



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



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Studio di sistemi avanzati di accumulo di energia:  
progetto e realizzazione di un sistema di accumulo misto batterie-  
supercondensatori per microcar elettrica

*E. Rossi, A. Puccetti, F. Smargiasse, G. Buja, M. Bertoluzzo*



PROGETTO E REALIZZAZIONE DI UN SISTEMA DI ACCUMULO MISTO BATTERIE-  
SUPERCONDENSATORI PER MICROCAR ELETTRICA

Ennio Rossi, ENEA, Angelo Puccetti, ENEA, Fernando Smargiasse, ENEA  
Giuseppe Buja, Manuele Bertoluzzo, Università di Padova

Settembre 2011

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 Progetto: Giovanni Pede, ENEA

Inquadramento programmatico.

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.

Per lo svolgimento delle attività di ricerca e sviluppo previste dal Piano Triennale della Ricerca di Sistema Elettrico il Ministero dello Sviluppo Economico ha stipulato Accordi di Programma con ENEA, CNR ed ERSE.

Le attività sono finanziate attraverso un fondo alimentato dalla componente A5 della tariffa di fornitura dell'energia elettrica, il cui ammontare viene stabilito dall'Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas.

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 (oltre 28 Atenei e 65 diversi Dipartimenti coinvolti) e con le partecipate SOTACARBO e FN Nuove Tecnologie Avanzate. Nell'ambito dell'Accordo di Programma Triennale, l'ENEA ha terminato le attività terzo anno di attività.

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 2006-2008**

**Piano annuale di realizzazione Terza annualità (2008-2009):** da realizzarsi tra l'ottobre 2010 ed il settembre 2011

**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 B:** Sviluppo di altri sistemi avanzati di accumulo di energia

## Indice

<b>1.</b>	Premessa	pag. 5
<b>2.</b>	Introduzione	pag. 6
<b>3.</b>	Applicazioni ENEA dell'accumulo misto in ambito <i>automotive</i>	pag. 7
	<b>3.1</b> Riallestimento della city car SPAZIA	pag. 9
	<b>3.2</b> Sistema di Accumulo Energetico Integrato – 12V IEES	pag. 11
<b>4.</b>	Inquadramento del Progetto	pag. 13
<b>5.</b>	Prove preliminari presso i Laboratori ENEA UTTEI-VEBIM di Casaccia (RM)	pag. 18
<b>6.</b>	Progettazione e realizzazione del convertitore DC-DC	pag. 21
	<b>6.1</b> Attività relative alla Fase 1	pag. 22
	<b>6.2</b> Attività relative alla Fase 2	pag. 23
<b>7.</b>	Prove di collaudo del sistema	pag. 29
	<b>7.1</b> Allestimento del sistema	pag. 30
	<b>7.2</b> Prove preliminari	pag. 33
	<b>7.3</b> Prove di autonomia	pag. 35
	<b>7.4</b> Prove di potenza	pag. 36
	<b>7.5</b> Ulteriori prove di potenza	pag. 37
	<b>7.6</b> Considerazioni	pag. 38
<b>8.</b>	Divulgazione dei risultati delle attività	pag. 39
<b>9.</b>	Conclusioni e sviluppi successivi	pag. 39
<b>10.</b>	Bibliografia	

## 1. Premessa

Il sistema di accumulo a bordo di un veicolo elettrico deve soddisfare principalmente due esigenze: la richiesta massima di potenza  $P_{acc}$  da parte dell'azionamento di trazione, ed il contenuto energetico  $E_{acc}$ , sufficiente per l'autonomia richiesta al veicolo. Oltre a consentire, in misura da definirsi, il recupero dell'energia altrimenti dissipata nelle operazioni di rallentamento e frenatura meccanica.

Pertanto, in relazione alle prestazioni del veicolo elettrico, è possibile definire un valore caratteristico del rapporto  $(P/E)_{acc}$  del sistema di accumulo elettrico a bordo. Combinando in un sistema "misto" le caratteristiche di batterie e di supercondensatori — caratterizzati rispettivamente da elevata densità energetica [Wh/kg] e da notevole potenza specifica [W/kg] — si può pensare di progettare un accumulo elettrico specializzato per la particolare applicazione considerata, dotato ad esempio di accumulatori per la marcia a regime e di supercondensatori per le accelerazioni ed il recupero in decelerazione e frenata del veicolo.

Questo tipo di configurazione si è dimostrata efficace, a parità di tutte le altre condizioni, sia in termini di miglioramento delle prestazioni del veicolo così equipaggiato che di vita utile delle stesse batterie, come evidenziato nel corso di diversi progetti condotti nel tempo dall'ENEA.

Per completezza, si farà cenno a questi progetti nella prima parte del documento, per il resto finalizzato all'illustrazione delle attività svolte nell'ambito dell'Accordo di Programma.

## 2. Introduzione

Il rapporto che segue è incentrato sulle attività svolte dall'ENEA nell'ambito di una collaborazione avviata con l'Università di Padova – Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Laboratorio di Sistemi Elettrici per la Veicolistica e l'Automazione, prof. Giuseppe Buja, relativa al **Progetto e realizzazione di un sistema di accumulo misto batterie supercondensatori per microcar elettrica.**

Oggetto dell'attività è stato quello di valutare i possibili vantaggi e gli eventuali limiti del sistema di accumulo misto realizzato combinando batterie al piombo e supercondensatori, anche in relazione agli effettivi costi di realizzazione dell'applicazione, in alternativa agli attuali accumulatori agli ioni di litio.

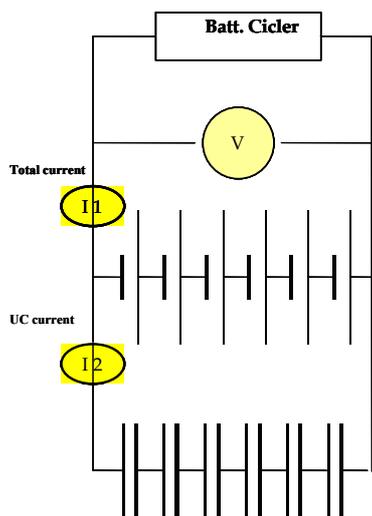
La sperimentazione del sistema di accumulo misto, completo delle necessarie interfacce di potenza e di controllo dei dispositivi, è stata compiuta presso i Laboratori ENEA UTTEI-VEBIM di Casaccia (RM) utilizzando le apparecchiature di potenza realizzate nell'ambito del progetto in una configurazione *Hardware in the Loop* (batterie e supercondensatori reali a servizio di una utenza emulata a mezzo di convertitori AC/DC bidirezionali, normalmente utilizzati per il ciclaggio delle batterie).

Lo studio dell'accumulo misto per la micro vettura perciò può essere un banco prova sia del sistema di accumulo combinato batterie al piombo (PbA) e supercondensatori (SC) che delle apparecchiature e delle tecniche di sperimentazione d'ausilio alla progettazione, anche per applicazioni non espressamente *automotive*.

### 3 Applicazioni ENEA dell'accumulo misto in ambito *automotive*

Nell'ambito di un programma di ricerca europeo, alcuni anni fa è stata condotta presso i nostri laboratori una prova vita, eseguita attenendosi alla normativa EUCAR, di un sistema di accumulo costituito da una batteria da 36 V/20 Ah, (batteria usata per un ibrido "minimo", la Toyota Crown, non commercializzata in Europa) assistita da un banco di supercondensatori, e per confronto una analoga prova vita per un'altra batteria, identica alla prima, testata da sola. La prova era ovviamente rivolta a verificare e quantificare l'effetto positivo della riduzione degli picchi di corrente sulla vita della batteria, riduzione ottenuta proprio grazie all'ibridazione del sistema: così come in un veicolo ibrido la presenza della batteria riduce i picchi di potenza del motore (o addirittura li annulla, nel funzionamento ON-OFF, a punto fisso), in un accumulo misto lo stesso fanno i supercondensatori nei confronti della batteria.

La configurazione del sistema "assistito" è molto semplice, ed è rappresentata nello schema ed in figura.



**Fig. 1 - Schema e realizzazione dell'accumulo misto batterie + supercondensatori**

Come si può vedere, il collegamento dei due sistemi è un semplice parallelo elettrico, grazie ad una scelta dei valori della tensione e della capacità del banco supercondensatori utilizzato, 48 V e 95 Farad, che aveva il solo pregio della facilità di realizzazione, sfruttando però assai poco il banco. Ciononostante, i risultati ottenuti, di seguito esposti, furono assai interessanti.

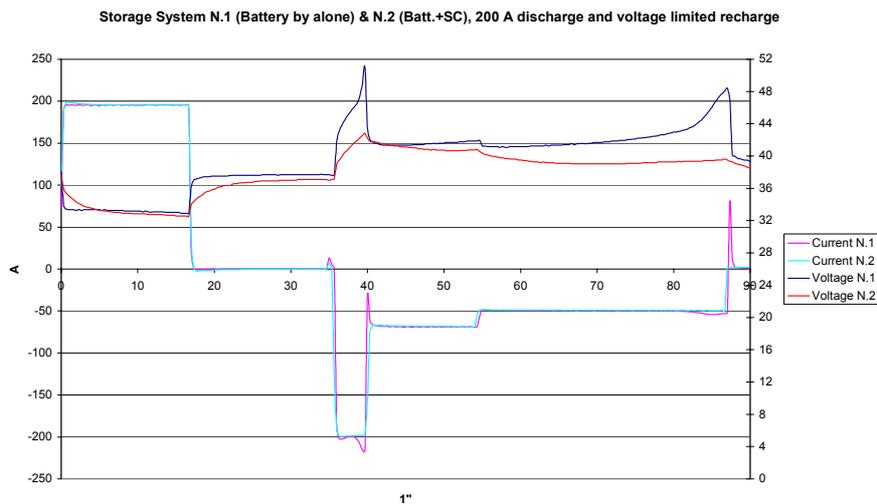
Prima della prova vita, sono state effettuate alcuni test, condotti secondo la normativa PNG nord-americana, volti a verificare per confronto, seppur in modo speditivo (non era infatti questa la richiesta del committente) il miglioramento delle prestazioni del sistema "assistito" in termini di potenza massima in frenata ed in termini di efficienza energetica.

Infatti la presenza dei supercondensatori comporta due effetti opposti ai fini della riduzione delle perdite, il "palleggiamento di energia" tra i due accumuli contrapposto alle minori perdite dei supercondensatori, grazie ai più bassi valori di resistenza interna rispetto alle batterie.

Sono state quindi eseguite due prove:

1. la prima, a correnti crescenti, per misurare le tensioni massime in ricarica raggiunte a parità di corrente
2. la seconda, costituita da una serie di gradini di corrente (100 A) in carica e scarica, tali da assicurare un comportamento "charge neutral" della batteria per misurare le efficienze complessive (carica/scarica) nei due casi.

Nel corso della prima prova, si è verificata la capacità del sistema batteria+SC di accettare correnti elevate molto meglio della batteria da sola, come può vedersi in Fig.2 dove, a parità di gradino di corrente imposto, uguale tanto in carica che in scarica (200 A), le tensioni di batteria in scarica sono circa uguali (ma la presenza dei supercondensatori addolcisce l'andamento della curva del sistema "misto") mentre in ricarica la batteria da sola si porta a 51 V, mentre quella "assistita" si ferma a 41 V.



**Fig. 2 – Diagrammi di carica/scarica dei due sistemi d'accumulo**

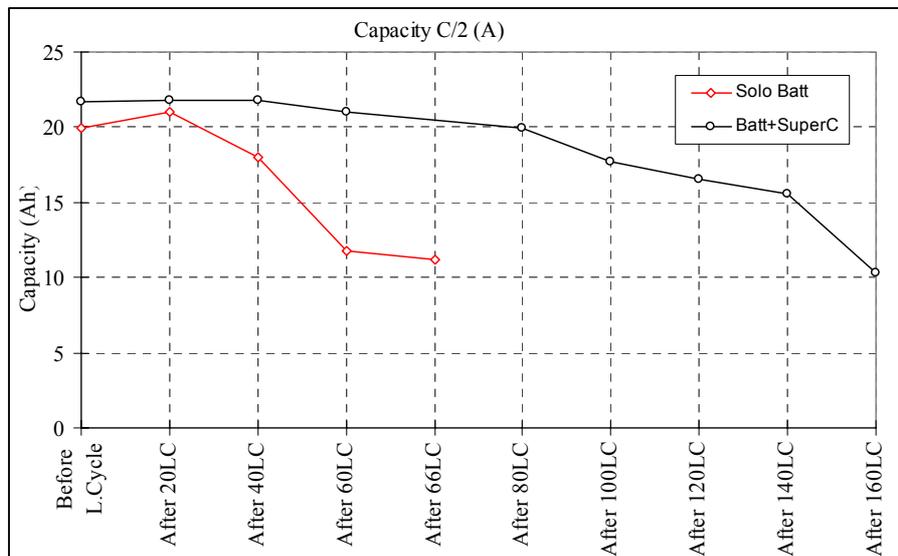
Dalle misure effettuate durante la seconda prova, Tab.1, è stato possibile calcolare il rendimento energetico dei due sistemi, come rapporto tra l'energia caricata e quella scaricata:

Tab.1

	Charged current Ah	Discharged current Ah	Energy charg. Wh	Energy discharg. Wh	Energ. effic.
Batteria	- 0.94	0.91	-40.6	30.3	75 %
Batteria+SC	- 0.95	0.90	-38.2	30.2	79 %

I risultati della prova vita delle due batterie sono infine rappresentati in Fig.3: come può vedersi la presenza del banco di supercondensatori permette di migliorare di un fattore 2.5 la vita della batteria, ed è questo forse il risultato più importante della sperimentazione, per i suoi

evidenti riflessi positivi sul costo "a fine vita" del sistema "batteria + supercondensatori, che raggiunge lo stesso degrado in termini di capacità estraibile dopo un numero di ciclaggi ben maggiore rispetto alla batteria da sola, 160 cicli contro 66 cicli.

