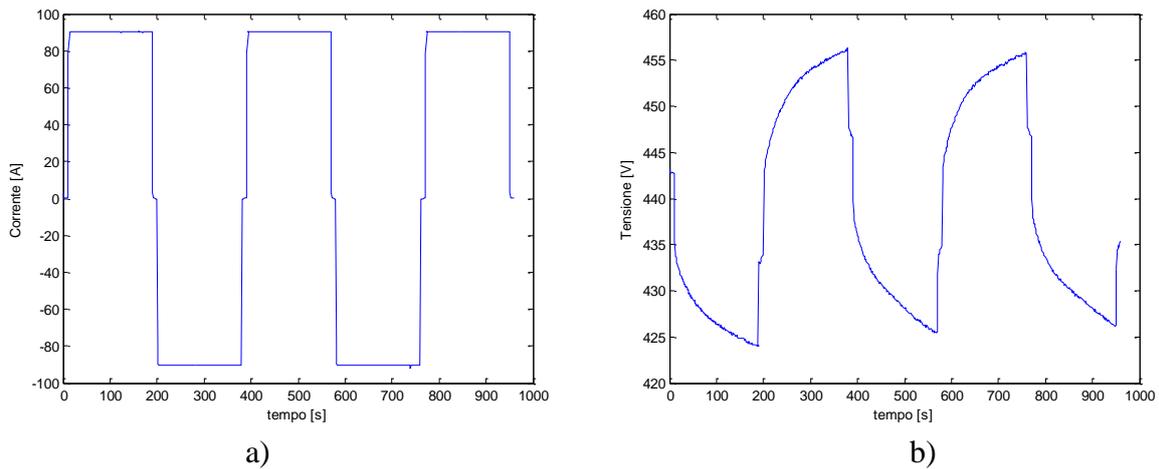


Fig. 20 Dettaglio dell'andamento di a) corrente e b) tensione durante la prima prova termica

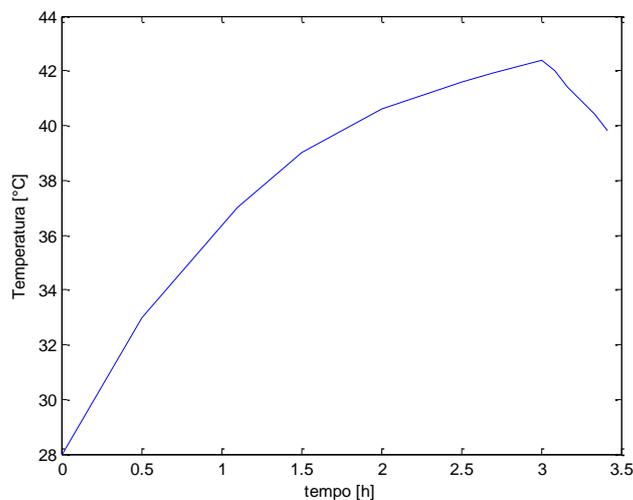


Fig. 21 Andamento globale della temperatura di una cella

la cella monitorata è partita da una temperatura leggermente inferiore a quella ambiente, e si stava portando dopo circa tre ore ad una temperatura limite difficile da stimare, ma sicuramente inferiore a quella compatibile con il buon funzionamento delle batterie (48/50 °C) per cui anche in queste condizioni estreme il pacco avrebbe potuto operare senza problemi.

2.5 SECONDA PROVA TERMICA

La figura seguente presenta le impostazioni al ciclatore della seconda prova termica, che è anche una prova sulla capacità del pacco di erogare la potenza richiesta nell'applicazione:

Profilo di lavoro - Batt120Cell438VnSim_profilo_reale .pro

Profilo [Modifica](#)

Descrizione breve:

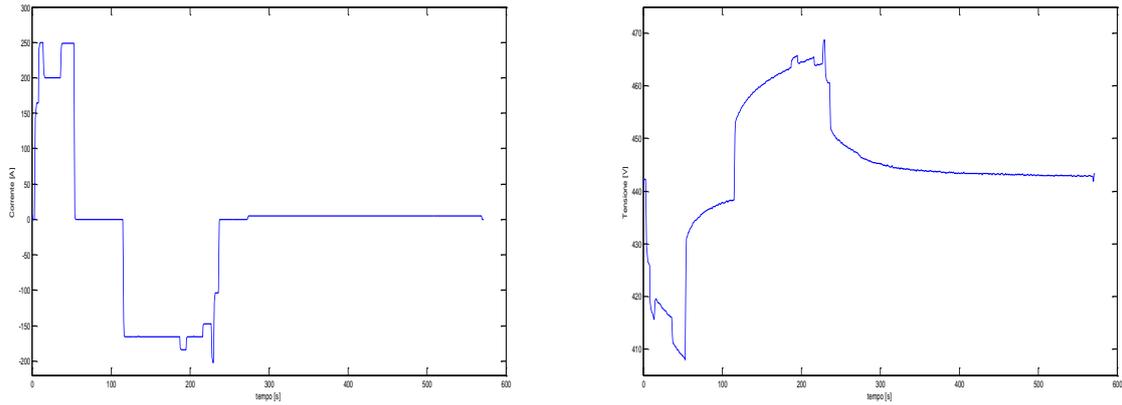
Descrizione estesa:

Caratteristiche della fase				Condizioni di fine fase						
	Tipologia	A	V/W	Reg.D	Tempo	Capacità	Tensione	Corrente	Rampa	Allarme ext
1	Pausa			1s	3s					
2	Scarica l cost.	164.0A		1s	5s	0.3Ah	408.0V min			
3	Scarica l cost.	249.0A		1s	6s	0.5Ah	408.0V min			
4	Scarica l cost.	200.0A		1s	22s	1.3Ah	408.0V min			
5	Scarica l cost.	248.0A		1s	23s	1.6Ah	408.0V min			
6	Scarica l cost.	160.0A		1s	8s	0.4Ah	408.0V min			
7	Scarica l cost.	72.0A		1s	62s	1.3Ah	408.0V min			
8	Pausa			1s	62s					
9	Carica l cost.	165.0A		1s	72s	3.3Ah	492.0V max			
10	Carica l cost.	183.5A		1s	8s	0.5Ah	492.0V max			
11	Carica l cost.	165.0A		1s	21s	1.0Ah	492.0V max			
12	Carica l cost.	147.0A		1s	11s	0.5Ah	492.0V max			
13	Carica l cost.	202.0A		1s	3s	0.2Ah	492.0V max			
14	Carica l cost.	103.5A		1s	6s	0.2Ah	492.0V max			
15	Pausa			1s	36s					
16	Scarica l cost.	5.0A		1s	297s	0.5Ah	408.0V min			

Nessun microciclo attivo

Fig. 22 Profilo di corrente per la prova termica di potenza

il ciclo base dura undici minuti contro i sedici del ciclo reale, la temperatura ambiente è di 31 °C e la sala è stata chiusa per impedire l'areazione del locale. Si è deciso di far partire i ventilatori una volta che la cella monitorata avesse superato la temperatura di 42 °C, ma anche in questo caso il locale rimane chiuso. La figura seguente mostra l'andamento delle grandezze elettriche durante l'esecuzione del ciclo base:



a) Andamento della corrente di ciclo b) Andamento della tensione totale

durante la prova la temperatura del locale è salita dai 31 °C iniziali a oltre 32, come effetto della dispersione di calore delle batterie: le ventole sono state azionate una volta che la cella monitorata ha superato i 42 °C ed hanno abbassato velocemente la temperatura del pacco, innalzando ulteriormente quella dell'ambiente esterno.

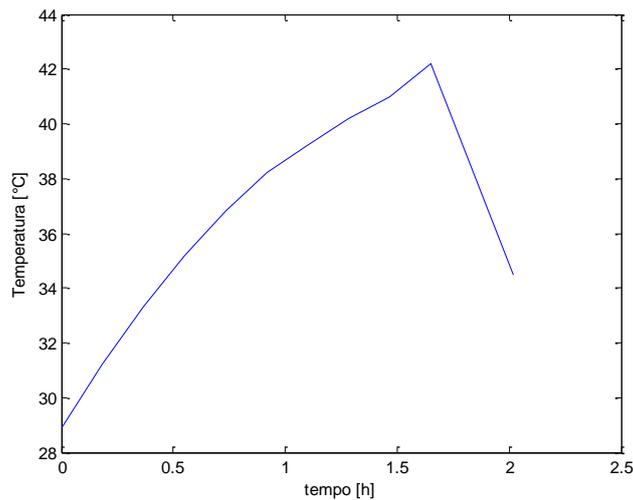


Fig. 25 Andamento globale della temperatura di una cella

Considerando che le condizioni di lavoro reali sono molto più favorevoli allo scambio termico di quelle simulate in laboratorio, e che anche i cicli di lavoro sono molto più leggeri si può ritenere che il problema termico sia stato risolto definitivamente.

3 ALGORITMO DI GESTIONE DEL SISTEMA DI ACCUMULO

Di seguito viene riportata la documentazione scambiata tra Enea ed EEI relativa allo sviluppo del software di gestione delle batterie: si consideri che il software verrà realizzato in Linguaggio C e che è ancora in fase di sviluppo.

L'idea base dell'algoritmo è di limitare la potenza assorbita dalla rete facendo intervenire le batterie quando il carico supera una determinata soglia di potenza: quando è l'azionamento della funicolare a generare potenza le batterie verranno utilizzate come sistema di accumulo. Nelle fasi di pausa l'algoritmo opera in modo da riportare le batterie ad uno stato di carica di riferimento: si ricorda che per come è stato dimensionato il sistema di accumulo e scelta la potenza da assorbire dalla rete lo stato di carica evolverà in un intervallo di variazione abbastanza limitato (0.4-0.6 massimo), di conseguenza l'operazione di riportare le batterie allo stato di carica di riferimento verrà eseguita solo se questo esce da una fascia di variazione predefinita.

Se l'algoritmo intervenisse nella fascia di variazione 'naturale' prevista per lo SOC provocherebbe un inutile scambio di energie con la rete, se invece le condizioni di carico sono troppo squilibrate (la massa in trazione è molto diversa da quella in recupero) allora l'algoritmo deve intervenire.

Per realizzare il controllo delle potenze è possibile utilizzare il nodo in cui vengono messi in parallelo la rete le batterie e l'azionamento, nodo che nel presente caso è gestito in corrente alternata trifase.