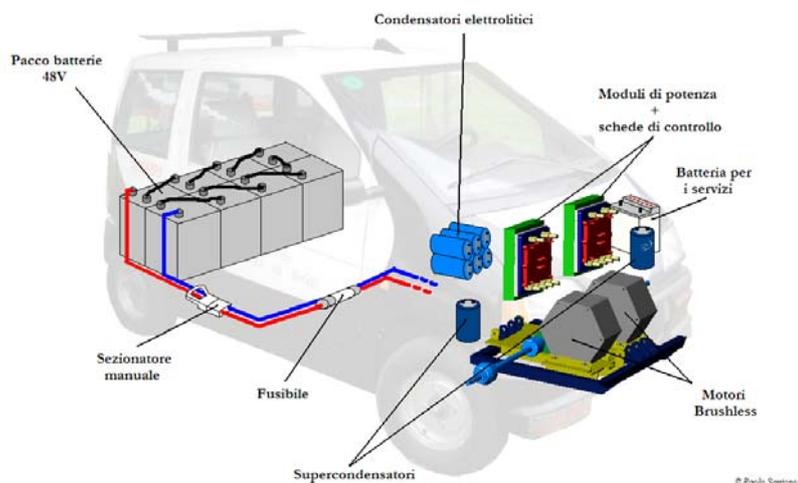


**Fig. 3 – Andamento nel tempo della capacità dei due sistemi d’accumulo**

L’esito positivo delle prove ci ha spinto quindi ad approfondire questo tema e si riportano di seguito cenni riguardante due esperienze di applicazione di accumulo misto batteria PbA ed SCs sviluppate dall’ENEA, sempre in ambito *automotive*, con vantaggi in termini di autonomia e di prestazioni rispetto alla soluzione realizzata con la sola batteria.

### 3.1 Riallestimento della city car SPAZIA

Nato dalla collaborazione dell’ENEA con la Società SEMIKRON ITALIA, azienda leader nell’elettronica di potenza, e con l’Università La Sapienza di Roma, il riallestimento dell’intero powertrain della city car SPAZIA ha previsto un accumulo misto batterie al piombo (PbA) ed un banco di supercondensatori in parallelo elettrico diretto, senza nessuna interfaccia aggiuntiva. L’azionamento elettrico innovativo è costituito da due motori brushless DC disposti sulla driveline direttamente accoppiati con le ruote motrici, l’architettura così realizzata non prevede quindi il differenziale. Il modulo di potenza è costituito da due inverter a mosfet da 100V e 600A, il sistema di controllo e la logica di gestione del sistema sono implementati su DSP. La figura 3.1.1 seguente illustra la disposizione dei componenti principali del sistema di trazione e del sistema di accumulo elettrico a bordo. Si noti che la sistemazione delle batterie e del modulo SC è funzionale alla ripartizione della potenza erogata, ovvero assorbita, tra la batteria ed il banco SC.



**Fig.4- City car SPAZIA – Disposizione dei componenti principali del powertrain**

Riguardo ai risultati ottenuti nelle due configurazioni, batteria e supercondensatori e sola batteria, si è subito osservato un notevole miglioramento nelle prestazioni in accelerazione del veicolo nel caso di accumulo misto, batteria e banco SC, con effetti positivi anche nella guidabilità del veicolo. Altro risultato molto importante, ottenuto sempre nella configurazione con gli supercondensatori, riguarda il miglioramento dell'efficienza complessiva del sistema, con una incidenza positiva registrata sull'autonomia del veicolo.

I risultati ottenuti nelle due configurazioni, a parità di ogni altra condizione, facendo riferimento al ciclo ECE15 standard, hanno evidenziato un peggioramento del consumo chilometrico di circa il 10%, se si escludono i supercondensatori. I valori medi registrati del consumo chilometrico sono infatti di 110,2 Wh/km nella configurazione di sola batteria e di 100,2 Wh/km in allestimento accumulo misto. La vettura è stata presentata alla Formula ATA EHI 2008, tenutasi presso la pista prova del CRF di Orbassano, Fig.3.



**Fig.5- City car SPAZIA – Disposizione dei componenti principali del powertrain**

### **3.2. Sistema di Accumulo Energetico Integrato – 12V IEES**

Una soluzione innovativa per il miglioramento delle prestazioni energetico-ambientali degli autoveicoli è stata sviluppata e brevettata presso laboratori ENEA della Casaccia (RM), in collaborazione con la Società Magneti Marelli Powertrain SpA.

Il nuovo Sistema di Accumulo Energetico Integrato, 12V Integrated Energy Storage System, caratterizzato da elevata efficienza energetica, è realizzato per applicazioni di veicoli ibridi del tipo micro Hybrid Electric Vehicle ( $\mu$ HEV), naturale evoluzione delle configurazioni di veicolo tradizionali, che prevedono a bordo in aggiunta al tradizionale sistema di propulsione una macchina elettrica reversibile funzionante alla stessa tensione dell'impianto elettrico del veicolo.

In particolare, il sistema di accumulo è di tipo misto, costituito da una batteria al piombo acido standard (PbA) da 12V e 360A, da un modulo supercondensatori (SC) di opportuna capacità completo di circuito di equalizzazione interna, e da un induttore di potenza adeguatamente dimensionato disposto in serie alla batteria ed a monte del modulo SC.

Il sistema, semplice ed economico, destinato in particolare al settore automobilistico, soddisfa le richieste di potenza-energia per le funzionalità ibride di *stop&start* del motore a combustione interna (MCI) e di recupero in decelerazione del veicolo. L'arresto del motore – per esempio in caso di traffico congestionato oppure nelle fermate ai semafori – viene effettuato in modo automatico, così come il successivo riavvio per la rimessa in marcia del veicolo, consentendo, inoltre, un parziale recupero dell'energia cinetica nelle fasi di rallentamento e frenata, energia altrimenti dissipata.

Inoltre, la nuova tecnologia consente di alimentare i carichi elettrici per il comfort e la sicurezza di guida – per esempio il condizionatore d'aria, i fari, la strumentazione di bordo – attivi anche quando il motore è spento, permette di superare le problematiche che si possono verificare nelle operazioni di Stop&Start del MCI in condizioni severe di temperatura esterna e/o con carichi elettrici attivi, che limitano la capacità della stessa batteria.

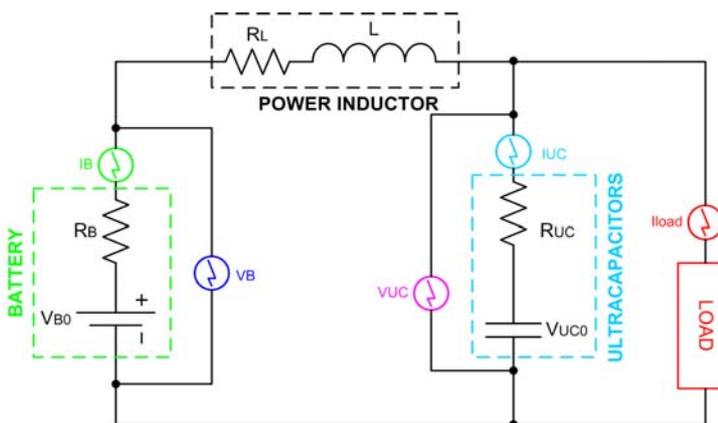
La particolarità della disposizione circuitale adottata, che prevede l'induttore di potenza disposto in serie alla batteria ed a monte del modulo SC, permette di ripartire in modo differenziato i flussi di potenza ed energia che si manifestano durante i transitori di scarica/carica, corrispondenti rispettivamente alle operazioni di *stop&start* del motore a combustione interna e di recupero energetico in decelerazione del veicolo.

Il risultato ottenuto è una riduzione delle perdite per effetto Joule e di un aumento della capacità della batteria a parità di carica estratta ovvero accumulata, con effetti positivi sulla stessa vita utile della batteria e sull'affidabilità del sistema di accumulo.

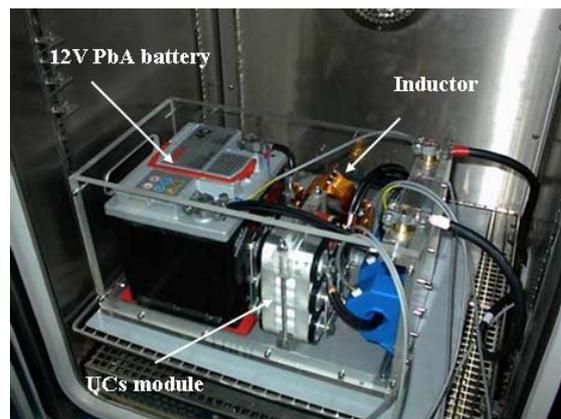
L'assenza di dispositivi elettronici aggiuntivi di regolazione e di interfaccia tra sistema di accumulo misto e l'impianto elettrico del veicolo, rendono la soluzione ideata efficiente ed affidabile, nonché economicamente interessante, anche considerando le dimensioni del modulo SC realizzato per questa applicazione con soli sei elementi da 2,5 V, e gli attuali costi raggiunti dagli accumulatori al piombo acido.

Il prototipo, sviluppato presso i Laboratori dell'ENEA Casaccia (RM), è completo dei sensori per la misura delle grandezze elettriche di interesse. La realizzazione è in una singola unità, dotata di terminali per il collegamento diretto con l'impianto elettrico del veicolo.

Le figure seguenti mostrano lo schema semplificato ed il prototipo del sistema realizzato in ENEA.



**Fig. 3.2.1) Schema semplificato del sistema di accumulo energetico integrato 12V**



**Fig. 3.2.2) Prototipo del sistema di accumulo energetico integrato 12V realizzato in ENEA**

#### 4. Inquadramento del Progetto

Per la realizzazione del sistema di accumulo misto del veicolo tipo microcar in allestimento elettrico è stata effettuata inizialmente una attività di indagine necessaria alla definizione delle specifiche del veicolo. Si è fatto riferimento agli attuali veicoli elettrici ed anche a veicoli con motore a c.i. di questa classe — **quadricicli leggeri categoria L6e**, Decreto Ministeriale 31 gennaio 2003 - G.U. n. 123 del 29 Maggio 2003, Decreto Ministeriale 5 dicembre 2003 - G.U. n. 71 del 25 Marzo 2004 — disponibili sul mercato.

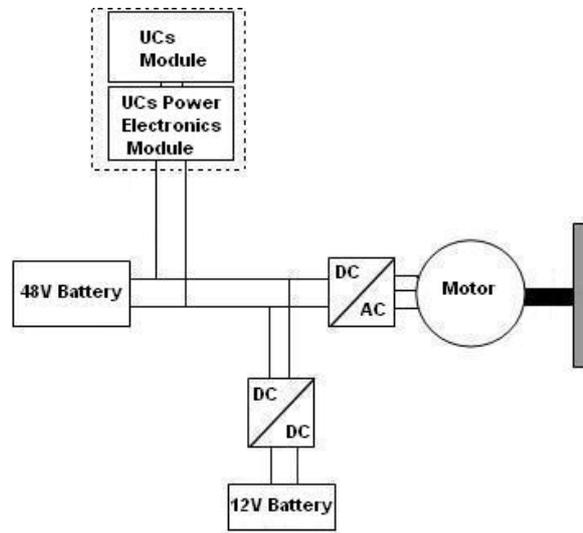
Le prescrizioni di riferimento contenute nel D.M. 5 dicembre 2003, Art.1.3.a, sono riportate in nota<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Il presente Decreto si applica anche ai quadricicli, ossia ai veicoli a motore a quattro ruote aventi le seguenti caratteristiche:

- a) i quadricicli leggeri, la cui massa a vuoto è inferiore o pari a 350 kg (categoria L6e), esclusa la massa delle batterie per i veicoli elettrici, la cui velocità massima per costruzione è inferiore o uguale a 45 km/h e
  - 1) la cui cilindrata del motore è inferiore o pari a 50 cm<sup>3</sup> per i motori ad accensione comandata; o
  - 2) la cui potenza massima netta è inferiore o uguale a 4 kW per gli altri motori a combustione interna; o
  - 3) la cui potenza nominale continua massima è inferiore o uguale a 4 kW per i motori elettrici. Tali veicoli sono conformi alle prescrizioni tecniche applicabili ai ciclomotori a tre ruote della categoria L2e salvo altrimenti disposto da una Direttiva CE particolare.

Di seguito sono mostrati in figura 4.1 l'architettura individuata ed in tabella 4.1 i dati preliminari del veicolo in allestimento elettrico utilizzati per le simulazioni effettuate in vista della definizione del modulo supercondensatori, **UCs Module**, e del dispositivo di conversione DC/DC più adeguato, in figura indicato **UCs Power Electronics Module**.