In questo punto la tensione è uguale per tutti i componenti del sistema di alimentazione/accumulo/carico e quindi si può gestire la potenza lavorando sulle correnti e sul fattore di potenza: di seguito si assume che la corrente di linea e quella del lato AC del convertitore delle batterie siano in FASE TRA DI LORO: se questa ipotesi fosse errata l'algoritmo andrà modificato di conseguenza.

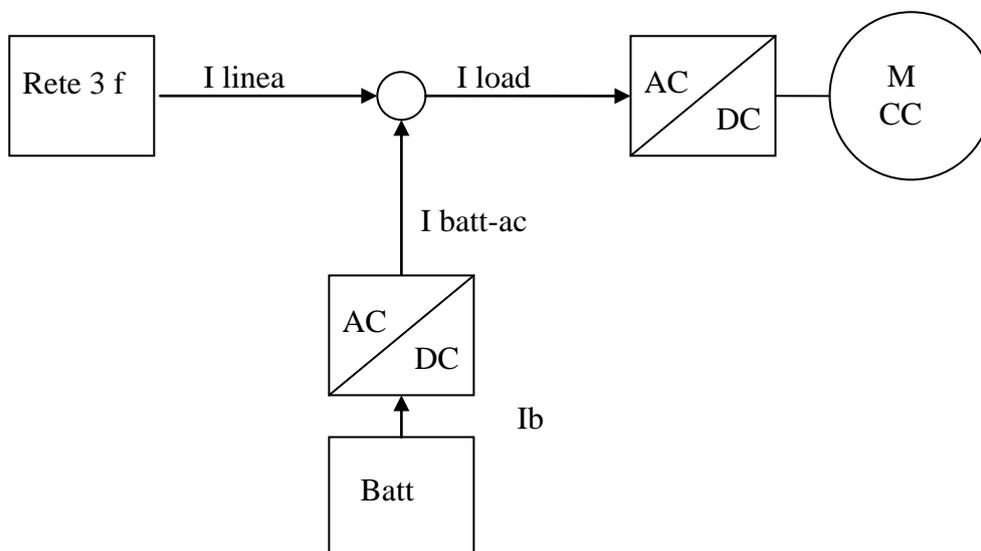


Fig. 26 Rappresentazione concettuale dell'azionamento della funicolare

Per limitare la corrente I_{linea} l'algoritmo deve misurare quella assorbita dal carico ed operare sulla corrente dell'accumulo lato AC in modo che $(I_{\text{load}} - I_{\text{batt-ac}})$ sia uguale alla I_{linea} prefissata.

Una volta che la funicolare è ferma ($I_{\text{load}}=0$) o che assorbe pochissima corrente si potranno caricare/scaricare le batterie per portarle ad uno stato di carica di riferimento.

Le batterie sono connesse ad un sistema di supervisione che fornisce la tensione di ogni cella, la temperatura di due elementi di ognuno dei dieci contenitori che costituiscono il pacco, verifica che

siano rispettati i valori minimi e massimi di funzionamento della tensione di cella e della tensione totale dell'accumulo e si occupa della equalizzazione del tutto, oltre a questo il sistema fornisce lo stato di carica delle batterie..

Se qualche parametro è fuori dai valori ammessi il BMS trasmette un segnale di errore che può essere sfruttato dal programmatore: il programmatore può sfruttare le informazioni del BMS anche in altri modi, ad es. per attivare i ventilatori al superamento di una determinata soglia di temperatura delle celle.

Detto questo il nucleo dell'algoritmo potrebbe essere sviluppato su questa falsariga:

Se $V_{batt} < V_{batt Max} \& V_{batt} > V_{batt min} \& I_b < I_{batt Max} \& I_b > I_{batt min} \& SOC < SOC max \& SOC > SOC min$ e $T_{batt} < T_{batt Max} \& ERRORE BMS = 0$

(la parte soprascritta del programma potrebbe essere inclusa nel codice EEI o ci si potrebbe limitare semplicemente a leggere gli errori della scheda BMS)

Allora esegui il seguente algoritmo:

Se $I_{load} \geq 0 \& I_{load} \leq I_{prima\ soglia}$ (il sistema è in pausa: carico/scarico le batterie)

Se $SOC\ b \leq SOC\ ricarica$ (SOC b è fornito dal BMS o calcolato a parte)
=> $I_b = I_{max\ carica}$ (mi riferisco alla corrente di batteria lato CC)
=> $Flag = 1$ (imposto il riconoscimento della fase di carica)

End

Se $SOC\ b > SOC\ ricarica \& SOC\ b < (SOC\ rif-eps) \& Flag = 1$ (se sono nella fase di carica)
=> $I_b = I_{bmax\ carica} * ABS(SOC\ b - SOC\ rif)$

End

Se $SOC\ b \geq SOC\ scarica$
=> $I_b = I_{max\ scarica}$
=> $Flag = 1$ (imposto il riconoscimento della fase di scarica)

End

Se $SOC\ b < SOC\ scarica \& SOC\ b > (SOC\ rif+eps) \& Flag = 1$
=> $I_b = I_{bmax\ scarica} * ABS(SOC\ b - SOC\ rif)$