**Fig. 4.1) Schema semplificato del veicolo in allestimento elettrico con accumulo misto Batteria-Supercondensatori**

Vehicle Curb Weight <sup>2</sup> (VCW)	350 kg
Vehicle Test Weight (VTW)	VCW +75+25 kg
Motore Lombardini LDW 502	taratura a 4 kW Coppia 20.0 Nm @ 1600 rpm Potenza max 4.0 kW @ 3600 rpm
Massa motore LDW 502	53 kg
Coefficiente di resistenza aerodinamica Cx	0.28
Sezione frontale veicolo	2.10 m <sup>2</sup>
Coefficiente di resistenza al rotolamento	0.010
Raggio di rotolamento ruota	0.28 m
Momento d'inerzia ruota	0.5 kgm <sup>2</sup>
Potenza elettrica media ausiliari	500 W
Rendimento totale trasmissione	0.92
Rapporto di trasmissione totale	8.445:1
Trazione	anteriore
Massa azionamento elettrico di trazione	30+14 kg
Momento d'inerzia motore/i di trazione	0.022 kgm <sup>2</sup>
Massa batterie di trazione	260 kg
Massa modulo SC	15 kg
Massa UCs Power Electronics Module	5 kg

**Tab. 4.1) Dati preliminari del veicolo**

<sup>2</sup> La massa del veicolo in ordine di marcia (Vehicle Curb Weight) terrà conto del nuovo allestimento in elettrico da sviluppare; a questo proposito si tenga conto che le masse indicate in tabella relative al sistema di accumulo elettrico e all'azionamento elettrico di trazione in questa fase sono indicative.

Riguardo alla definizione delle masse a bordo del veicolo, si è fatto riferimento ai D.M. specificati applicabili per questa classe di veicoli. Di seguito, in tabella 4.2, sono riportate le valutazioni effettuate riguardanti la stima della massa del veicolo — riferimento categoria L6e — in allestimento elettrico con accumulo misto batterie al piombo acido (PbA) e modulo supercondensatori (SC).

Massa in ordine di marcia veicolo categoria L6e motorizzato Lombardini LDW 502	350 kg
--	--------

Massa motore a c.i. LDW 502 (a secco)	53 kg
---------------------------------------	-------

capacità coppa olio 1.4 litri , densità olio lubrificante 0.88 kg/dm <sup>3</sup>	1.2 kg
---	--------

capacità serbatoio combustibile 18 litri riempito al 90%, densità gasolio 0.845 kg/dm <sup>3</sup>	13.7 kg
--	---------

Stima massa variatore di velocità, differenziale e serbatoio + accessori pari al 15% del motore	8.0 kg
---	--------

La massa del veicolo ridotta delle masse corrispondenti alla motorizzazione termica, ai liquidi ed alle parti di trasmissione + altri elementi non presenti nella versione elettrico, nelle ipotesi fatte, risulterebbe pari a circa 274 kg.

$$350 - 53 - (1.2 + 13.7 + 8) = 274 \text{ kg}$$

Siccome la massa in ordine di marcia relativa ai quadricicli in versione elettrico, sia leggeri che pesanti, non prevede la massa delle batterie<sup>3</sup> (nel caso pari a 257.6 kg) la nuova massa del veicolo in ordine di marcia terrà conto della massa dei due motori elettrici e dei rispettivi azionamenti (pari circa 44 kg complessivamente) e del modulo SC + convertitore DC/DC (circa 20 kg)<sup>4</sup>.

Quindi la massa del veicolo in allestimento elettrico in ordine di marcia risulterebbe inferiore ai 350 kg, limite massimo previsto dalla Normativa<sup>5</sup>

$$274 + 44 + 20 = 338 \text{ kg} < 350 \text{ kg}$$

La capacità di carico massima per i quadricicli leggeri è fissata in 200 kg.

La massa massima è calcolata dal costruttore del veicolo; se per il veicolo di categoria L6e questa è uguale a 775 kg, allora la capacità di carico, ovvero il carico utile, considerando 75 + 25 kg (guidatore + bagaglio) in queste ipotesi risulterebbe circa 80 kg, cioè una massa non inferiore all'eventuale passeggero trasportato.

$$775 - (338 + 257.6 + 75 + 25) = 79.4 \text{ kg}$$

**Tab. 4.2) Stima massa del veicolo categoria L6e in allestimento elettrico**

<sup>3</sup>Decreto 31 Gennaio 2003 G.U. N.123 del 29 Maggio 2003; Decreto 3 Novembre 1994 G.U. N. 284 del 5 Dicembre 1994; [www.quadricicli.it/legislazione.html](http://www.quadricicli.it/legislazione.html)

<sup>4</sup> Andrebbe comunque verificato meglio come considerare la massa del modulo SC che in effetti svolge la stessa funzione di accumulo elettrico a bordo per la marcia del veicolo.

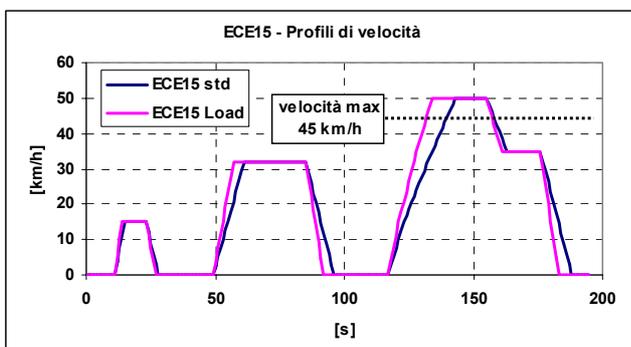
<sup>5</sup> Decreto 31 Gennaio 2003 G.U. N.123 del 29 Maggio 2003; Decreto 3 Novembre 1994 G.U. N. 284 del 5 Dicembre 1994; [www.quadricicli.it/legislazione.html](http://www.quadricicli.it/legislazione.html)

Relativamente ai cicli cinematici individuati per il progetto del sistema di accumulo si sono considerate due possibili percorrenze di riferimento per il veicolo in allestimento elettrico: il Ciclo Urbano ECE15, ciclo elementare della frazione urbana del New European Driving Cycle (NEDC), ed una versione modificata della stessa procedura standard di prova nelle operazioni di accelerazione e di decelerazione, denominata ECE15Load. Le procedure di prova sono riportate sinteticamente in tabella 4.3 seguente. Si osservi che per questa applicazione, categoria L6e, la velocità massima del veicolo è ridotta da 50 km/h a 45 km/h.

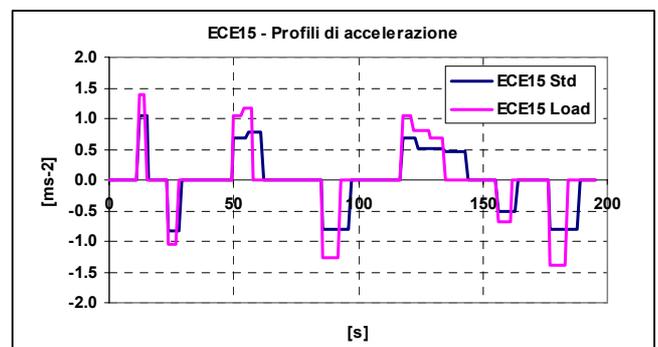
CICLO URBANO BASE E "LOAD" (195 s)									
Operazione		Accelerazione		Velocità		Durata operazione		Tempo totale	
Numero	Tipo	UDC	UDC load	UDC	UDC load	UDC	UDC load	UDC	UDC load
		[m/s <sup>2</sup> ]	[m/s <sup>2</sup> ]	[km/h]	[km/h]	[s]	[s]	[s]	[s]
1	Stop	0.00	<b>0.00</b>	0	0	11	<b>11</b>	<b>11</b>	<b>11</b>
2	Accelerazione	1.04	<b>1.39</b>	0-15	0-15	4	<b>3</b>	15	14
3	Velocità costante	0.00	<b>0.00</b>	15	15	8	<b>9</b>	<b>23</b>	<b>23</b>
4	Decelerazione	-0.83	<b>-1.04</b>	15-0	15-0	5	<b>4</b>	28	27
5	Stop	0.00	<b>0.00</b>	0	0	21	<b>22</b>	<b>49</b>	<b>49</b>
6	Accelerazione	0.69	<b>1.04</b>	0-15	0-15	6	<b>4</b>	55	53
7	Accelerazione	0.79	<b>1.18</b>	15-32	15-32	6	<b>4</b>	61	57
8	Velocità costante	0.00	<b>0.00</b>	32	32	24	<b>28</b>	<b>85</b>	<b>85</b>
9	Decelerazione	-0.81	<b>-1.27</b>	32-0	32-0	11	<b>7</b>	96	92
10	Stop	0.00	<b>0.00</b>	0	0	21	<b>25</b>	<b>117</b>	<b>117</b>
11	Accelerazione	0.69	<b>1.04</b>	0-15	0-15	6	<b>4</b>	123	121
12	Accelerazione	0.51	<b>0.79</b>	15-35	15-35	11	<b>7</b>	134	128
13	Accelerazione	0.46	<b>0.69</b>	35-50	35-50	9	<b>6</b>	143	134
14	Velocità costante	0.00	<b>0.00</b>	50	50	12	<b>21</b>	<b>155</b>	<b>155</b>
15	Decelerazione	-0.52	<b>-0.69</b>	50-35	50-35	8	<b>6</b>	163	161
16	Velocità costante	0.00	<b>0.00</b>	35	35	15	<b>17</b>	<b>178</b>	<b>178</b>
17	Decelerazione	-0.97	<b>-1.39</b>	35-0	35-0	10	<b>7</b>	188	185
18	Stop	0.00	<b>0.00</b>	0	0	7	<b>10</b>	<b>195</b>	<b>195</b>

**Tab. 4.3) Cicli cinematici di riferimento per il Progetto del sistema di accumulo misto**

I profili di velocità e di accelerazione del veicolo nelle due modalità di prova sono riportati nelle due figure seguenti.



**Fig. 4.2) Velocità veicolo-ECE15 std, ECE15 Load**



**Fig. 4.3) Accelerazione veicolo-ECE15 std, ECE Load**

Definita l'architettura ed i dati preliminari del veicolo in allestimento elettrico, determinate le masse a bordo, individuata la modalità di percorrenza di riferimento, con i profili di velocità e di accelerazione, sono stati fissati i DATI VEICOLO E PRESTAZIONI della microcar in allestimento elettrico di riferimento per il Progetto del sistema di accumulo misto, riportati in Tab. 4.4 seguente.

#### **Veicolo**

Veicolo **categoria L6e**; i dati sono quelli riportati nel documento "Dati preliminari veicolo.doc"

#### **Sistema di alimentazione a 48 V**

Modulo da 8 batterie (ognuna formata da 3 celle) da 6 V, modello HAZE HZY6 225 EV

Tensione massima a vuoto (2.27 V per cella): 56 V

Tensione minima a vuoto (1.7 V per cella): 40 V

#### **Sistema di trazione**

Un azionamento per ruota. Ogni azionamento è formato da:

1 motore brushless DC: modello EP 48 M 80 10 (48 V, 40 N·m, 1000 rpm, 4,2 kW)

1 invertitore: modello SME mod. B00IV210B03 80V 450A (oppure SK 400 MDL 10 T 100 V, 390 A oppure Mitsubishi)

1 scheda di controllo dell'azionamento

N.B. La corrente in condizioni di regime nei motori sarà limitata in modo che la potenza massima continuativa del sistema sia di 4kW. In condizioni transitorie il motore (alimentato dall'invertitore) è in grado di sviluppare 100-120Nm per 60s. Per tempi più brevi la coppia può essere maggiore.

I motori sono a presa diretta e la loro velocità effettiva di rotazione a carico è di 850 rpm che corrisponde a circa 85 km/h. Per limitare la velocità a 45 km/h verrà limitata la tensione di alimentazione limitando il duty-cycle di controllo dell'invertitore.

#### **Specifiche**

Velocità massima di 45 km/h

Erogazione della potenza richiesta per percorrere il ciclo urbano base e da quello "load" limitati a 45 km/h

Capacità di partire su una rampa del 12% con massa totale del veicolo data da VTW + una seconda persona a bordo (+ 75 kg)

#### **Ipotesi**

Le grandezze considerate nella specifica dei rendimenti sono la potenza meccanica alle ruote e la potenza elettrica ai morsetti in cc dell'invertitore

Rendimento medio del sistema di trazione durante la marcia: 78%; questo rendimento include quello dell'accoppiamento motore-ruota, pari al 95%

Rendimento medio del sistema di trazione durante la frenatura a recupero: 70%

#### **TEST**

Ciclo urbano base (ECE 15) limitato alla velocità di 45 km/h e massa di prova pari a VTW

Ciclo urbano "load" limitato alla velocità di 45 km/h e massa di prova pari a VTW

Velocità costante pari a 45 km/h continuativa su una distanza di 1 km e massa di prova pari a VTW + capacità di carico massimo (Da una stima del peso del veicolo elettrico, assumendo che il veicolo categoria L6e abbia un sovraccarico di 350kg -che includono il passeggero ma non il guidatore per una massa totale di 775kg- risulta che il sovraccarico del veicolo elettrico è di 75kg, pari proprio alla massa dell'eventuale passeggero).

Partenza in rampa del 12 % e massa di prova VTW + una seconda persona a bordo (+ 75 kg)

**Tab. 4.4) Dati Veicolo e Prestazioni**

I risultati delle simulazioni effettuate secondo quanto determinato in ordine ai DATI VEICOLO E PRESTAZIONI, volendo in particolare garantire un funzionamento della batteria a corrente costante e pari alla corrente media necessaria per l'esecuzione delle due modalità di prova, mentre la restante frazione variabile della corrente, erogata nei transitori di accelerazione ovvero accettata nelle fasi di decelerazione e frenata, è sostenuta dal modulo supercondensatori, hanno permesso di individuare per il modulo SC alcune possibili configurazioni per l'applicazione in esame.

Sono stati esaminati i cataloghi dei seguenti produttori: Ioxus, Nesscap e Maxwell. Sono state considerate diverse soluzioni formate da moduli Nesscap e Maxwell.

Tenendo conto dell'attività sperimentale da eseguire sul sistema di accumulo, si è optato per una soluzione conservativa nella scelta del banco SC, che consentisse cioè il livellamento completo dell'erogazione della corrente delle batterie, come sopra già riportato. La configurazione scelta consente quindi di esplorare tutto il campo di soluzioni a livellamento "meno spinto", ad esempio dimezzando il numero dei SC, che di conseguenza si è realizzato con due stringhe in parallelo.

La scelta è quindi caduta su una soluzione realizzata con un banco serie x parallelo **4x2** e formato da moduli Maxwell **BMOD0250P016 B02**.

Le batterie individuate per l'applicazione, in grado di garantire una autonomia del veicolo fino a 80 km percorsi in ambito urbano secondo la modalità standard di prova adottata, sono al piombo acido, del tipo Valve Regulated Lead Acid con elettrolita in gel, moduli HAZE HZY6-225EV 6 V 200 Ah.

(8 moduli in serie e tensione nominale del sistema pari a 48 V DC).

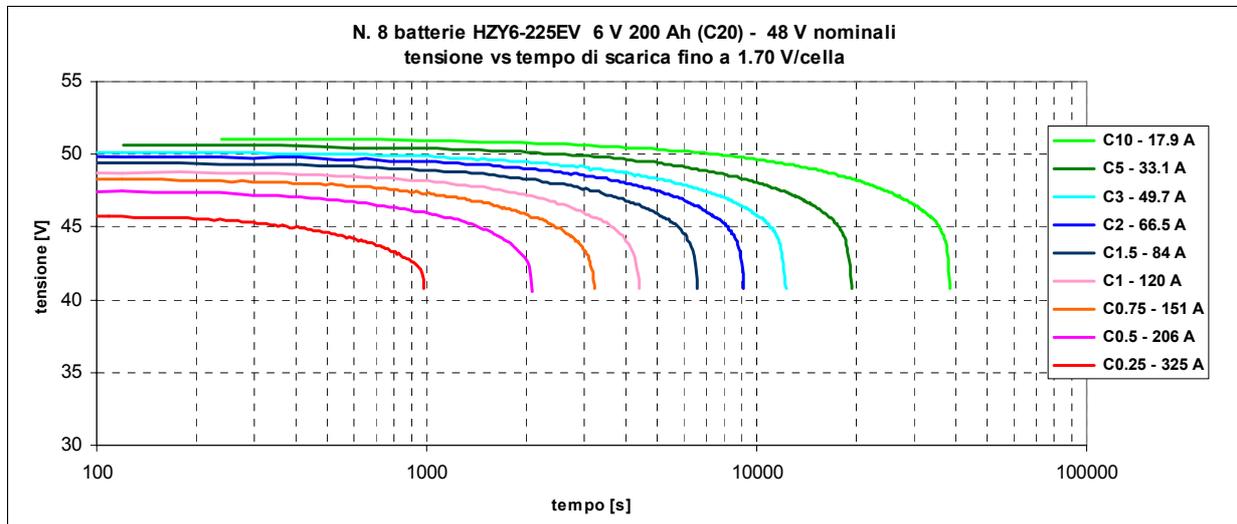
## **5. Prove preliminari presso i Laboratori ENEA UTTEI-VEBIM di Casaccia (RM)**

Presso i Laboratori UTTEI-VEBIM di Casaccia sono state effettuate una serie di verifiche sulle apparecchiature di potenza del Laboratorio con l'obiettivo di valutare la possibilità di svolgere le prove funzionali sul sistema di accumulo misto in una configurazione del tipo *Hardware in the Loop*. I risultati delle prove svolte hanno dato esito positivo.

Alla luce dei risultati ottenuti in Laboratorio con le apparecchiature di potenza disponibili, tutte le attività di verifica del funzionamento del sistema di accumulo misto potranno essere svolte con questa modalità in Laboratorio, secondo l'allestimento definito già utilizzato anche per altre esperienze di sistemi di trazione elettrica con ottimi risultati. In questo caso i valori delle grandezze elettriche di interesse con cui testare il sistema di accumulo elettrico misto,

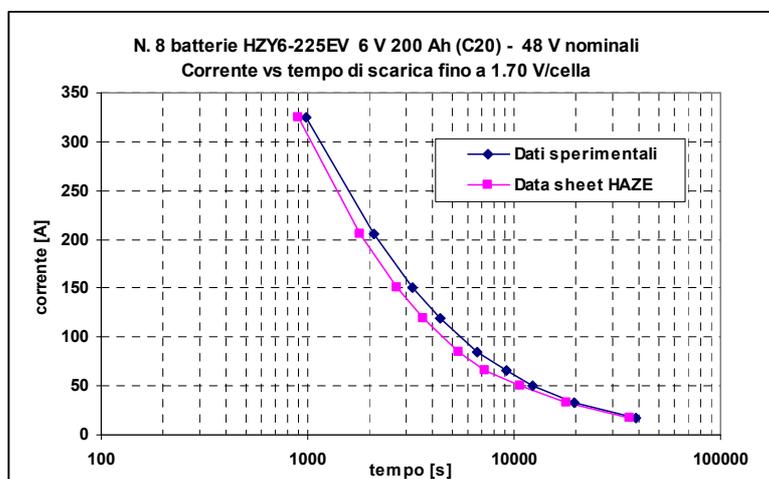
completo dell'interfaccia elettronica dedicata al modulo SC, sono quelli che risultano dalle simulazioni della microcar.

Inizialmente sono state effettuate le prove di caratterizzazione del pacco batterie da utilizzare a bordo del veicolo, pacco realizzato con 8 moduli in serie e tensione nominale del sistema pari a 48 V DC. La figura 5.1 che segue è relativa alle prove effettuate a differenti regimi di scarica.



**Fig. 5.1) Batterie HAZE 48V nominale – Scarica vari regimi di corrente costante fino a 40.8V**

Come mostra la figura 5.2 seguente, le prestazioni delle batterie specificate sono risultate superiori a quelle dichiarate dal costruttore.

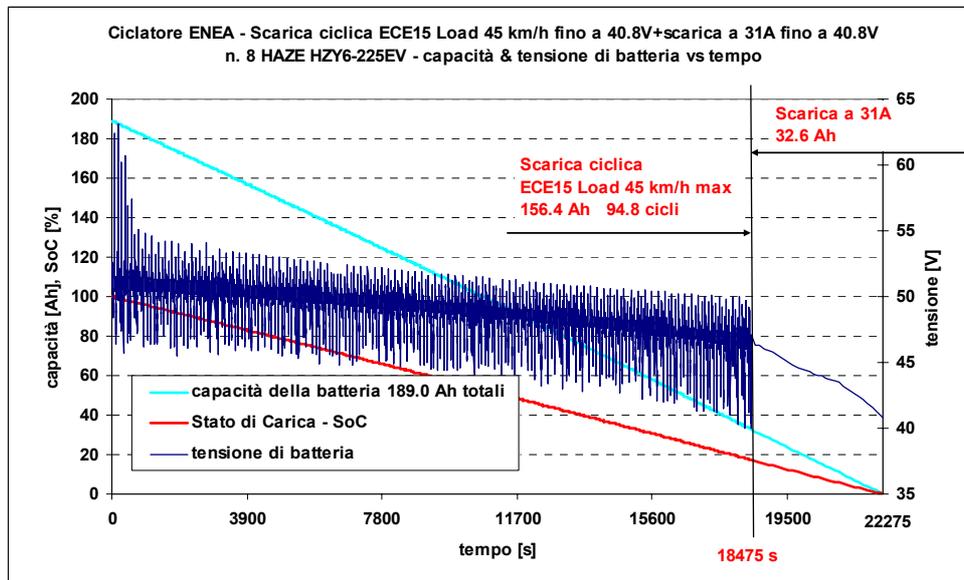


**Fig. 5.2) Pacco batterie HAZE 48V nominali – Prestazioni rilevate e dichiarate dal costruttore**

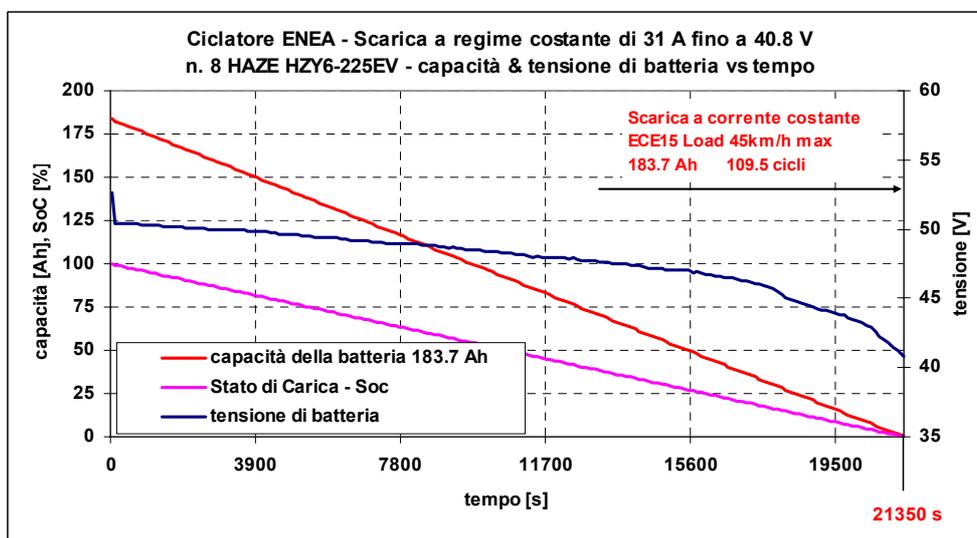
Sulla scorta delle verifiche effettuate e dei risultati ottenuti dalle prove di caratterizzazione del pacco batterie da utilizzare a bordo del veicolo, sono state condotte due campagne di prove sul pacco batterie HAZE 48 V DC, al fine di verificare l'autonomia del veicolo elettrico nei due differenti allestimenti, sola batteria ed accumulo misto batteria + modulo SC. Le due campagne di prove sono relative al ciclo ECE15 standard ed al ciclo ECE15 Load.

Per entrambe le campagne di prova è risultata una maggiore percorrenza, espressa rispettivamente in *Km ECE equivalenti* e *km ECE Load equivalenti*, dell'allestimento con accumulo misto rispetto alla configurazione sola batteria.

L'aumento di autonomia registrato è stato nei due casi pari a circa il 15%, con un maggior risparmio nella configurazione *ECE Load*, vedi Figg. 5.3 e 5.4 seguenti, conformemente alle attese.



**Fig. 5.3) Pacco batterie HAZE 48V nominali – Scarica ciclica ECE15 Load**



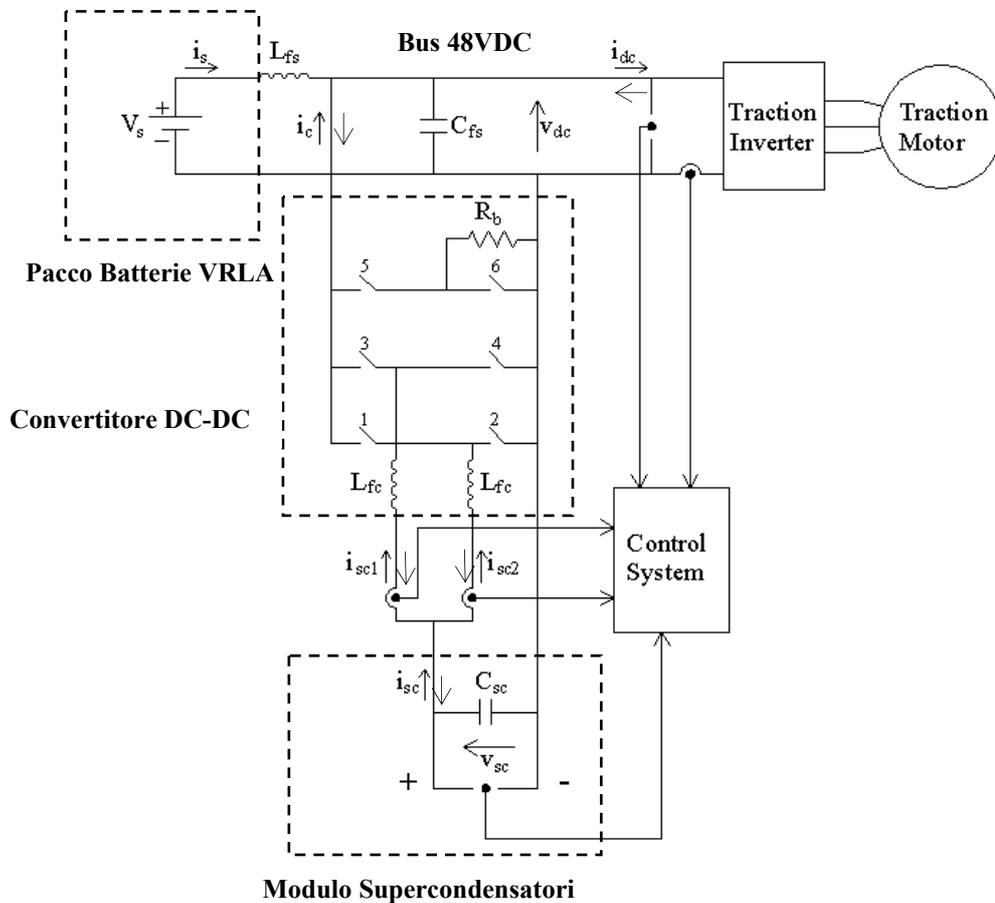
**Fig. 5.4) Pacco batterie HAZE 48V nominali – Scarica a corrente media ECE15 Load**

## 6. Progettazione e realizzazione del convertitore DC-DC

L'attività è stata oggetto di un incarico di servizio verso il Laboratorio di Sistemi Elettrici per la Veicolistica e l'Automazione del Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università di Padova, che ha previsto tre fasi di lavoro, di seguito illustrate.