End

Se $SOC\ b \leq SOC\ rif+eps \& SOC\ b \geq SOC\ rif-eps$
=> $I_b = 0, Flag = 0$

End

End

Se $I_{load} > I_{prima\ soglia} \& I_{load} < I_{Intervento}$
(la funicolare assorbe meno della potenza massima che ho deciso di chiedere alla rete)

$I_b = 0$ (oppure $I_{batt-ac} = 0$ è equivalente)

End

Se $I_{load} > I_{intervento}$ (la funicolare assorbe più della potenza che voglio fornire da rete)

$I_{batt-ac} = I_{load} - I_{intervento}$ (compenso la potenza di rete, mi riferisco al nodo lato AC)

End

Se $I_{load} < 0$

$I_{batt-ac} = -I_{load}$ (assorbo tutto quello che posso dalla rete)

End

Valori indicativi delle soglie:

SOC rif=0.5; SOC ricarica=0.4; SOC scarica=0.6; I_{bmax} scarica=40 A; I_{Bmax} carica=-40 A; $\epsilon_s=0.02$; $V_{batt\ max}=494.4$ V; $V_{batt\ min}=300$ V; $I_{batt\ min}=-260$ A; $I_{batt\ max}=380$ A; $SOC_{min}=0.3$; $SOC_{max}=0.85$; $T_{batt\ max}=38-45$ °C; I prima soglia=10-30 A; I intervento=180 A (circa: nel dimensionamento era stato ipotizzato di limitare la potenza di rete a 100 kW)

Si noti che nel caso della trazione e dell'assorbimento di corrente in frenatura si agisce sulla corrente di batteria LATO ALTERNATA del convertitore, ma nel caso della ricarica/scarica delle batterie si agisce sul LATO CONTINUA del convertitore.

I casi di errore vanno trattati a parte: se la tensione o lo stato di carica delle batterie sono troppo alti il sistema va scaricato fino a portarlo in sicurezza, si evita quindi di sottoporlo a corrente di ricarica, se viceversa sono troppo bassi occorre ricaricarlo senza sottoporlo a correnti di scarica.

3.1 GESTIONE TERMICA

Se la temperatura supera il valore limite massimo occorre far partire le ventole e portarla (ci vogliono circa dieci minuti) alla temperatura ambiente (meglio concedere uno/due gradi di sovratemperatura rispetto all'ambiente): questo potrebbe avvenire anche senza interrompere l'utilizzo dell'accumulo (sperimentato in Enea ndr). Al limite si potrebbero ipotizzare due soglie: una di intervento dei ventilatori (ad es. 38 °C) ed una di disinserzione del sistema (ad es. 45 °C) , perché se la temperatura aumenta nonostante i ventilatori siano attivi vuol dire che siamo in presenza di un problema che richiede una supervisione esterna.

Nota: nel caso ci sia una segnalazione di incendio nel locale occorre fermare i ventilatori che ne aiuterebbero la propagazione.

3.2 CONSIDERAZIONI SULLA STIMA DELLO STATO DI CARICA

La centralina di controllo esegue la stima dello stato di carica del sistema di accumulo (che viene misurato in Ah ndr) tramite l'integrazione della corrente uscente ed entrante da esso.

La corrente viene misurata tramite una sonda ad effetto hall: tale sonda ha la portata massima di 600 A e presenta un errore di offset non del tutto trascurabile per la nostra applicazione.

La MicroVett compensa l'errore da una parte con una impostazione della centralina (l'offset del sensore appunto) dall'altra comunicando alla stessa, alla conclusione di una carica totale dell'accumulo, che la batteria è totalmente carica ed inizializzando così dall'esterno il calcolo del SOC. Enea ed EEI possono sfruttare questa procedura inizializzando però il calcolo dello stato di carica tramite una lettura della tensione a vuoto del pacco batterie eseguita dopo che questo abbia smesso di funzionare da almeno tre ore (bastano pochi minuti a pacco nuovo, ma con l'invecchiamento la cosa non è più garantita, convenzionalmente si considerano tre ore dopo l'ultimo passaggio di corrente): per eseguire questa operazione occorre comunque consultare la MicroVett.

In alternativa è possibile costruire a parte una semplice procedura di stima dello stato di carica e non utilizzare le informazioni della centralina, ma anche in questo caso occorrerà inviare qualche volta un segnale di reset alla stessa.

3.3 EQUALIZZAZIONE DELLA TENSIONE E CARICA DEL PACCO BATTERIE PER LA STIMA DELL'INVECCHIAMENTO

Uno dei motivi che hanno portato alla scelta delle batterie fornite da Microvett è stato l'affidabilità della centralina di gestione delle stesse e la possibilità di eseguire l'equalizzazione del pacco.

Di seguito è riportata la caratteristica dei moduli da 20 AH delle batterie EIG che, posti in parallelo/serie tra di loro costituiscono il nostro pacco (centoventi serie di moduli posti in parallelo quattro a quattro)

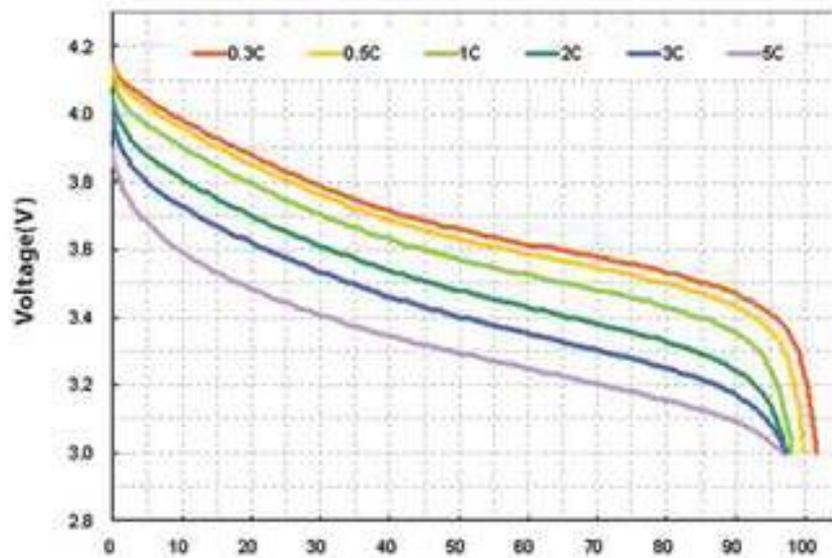


Fig. 27 Curva caratteristica delle batterie EIG 20 Ah

La zona di lavoro delle batterie utilizzate nella nostra applicazione corrisponde al 50 % dello stato di carica, ovvero quella nella quale la curva caratteristica presenta una minore inclinazione rispetto alla variazione del SOC. In particolare nell'intervallo compreso tra 40 e il 60 per cento dello stato di carica la variazione di tensione a vuoto è compresa in un massimo di 0.1 V.

Formando un pacco batterie con celle ideali, assolutamente identiche tra di loro ed attraversate dalla stessa corrente queste, avendo la stessa storia di vita, non dovrebbero presentare mai differenze di tensione: nella realtà esiste una piccola differenza di capacità cella per cella e le resistenze interne variano, sia pure limitatamente, inoltre l'invecchiamento del pacco può esaltare queste differenze.

Si pongono quindi due problemi:

- 1) Equalizzare la tensione di lavoro delle singole celle
- 2) Stabilire il grado di invecchiamento del pacco batterie

MicroVett esegue l'equalizzazione solo alla fine di una carica I-V coordinando il BMS con il sistema che sta caricando le batterie, nella nostra applicazione occorre decidere

- a) Quando equalizzare
- b) Se utilizzare la strategia di Microvett

Per la prima scelta potrebbe essere una buona idea stabilire una condizione di ΔV massima tra le celle aventi a vuoto ed a riposo la tensione minore e la tensione maggiore del pacco: se il ΔV supera ad es. 0.1 V a stato di carica 50 % allora occorre equalizzare.

Per utilizzare la strategia MicroVett occorre caricare totalmente il pacco e solo dopo far partire la procedura di equalizzazione: se si vuole evitare questa operazione (che comporta un dispendio inutile di energia) occorre trovare con la MicroVett stessa il modo di far partire l'operazione allo stato di carica voluto.

Per la stima dell'invecchiamento invece sarebbe necessario comunque eseguire una scarica totale periodica (o comandata anche questa dalla differenza tra le tensioni estreme delle celle che compongono il pacco) ed una ricarica, allo scopo di misurare la capacità effettiva del pacco.

In genere un pacco di batterie si considera 'vecchio' quando la sua capacità residua è l'ottanta per cento di quella nominale.

Si potrebbero concepire anche altri metodi per controllare l'invecchiamento delle batterie: infatti esso comporta un aumento di resistenza interna ed una risposta dinamica più lenta, ma si dovrebbero mettere in campo algoritmi complessi e poco adatti agli scopi attuali della nostra applicazione.

4 CONCLUSIONI

All'inizio dell'attività di ricerca non era stata prevista la possibilità che potesse verificarsi un problema di dissipazione termica per il sistema di accumulo. Ciò era dovuto in parte al fatto che la prima proposta di impianto pilota non era quella di una funicolare priva di contrappeso, ma quella di un impianto di risalita che lo prevedeva: di conseguenza il profilo di potenza/energia richiesta al sistema di accumulo era diverso da quello necessario per la funicolare di San Vigilio. In parte invece il problema non era previsto perché si erano individuate delle batterie di potenza il cui involucro era pensato per dissipare calore: i test eseguiti in Enea nel primo anno di attività con queste batterie hanno permesso di verificare che se erano adatte come prestazioni all'applicazione considerata non lo era però il loro sistema di gestione, che si è dimostrato inaffidabile ed ha mostrato molti problemi di sviluppo.

Il motivo per cui il sistema di accumulo ha presentato problemi termici non è legato al dimensionamento all'applicazione per cui lo si è utilizzato ma al fatto che il suo contenitore originale è stato pensato per una applicazione veicolare. In un veicolo elettrico normalmente la corrente erogata è molto bassa rispetto alla capacità del pacco batterie (dimensionato per assicurare l'autonomia del veicolo, e quindi per l'energia) anche se l'erogazione avviene con continuità e non a impulsi come nella funicolare: il contenitore del pacco non deve smaltire un calore eccessivo, anzi più che assicurare un ricambio di aria deve possibilmente isolare il pacco dall'esterno (dove la temperatura può essere molto alta o al contrario molto bassa) ed essere compatto e poco pesante.