## 6.1 Attività relative alla FASE 1

Lo schema di principio del sistema di accumulo misto sviluppato è mostrato nella figura 6.1.1.



**Fig. 6.1.1) Schema semplificato del sistema di accumulo misto e propulsivo**

Riguardo al funzionamento del sistema di accumulo misto, la sorgente di energia è costituita da un pacco batterie al piombo del tipo Valve Regulated Lead Acid (VRLA) accoppiato in parallelo elettrico, via un convertitore bidirezionale DC-DC, ad un modulo supercondensatori (SC) del tipo Electric Double Layer Capacitor (EDLC) avente la funzione di limitare i picchi di corrente erogati, ovvero assorbiti, dalle batterie durante il funzionamento del veicolo. La batteria segue allora un funzionamento a regime costante corrispondente alla potenza media richiesta dal veicolo, il modulo SC interviene nei soli transitori di funzionamento del veicolo fornendo, ovvero accettando, la frazione variabile di potenza. Il convertitore DC-DC è realizzato con un invertitore del tipo Intelligent MOSFET Power Module. Il convertitore DC-DC formato dai mosfet switches 1, 2, 3 e 4 è bidirezionale e innalza la tensione del modulo supercondensatori (SC) al valore della tensione di batteria, ovvero del DC Bus, nelle fasi di scarica del modulo SC (convertitore boost), inoltre abbassa la tensione dal valore di tensione di batteria, ovvero del Bus DC, al valore della tensione del modulo SC nelle fasi di ricarica degli stessi supercondensatori (convertitore buck). La topologia utilizzata è del tipo interleaved per ridurre le sollecitazioni nei dispositivi ed il ripple di corrente negli SC.

Il convertitore realizzato dai mosfet switches 5 e 6 è unidirezionale, alimenta la resistenza  $R_b$  ed è attivo nel caso che la tensione  $V_{dc}$  del Bus superi il valore di tensione massimo prefissato (per esempio durante una frenatura prolungata del veicolo in condizioni di batteria e modulo SC completamente carichi).

Le induttanze  $L_{fc}$  sono funzionali all'azione di boost e di buck. Il filtro  $L_{fs}$  e  $C_{fs}$  sul DC-Bus attenua le armoniche di corrente prodotte dalla modulazione del convertitore DC-DC e circolanti in batteria. Il sistema di controllo del convertitore DC-DC ed il Power Management del sistema di accumulo misto è realizzato con un DSP Texas ed utilizza 3 sensori di corrente e 2 sensori di tensione (sonde LEM). Il DC-Bus è a 48 V nominali.

## 6.2 Attività relative alla FASE 2

La Fase 2 del progetto è relativa alla realizzazione del sistema di accumulo misto. Si riportano di seguito alcune figure riguardanti il set-up di prova.



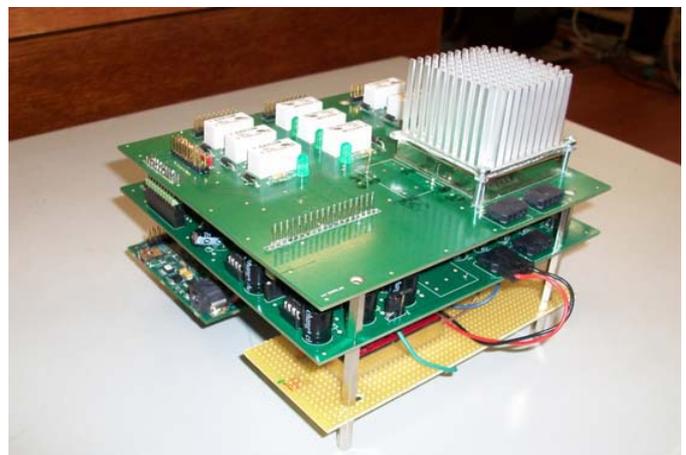
**Fig. 6.2.1) Batterie HAZE 6V 200Ah  
n. 8 moduli 48 VDC.**



**Fig. 6.2.2) Supercondensatori MAXWELL 16V 250F  
n. 4x2 moduli - 48V DC 125F  
Induttanze funzionali al convertitore DC-DC**



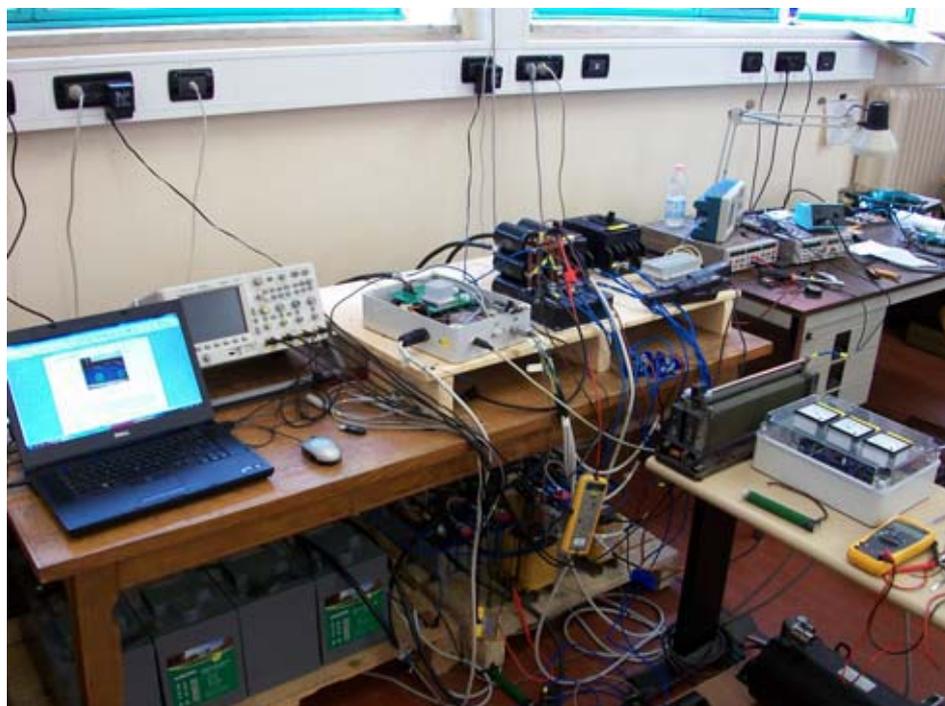
**Fig. 6.2.3) Modulo di potenza SME  
mod. B00IV210B03, 80V, 450A**



**Fig. 6.2.4) Vista di insieme della Unità Elettronica di  
Controllo (ECU) con tre schede dedicate alla logica di  
gestione, all'acquisizione segnali ed alla loro gestione**



**Fig. 6.2.5) La resistenza di frenatura è costituita da n. 2 resistori da 1Ω, 1kW collegati in parallelo**

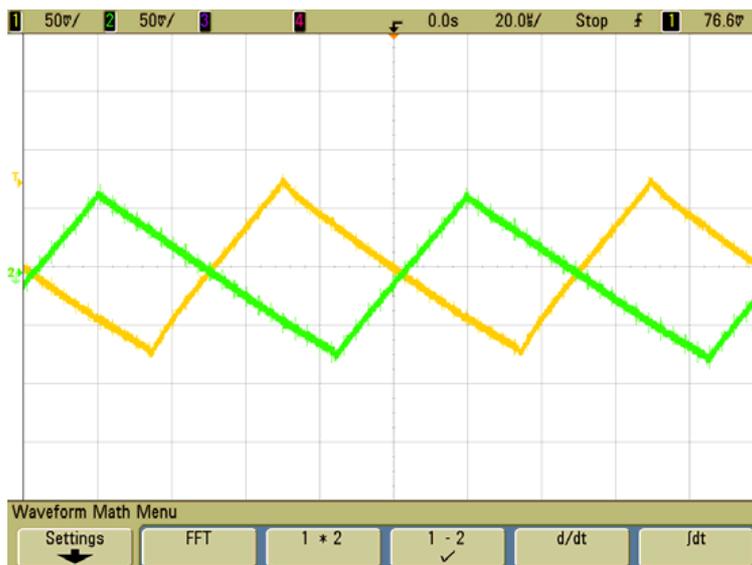


**Fig. 6.2.6). Postazione sperimentale realizzata presso il Laboratorio di Sistemi Elettrici per l'Automazione e la Veicolistica – Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università di Padova.**

Relativamente al funzionamento del sistema di accumulo misto, in particolare al convertitore DC-DC, sono state effettuate, congiuntamente con personale ENEA ed UNIVERSITA' DI PADOVA, significative prove di insieme riguardanti le prestazioni del sistema di conversione, preliminari alla campagna di prove prevista alla Fase 3 del Progetto. Si riportano di seguito solo alcuni risultati relativi alle verifiche effettuate, rimandando per eventuali approfondimenti alla RELAZIONE UNIPD - FASE 2, relativa alle attività ad oggi svolte.

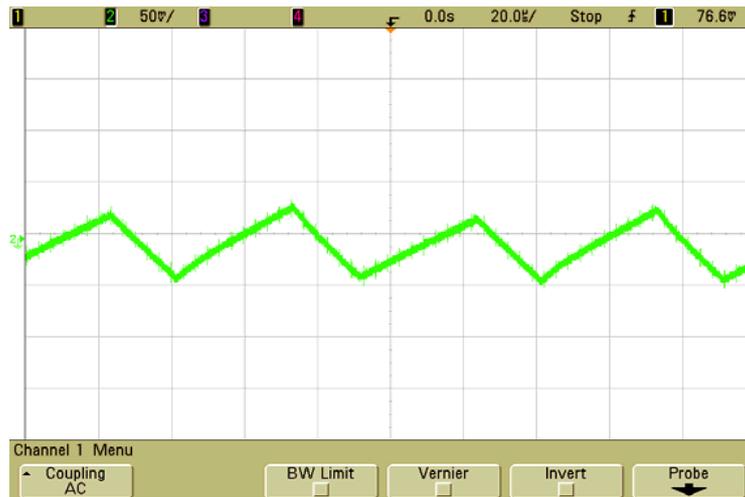
La modalità di funzionamento individuata per il convertitore DC-DC è del tipo interleaved, per ridurre le sollecitazioni nei dispositivi, in batteria ed il ripple di corrente negli SC..

A questo proposito si osservino i risultati riportati nelle due figure seguenti che mostrano l'andamento delle correnti all'ingresso dei due rami del convertitore durante una fase di scarica dei supercondensatori effettuata a corrente costante di 50A. La figura 6.2.7 di pagina seguente, relativa alla sola componente alternata delle correnti, evidenzia il ritardo di mezzo periodo di modulazione tra le correnti nelle due fasi del convertitore dovuto al funzionamento interleaved.



**Fig. 6.2.7) Correnti all'ingresso delle due fasi del chopper  
(scala correnti 5A/div; scala tempo 20µs/div)**

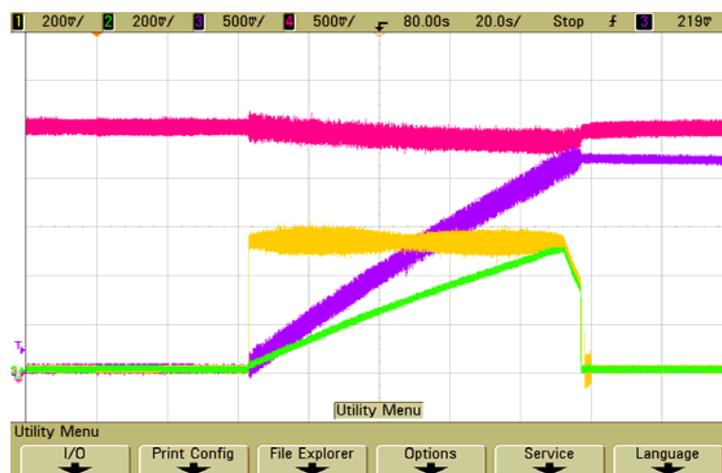
La Fig. 6.2.8 successiva mostra sempre la componente alternata della corrente complessivamente erogata dal banco di supercondensatori nelle medesime condizioni di funzionamento. Si può osservare la riduzione dell'ampiezza del ripple e il raddoppio della sua frequenza, con vantaggi in termini di minori sollecitazioni di corrente per i supercondensatori e di riduzione delle perdite per effetto della loro resistenza interna.