Nella funicolare le correnti richieste sono impulsive ma di valore molto elevato rispetto a C e le condizioni ambientali sono controllate: di conseguenza la necessità diventa quella di scambiare il più possibile calore con l'esterno per dissipare le alte perdite Joule.

Se questo problema non era previsto va detto che le conseguenze sono state interessanti per le attività di ricerca correlate alla applicazione di batterie per usi stazionari: infatti pensare a sistemi di accumulo che debbano svolgere funzioni di load leveling per una smart grid può voler dire sia ricadere nel problema affrontato per la funicolare sia estenderlo addirittura alla progettazione di edifici che possano ospitare al meglio le batterie.

La progettazione del case deve essere fatta con una attenzione alla manutenzione, intesa come accessibilità allo stesso e possibilità di sostituire i vari componenti, di monitorarne il funzionamento ecc. Oltre a questo occorrerà porre attenzione ai problemi relativi alla sicurezza, che nel caso di batterie al litio non può essere gestita nello stesso modo di quello del piombo.

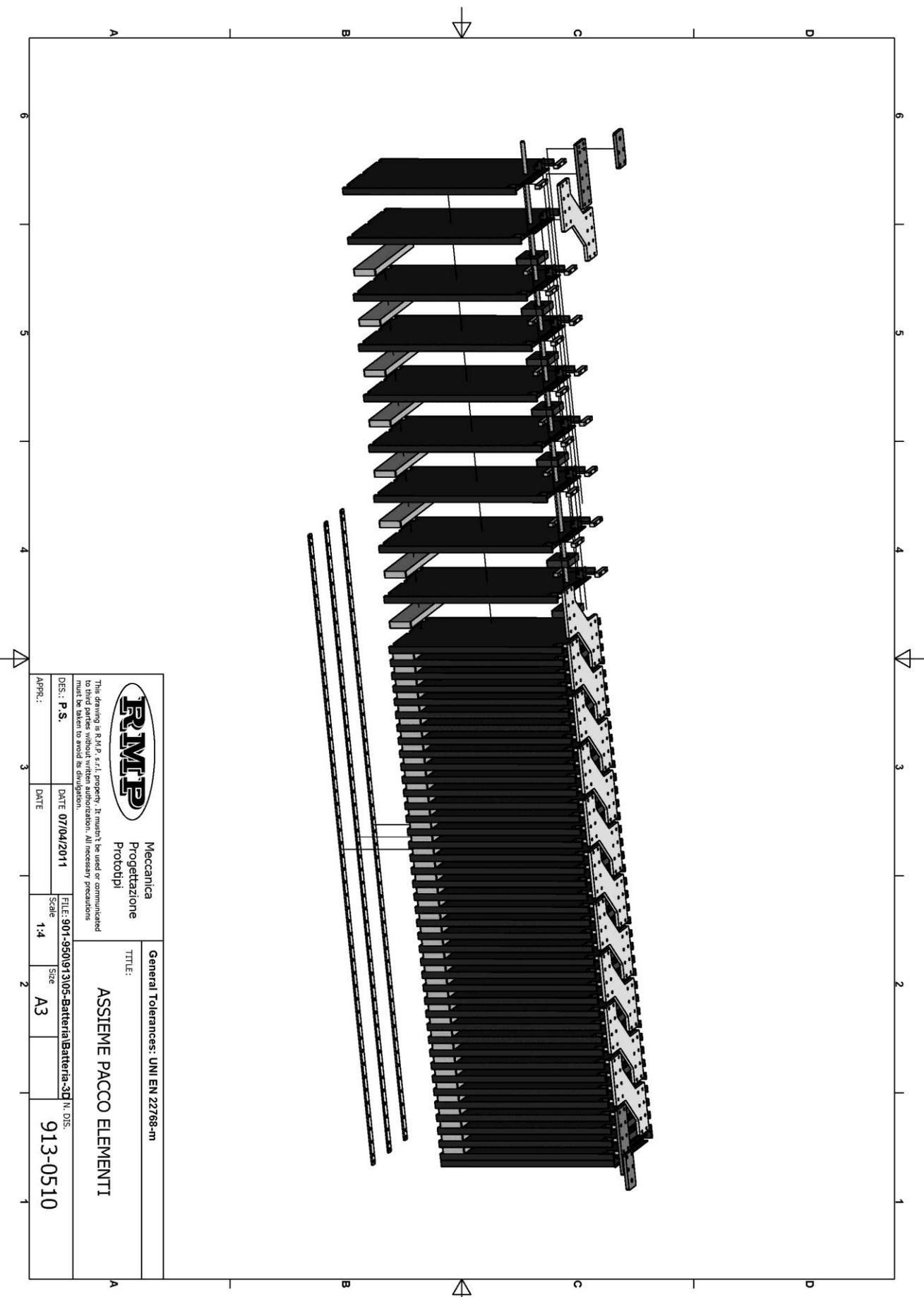
Quindi l'esperienza di questo anno di lavoro è servita per aprire una via verso uno studio completo di tutta la problematica della gestione termica ed in sicurezza delle batterie al litio.