**Fig. 6.2.8) Corrente complessivamente erogata dal banco di supercondensatori (scala correnti 5A/div;scala tempo 20µs/div)**

E' stata verificata la fase di precarica del modulo SC, operazione che viene effettuata in modalità automatica ogni qualvolta si richiede la messa in marcia del veicolo dopo una sosta prolungata, qualora la tensione del modulo SC risulti minore del 95% della tensione a vuoto della batteria. Gli andamenti delle tensioni e delle correnti di interesse in questa fase sono mostrate nella successiva figura 6.2.9.

Nella figura 6.2.9 sono mostrate la tensione di batteria (traccia magenta), la tensione del banco di supercondensatori (traccia viola), la corrente di carica del banco di supercondensatori (traccia gialla) e la corrente erogata dalla batteria (traccia verde). Si noti come la corrente erogata dalla batteria cresca linearmente all'aumentare della tensione del banco di supercondensatori, pur essendo costante la corrente di carica di questi ultimi. Ciò è una conseguenza della variazione del duty-cycle del convertitore durante il processo di carica.



**Fig. 6.2.9) Tensione del banco di supercondensatori (traccia viola) durante la loro carica da 0V al 90% della tensione di batteria (traccia rossa) con corrente costante di 50A (traccia gialla) assorbita dal banco SC. (scala correnti 20/div; scala tensioni 10V/div; scala tempo 20s/div)**

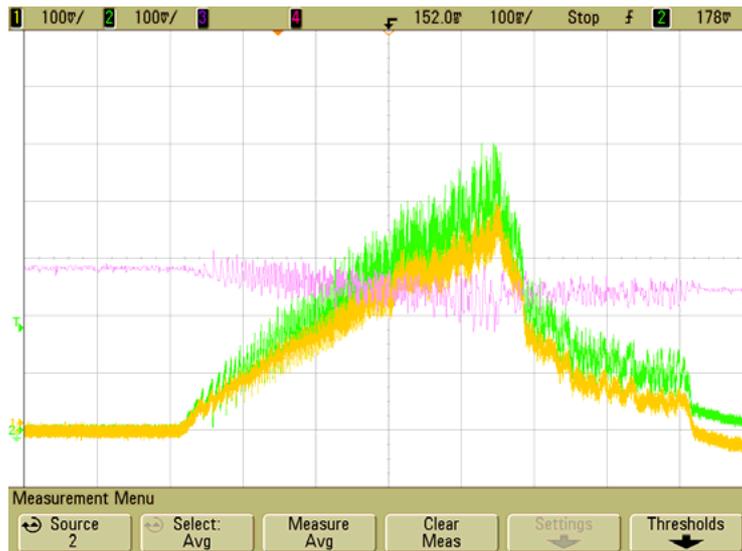
Il funzionamento del sistema di accumulo misto con carico applicato è stato verificato applicando al sistema dapprima un carico resistivo e successivamente un carico dinamico. La figura 6.2.10 seguente si riferisce all'inserimento e al disinserimento a gradino di un carico resistivo di circa 20A. Sono riportate la corrente di carico (traccia gialla), la corrente di uscita dal convertitore (traccia verde) e la corrente erogata dalla batteria (traccia rosa). I profili ottenuti per le correnti del sistema sono quelli attesi. Si osservi che l'applicazione a gradino di una corrente di carico è un test molto impegnativo per un sistema di accumulo misto impiegato in applicazioni veicolistiche, perché le dinamiche meccaniche e quindi le richieste di corrente da parte del sistema di trazione sono più lente. Peraltro, il risultato del test mostra la capacità del sistema di comandare il convertitore DC-DC in modo che il banco di supercondensatori fornisca/assorba le correnti impulsive richieste dal sistema di trazione evitandone la circolazione in batteria.



**Fig. 6.2.10) Inserimento e disinserimento di un carico resistivo (scala correnti 5A/div; scala tempo 2s/div)**

Il test che segue ha lo scopo di verificare il funzionamento del sistema di accumulo misto quando sia connesso ad un carico dinamico in questo caso rappresentato dal transitorio di avviamento di un azionamento con motore sincrono di tipo brushless DC alimentato per mezzo di un inverter. Questo tipo di prova è più realistica della precedente ed è quindi indicativa del funzionamento del sistema nelle normali condizioni operative.

I tracciati di Fig. 6.2.11 (corrente assorbita dall'inverter, traccia verde; corrente fornita dal banco di supercondensatori, traccia arancione; corrente di batteria, traccia rosa) mostrano che il carico è sostenuto in massima parte dal banco di supercondensatori mentre l'intervento della batteria è minimo e si prolunga oltre il transitorio per effettuare la ricarica del banco SC.



**Fig. 6.2.11) Correnti erogate dal banco SC (traccia arancione) e dalla batteria (traccia rosa) e corrente assorbita dall’inverter (traccia verde) che alimenta un motore brushless DC durante un transitorio di avviamento (scala correnti 10A/div; scala tempo 100ms/div)**

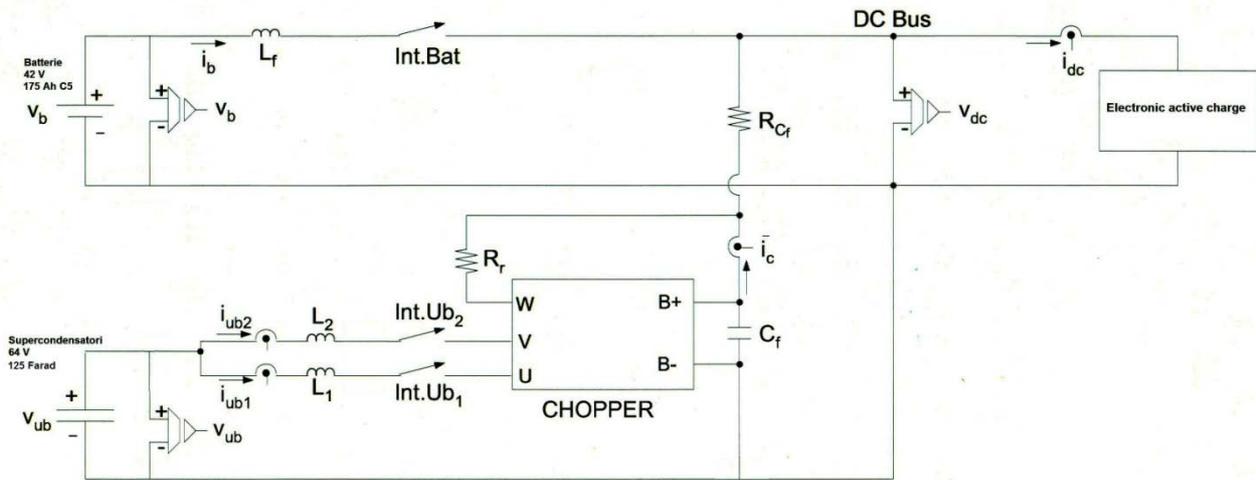
Si osserva che le oscillazioni della corrente assorbita dall’azionamento sono dovute al filtraggio non ottimale eseguito dal condensatore nel lato in continua dell’azionamento stesso, non sono quindi introdotte da funzionamenti irregolari del convertitore. Dalla figura 6.2.11 si nota ancora come tali oscillazioni scompaiano con l’esclusione del motore, ed il convertitore effettua l’operazione di ricarica del banco di supercondensatori in assenza di ripple.

Altre verifiche sono state effettuate, con esito positivo, relativamente al funzionamento del resistore di frenatura ed al funzionamento del convertitore secondo i regimi di corrente erogata, ovvero accettata, dal modulo SC durante l’esecuzione dei cicli cinematici di riferimento per il Progetto del sistema di accumulo misto. In tutte le condizioni corrispondenti a fasi di accelerazione e di decelerazione del veicolo le batterie non risultano sollecitate, così come desiderato, mentre il carico viene sostenuto dal modulo SC che segue la dinamica dei transitori.

## 7. Prove di collaudo del sistema

Si riportano le prove di funzionalità del sistema eseguite presso la stazione di prova ENEA alla Casaccia. Viene effettuato il confronto delle prestazioni di un pacco di batterie in erogazione su ciclatore, tra allestimento “Solo batterie” e allestimento “Con convertitore”. Quest’ultimo è inteso come test del pacco batterie coadiuvato dai supercondensatori gestiti dal convertitore dell’Università di Padova. Si vuole valutare il beneficio ottenuto dall’impiego dei supercondensatori e del relativo convertitore.

Si riporta lo schema del cablaggio.



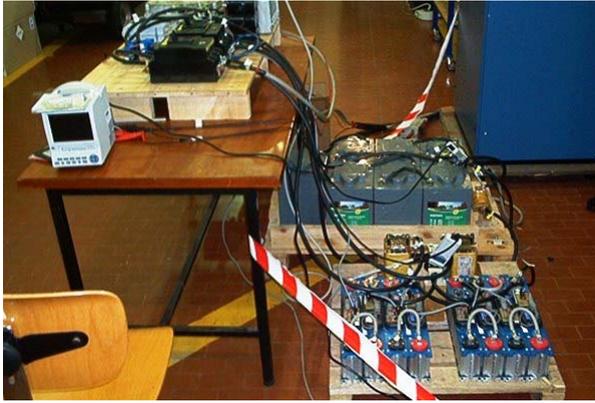
## 7.1 Allestimento del sistema

Il sistema di accumulo è stato installato presso la sala prove batterie di Enea Casaccia. Il pacco delle batterie, per una precedente avaria su un modulo, si è ridotto a n° 7 elementi da 6 V nominali. L'utenza finale sulla quale fare agire il sistema è stato uno dei ciclatori di cui è fornita la sala. Il ciclatore, essendo una macchina reversibile, funziona sia da carico che da alimentatore per il sistema. Lo smaltimento dell'energia è per questo tipo di apparati garantito dalla costante connessione alla rete elettrica pubblica.

Il chopper, nato per sistemi trifasi, è stato vantaggiosamente sfruttato con la disposizione in due rami dei condensatori. Un ramo è stato dedicato alla resistenza di frenatura di emergenza (dissipazione della energia della frenata a recupero nel caso in cui il sistema non sia in grado di accettare ulteriore carica). Questa funzione non è stata provata. Entrambi i rami, batterie e condensatori, sono protetti con fusibili da 160 A.

Al sistema sono stati applicati sensori di corrente e tensione sia nel ramo batterie che in quello condensatori; i segnali sono stati convogliati a un oscilloscopio o un acquisitore per effettuare le dovute misure.

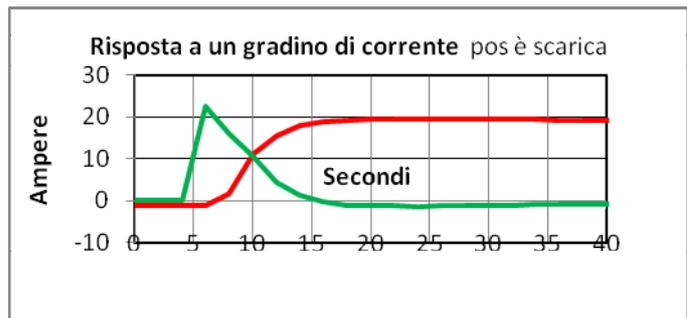
Si riportano le immagini dell'allestimento di prova e il dettaglio dell'elettronica di controllo.



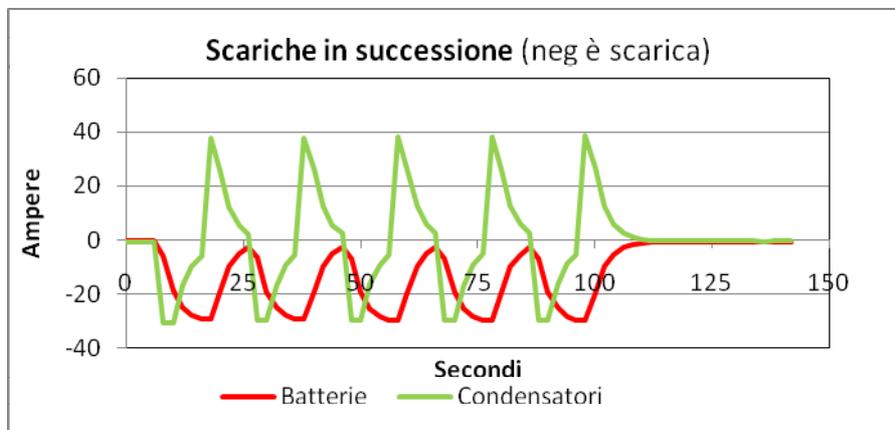
Al momento dell'allestimento sono state eseguite alcune prove per accertarsi della funzionalità di tutti i componenti. Le prove hanno avuto lo scopo di evidenziare l'intervento dei condensatori in presenza di una o più richieste di corrente a gradino.