Come detto più volte attualmente le batterie sono state installate nel locale di Bergamo ed a breve verranno eseguiti i primi test di funzionamento sulla funicolare: l'attività non è quindi totalmente conclusa, ma è comunque in un elevato stato di avanzamento, dal momento che l'integrazione tra le parti di segnale e di potenza è già stata eseguita e i problemi termici risolti.

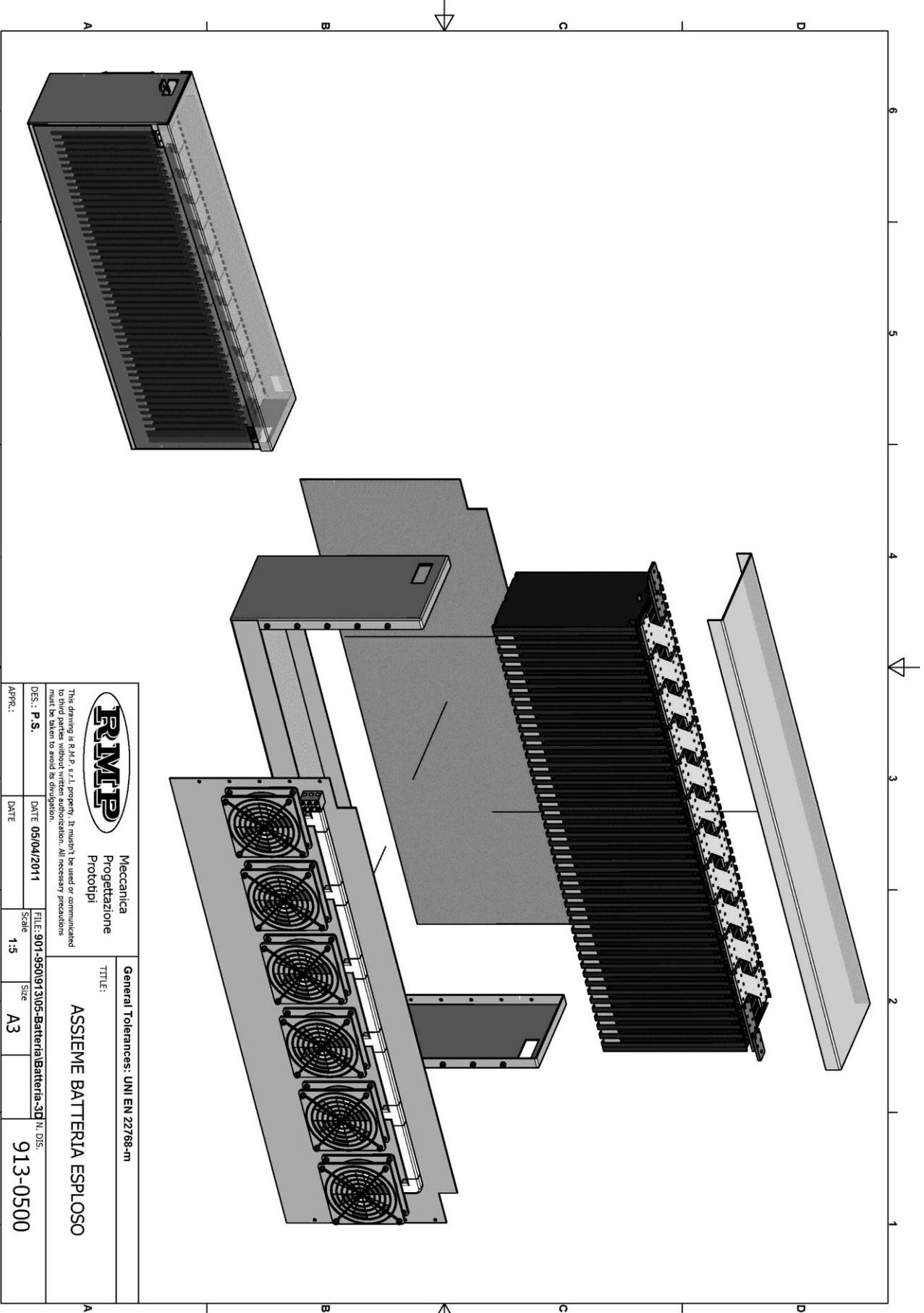
APPENDICE: DISEGNI DI MONTAGGIO DEL CASE

Nelle pagine seguenti sono riportati i disegni di insieme del case: i disegni sono strutturati in modo da evidenziare le procedure di montaggio dello stesso. I disegni sono firmati dalla ditta RMP, contraente Enea per le lavorazioni meccaniche, che ha realizzato fisicamente il contenitore.

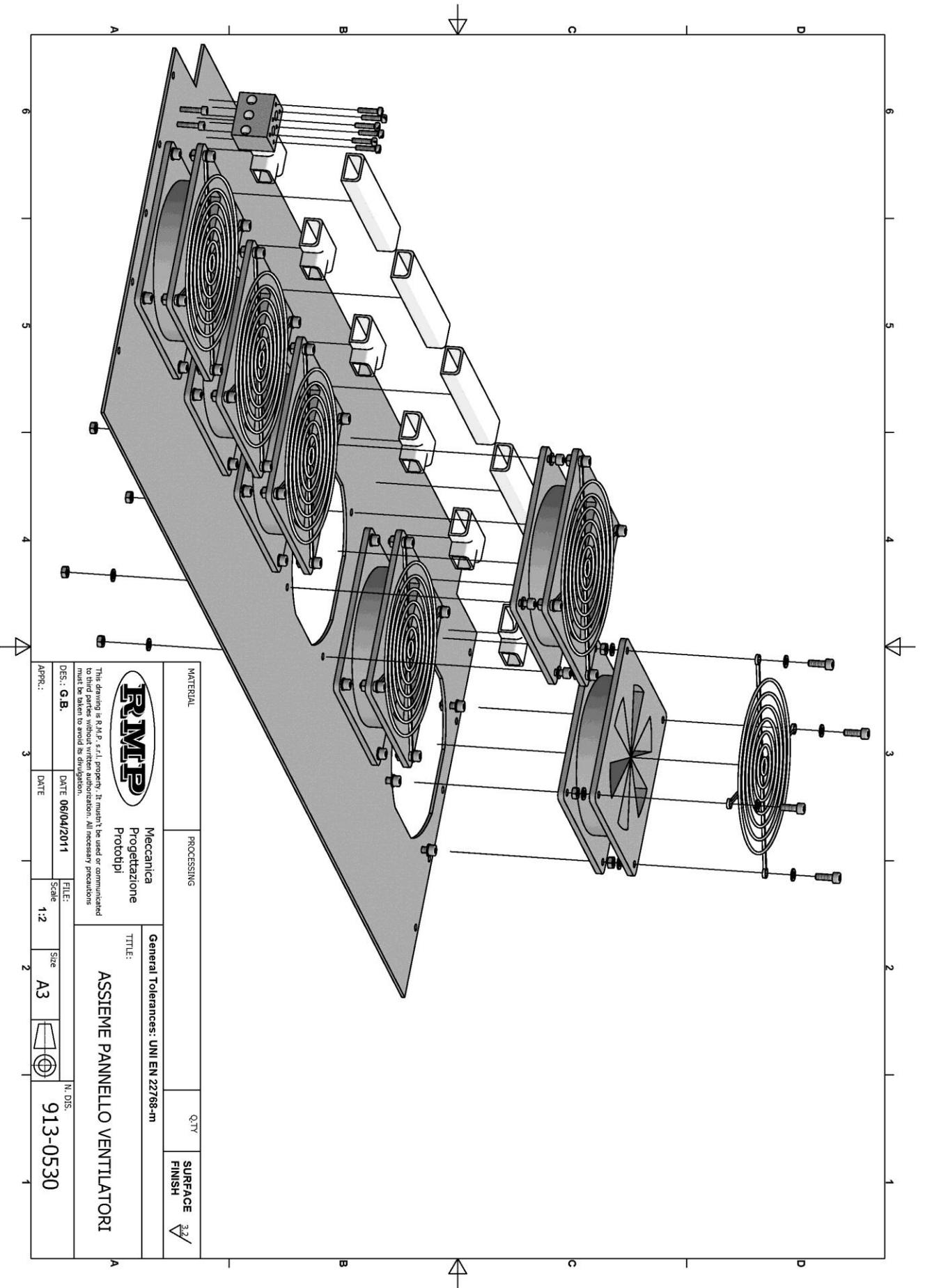
Il primo disegno mostra la procedura di assemblaggio delle celle ed i componenti delle vie interne, i separatori in materiale plastico, i distanziali ed il metodo di fissaggio e sostegno del tutto, il secondo il case completo (mancano le rappresentazioni dei fori) ed il terzo il fissaggio dei ventilatori.



 Meccanica Progettazione Prototipi		General Tolerances: UNI EN 22768-m	
		ASSIEME PACCO ELEMENTI	
<small>This drawing is R.M.P. s.r.l. property. It mustn't be used or communicated to third parties without written authorization. All necessary precautions must be taken to avoid its divulgation.</small>		<small>TITLE:</small>	
<small>DES.: P.S.</small>	<small>DATE</small> 07/04/2011	<small>FILE</small> 901-950191305-BatteriaBatteria-3D1 N. DIS.	<small>Size</small> A3
<small>APPR.:</small>	<small>DATE</small>	<small>Scale</small> 1:4	<small>913-0510</small>



		Meccanica Progettazione Prototipi		General Tolerances: UNI EN 22768-m	
This drawing is R.M.P. s.r.l. property. It mustn't be used or communicated to third parties without written authorization. All necessary precautions must be taken to avoid its divulgation.		TITLE: ASSIEME BATTERIA ESPLOSO		FILE: 901-950191305-Batteria/Batteria-3D.rvt, DIS: 913-0500	
DES.: P.S.	DATE: 05/04/2011	SCALE: 1:5	SIZE: A3	APPR.:	DATE: 05/04/2011



MATERIAL	PROCESSING	Q.TY	SURFACE FINISH
			32/
 Meccanica Progettazione Prototipi		General Tolerances: UNI EN 22768-m	
TITLE: ASSIEME PANNELLO VENTILATORI			
This drawing is R.I.P. s.r.l. property. It mustn't be used or communicated to third parties without written authorization. All necessary precautions must be taken to avoid its divulgation.		N. DIS. 913-0530	
DES.: G.B.	DATE: 06/04/2011	FILE: 1:2	Size: A3
APPR.:	DATE:	Scale:	