La prima prova, di cui si riporta il grafico delle correnti, è relativa ad una semplice richiesta di corrente improvvisa da parte del carico (utenza) di 20 A per un intervallo di tempo relativamente lungo: 30 secondi.

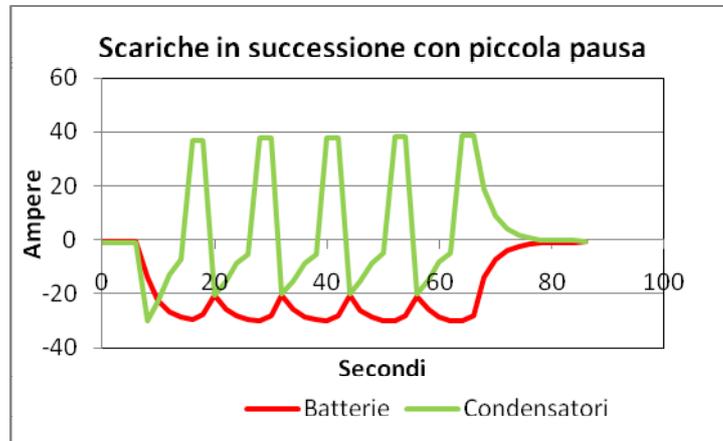
Nei limiti della precisione delle attrezzature si evidenzia la risposta rapida dei condensatori alla richiesta e il perdurare dell'azione utile per circa 10 - 12 secondi.



Al fine di constatare la capacità di erogazione e di ricarica dei condensatori sono state effettuate due prove di scarica su richiesta di n. 5 gradini di corrente in successione. Si riporta la prima, consistente in gradini di 30 A di 10 secondi intercalati a pause di pari durata. Si nota la perfetta ripetizione del comportamento dei condensatori.

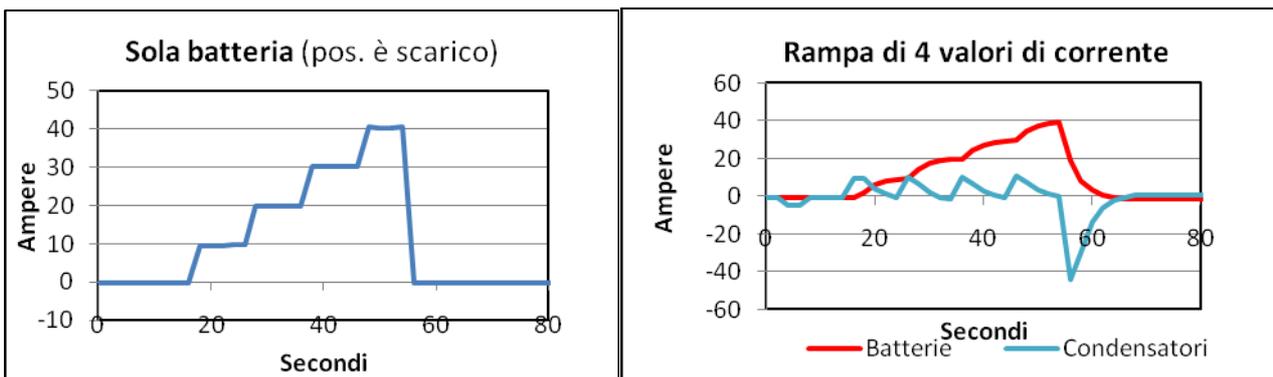


La seconda è sempre una prova a gradini di 30 A ma in rapida successione, ovvero con 10 secondi di scarica e 2 secondi di pausa. I condensatori in questa circostanza non sono in grado di replicare il primo ciclo e si assesta su una scarica meno impegnativa per i cicli successivi al primo.

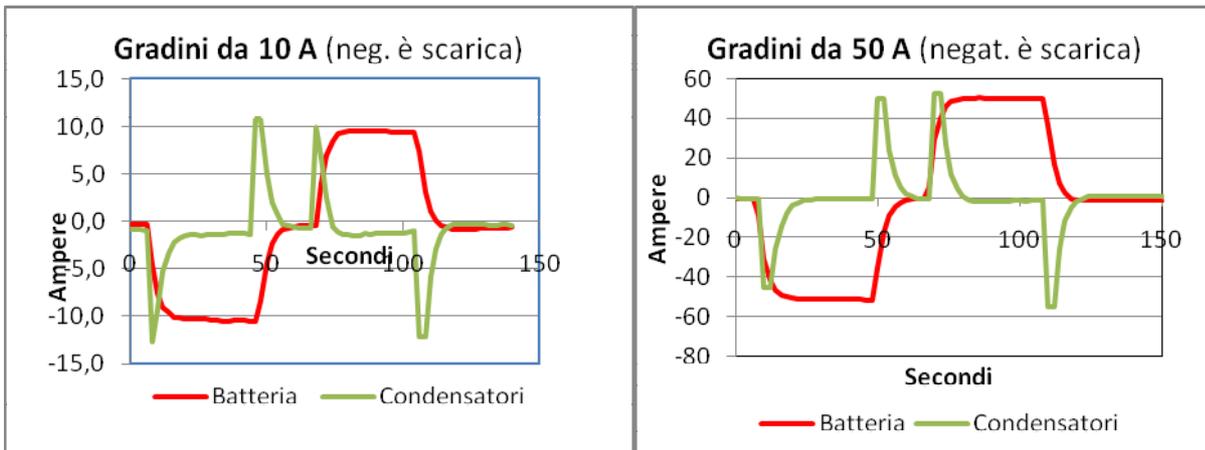


Per evidenziare il comportamento dei condensatori in condizioni di mancata ricarica è stato eseguita una scarica a rampa con correnti crescenti e pari a 10, 20, 30 e 40 A.

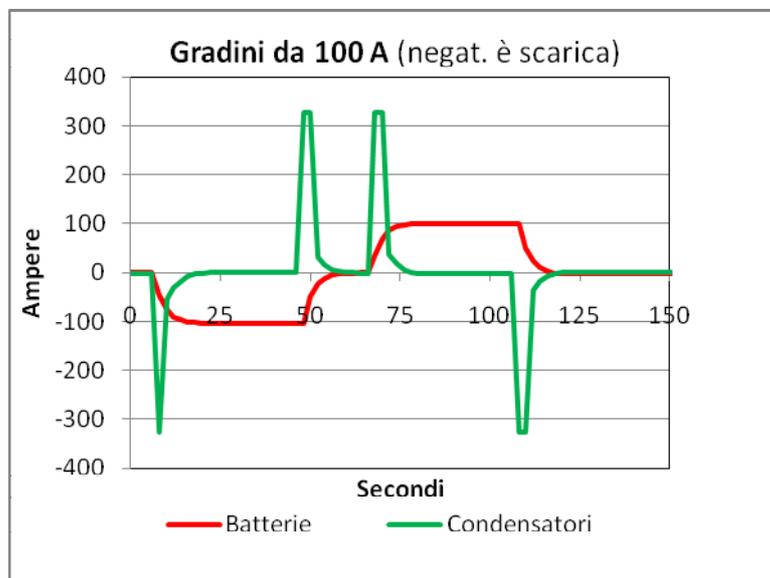
Il comportamento del sistema con sole batterie (condensatori esclusi) è, come è ovvio, a gradini come riportato nel grafico di sinistra. La ripetizione della prova con l’inserimento dei condensatori ha dato luogo al grafico riportato a destra, in cui è evidente che esiste comunque una funzionalità dei condensatori che riescono in parte a ricaricarsi nella parte finale del gradino – di 10 secondi – e comunque si ricaricano completamente a discapito della batteria al termine dell’applicazione del carico. L’effetto di smussamento dei gradini a carico delle batterie è comunque presente.



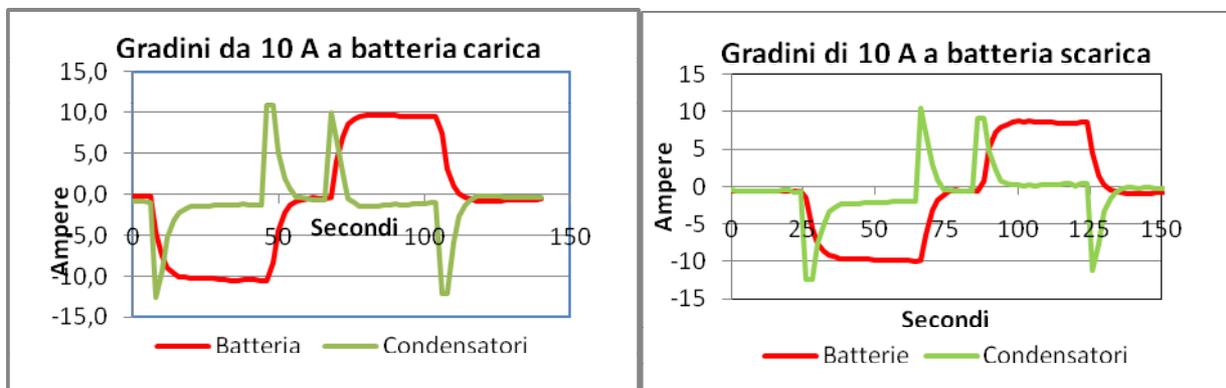
E’ stato indagato brevemente il comportamento del sistema in presenza di richieste a gradini di corrente ma di intensità crescente. Sono stati trovati i comportamenti sotto riportati. Amperaggi fino a 50 A non mostrano significative differenze di comportamento.



Al contrario una richiesta di 100 A mostra una più intensa partecipazione dei condensatori al transitorio.



Nessuna variazione di comportamento sembra essere dovuta allo stato di carica della batteria e quindi alla sua resistenza interna.



## 7.2 Prove preliminari.

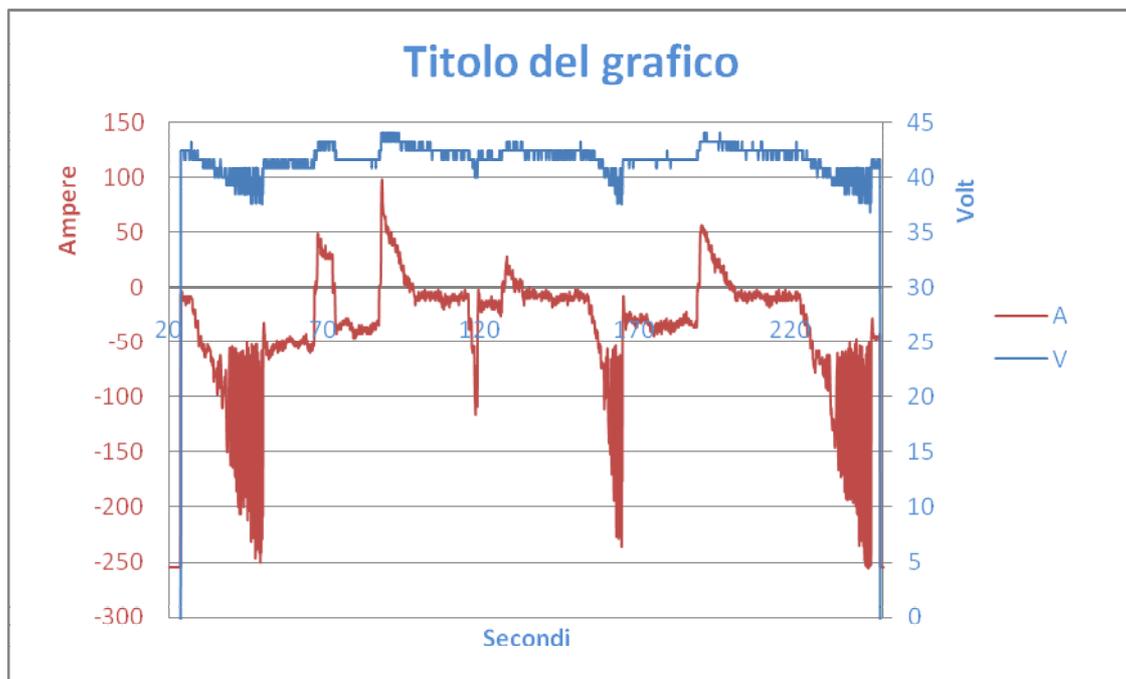
E' stata eseguita una ripetizione del ciclo ECE così come preparato dall'ing. Pucetti e indicato come profilo 183 sul computer del ciclatore.

Le prime prove hanno mostrato una diversa tensione minima sopportabile dai componenti, in particolare il convertitore cessava di funzionare in un campo di variabilità tra 36,5 V e 34,6 V mentre il ciclatore, sebbene settato per una tensione minima di 35,7V, in effetti scendeva fino a circa 33 V. Ciò poneva un problema di identificazione della condizione di fine prova.

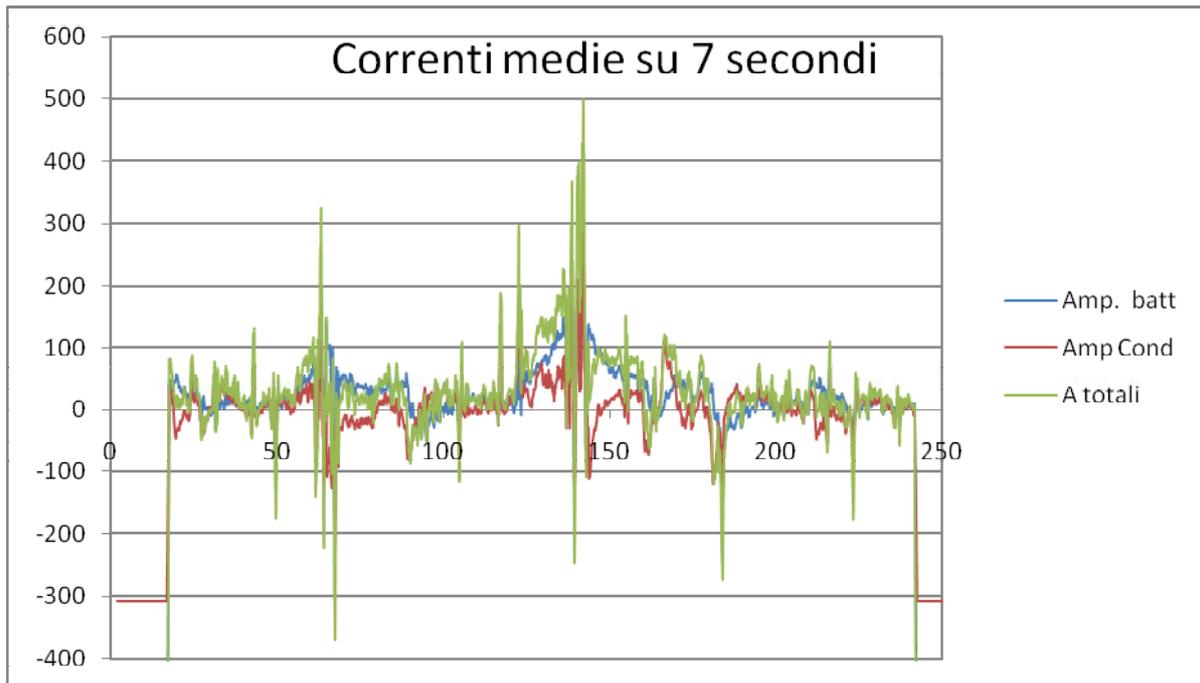
Il collega ing. Bertoluzzo ha suggerito e fornito le indicazioni per abbassare la tensione minima del microprocessore, ma si è preferito non manomettere il programma e fissare a posteriori in criterio di fine prova. Si è operato elaborando i soli dati ricadenti, per le due prove da comparare, nello stesso range di tensione.

Un esempio di ciclo con sole batterie è il seguente (correnti negative = erogazione delle batterie).

Si tenga presente che le caratteristiche intrinseche del ciclatore producono correnti continue alterate da componenti alternate che possono raggiungere il 50% del valore della continua.

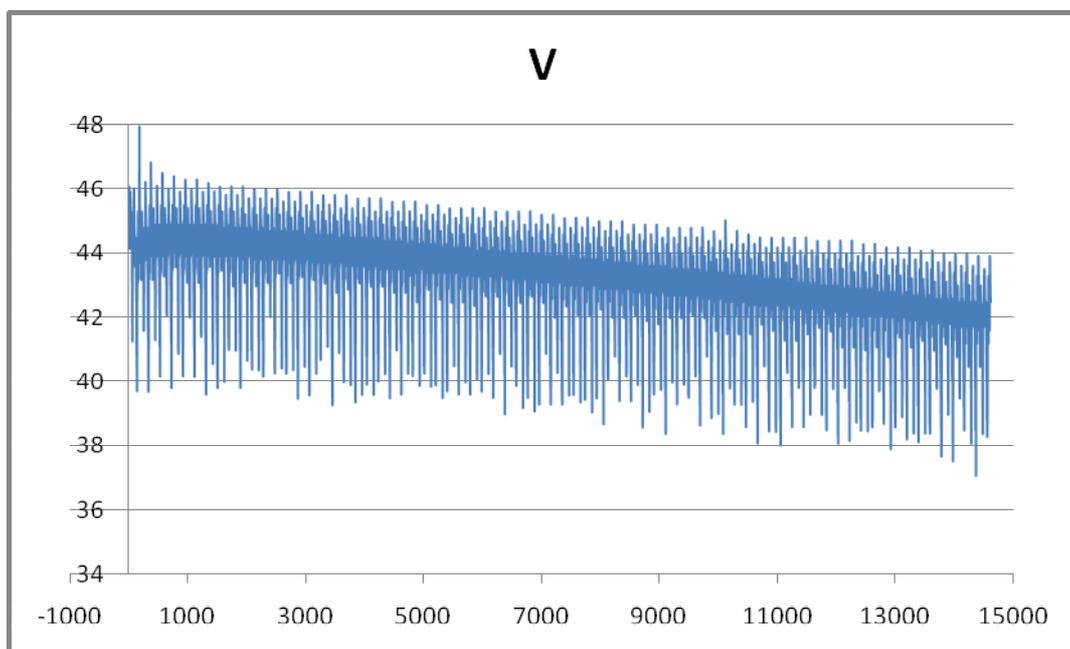


L'inserimento del convertitore – e dei condensatori – produce sicuramente l'effetto voluto di spostamento delle correnti dalle batterie ai condensatori nelle fasi di veloce dinamica. Nel grafico sono stati graficati i dati di corrente mediante con media mobile su 7 secondi al fine di ridurre le fluttuazioni.



### 7.3 Prove di autonomia

Ripetizione del ciclo ECE fino al raggiungimento della tensione minima di fine prova. Per esigenze pratiche di riduzione della grandezza del file di uscita si è preferito eseguire in rapida successione prima una serie di n. 75 cicli ECE e registrarli su un file con nome codificato come aammggP1,ACQ; subito dopo si continua la prova con un secondo file di acquisizione dal nome aammggP2.ACQ. Si riporta un esempio dei primi 75 cicli eseguiti con le sole batterie al fine di evidenziare il progressivo calo della tensione.



I risultati delle prove di autonomia sono i seguenti:

Autonomia **solo batterie**:

Tensione di fine prova  $V=34,8$  (per uniformità con le prove con convertitore).

File xxxP1: 75 cicli; 4,96 kWh; 118,40 Ah scaricati

File xxxP2: 25 cicli; 1,63 kWh; 41,06 Ah scaricati

TOTALE : 100 cicli; 6,59 kWh; 159,46 Ah scaricati.

Autonomia **con convertitore**:

Tensione di fine prova  $V=34,6$  (per avvenuto distacco del microprocessore).

File xxxP1: 75 cicli; 4,92 kWh; 116,54 Ah scaricati

File xxxP2: 27 cicli; 1,75 kWh; 44,14 Ah scaricati

TOTALE : 102 cicli; 6,67 kWh; 160,69 Ah scaricati.

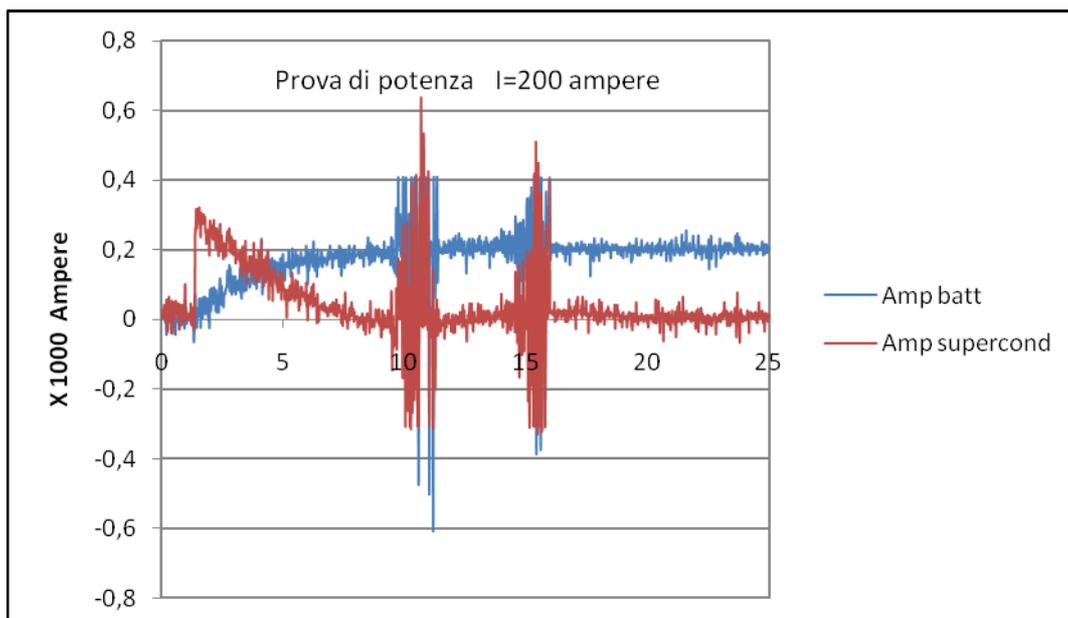
#### 7.4 Prove di potenza

Le prove di potenza secondo le procedure EUCAR sono state giudicate dagli autori delle prove non opportune in quanto richiedono la scarica violenta fino al limite minimo di tensione dichiarato dal costruttore. Per ogni risultato di potenza occorrerebbe eseguire almeno due scariche con amperaggi diversi e quindi con durate diverse, al fine di trovare per interpolazione il valore di amperaggio che garantisca la durata 30 secondi come prescrive la norma. Parimenti la prova di peak power non è stata ritenuta fattibile per gli elevati amperaggi richiesti e per l'imprecisione di misura sulla base temporale dei 5 secondi richiesta.

Il confronto delle prestazioni in potenza tra l'allestimento "sole batterie" e "con convertitore" è stato eseguito sulla base della seguente procedura:

Impostazione di  $I=200$  A come corrente di scarica. Impostazione contemporanea di  $T=30$  sec come durata della scarica. Acquisizione dei dati, in particolare del calo di tensione. Calcolo del  $\Delta V$  e della potenza media tenuta nei 30 secondi.

Si riporta un esempio di scarica intensa con convertitore – e condensatori - inserito, in cui si vede la ripartizione della corrente tra batteria e condensatori.



Le prove di potenza hanno prodotto i risultati seguenti:

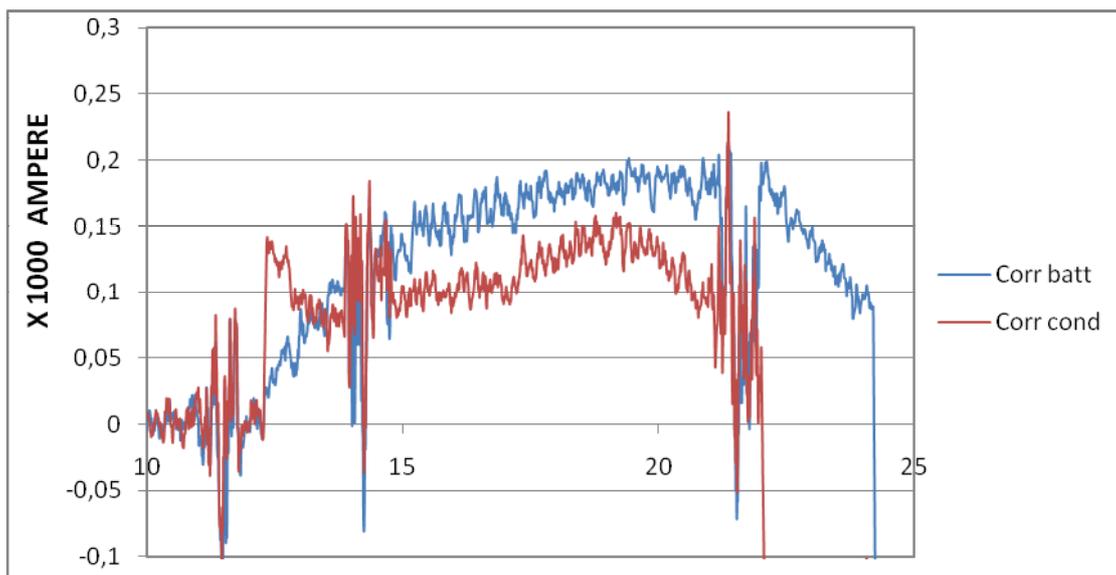
SOC	SOLE BATTERIE			CON CONVERTITORE			MIGLIORAMENTO %
	$\Delta V$	$V_{finale}$	Potenza W	$\Delta V$	$V_{finale}$	Potenza W	
100%	5,9	40,5	7870	5,3	40,4	7895	0.3
80%	4,9	40,1	7994	5,5	40,1	8156	2.0
60%	4,7	39,5	7623	5,3	39,4	8410	10.3
40%	4,8	38,6	7447	5,0	38,6	7668	3.0
20%	5,3	37,0	7094	5,5	37,0	7209	1.6
10%	8,6	33,1	6479	7,9	34,0	6924	6.9

### 7.5 Ulteriori prove di potenza

Sulla base della constatazione del fatto che i supercondensatori esauriscono la loro partecipazione ai processi di erogazione nell'arco dei primi 10 secondi circa si è pensato di effettuare alcune prove di durata inferiore ai 30 secondi, tempo usato nelle precedenti prove.

Le prove ulteriori sono state tenute con una corrente di 250 A. Sono state poi ripetute con corrente di intensità 200 A. Si considerano più attendibili queste ultime, che si riportano. E' stato impiegato un diverso ciclatore, data l'indisponibilità di quello precedentemente usato.

Si riporta un esempio di scarica su 10 secondi che evidenzia il contributo dei condensatori.



La procedura è stata la seguente:

- 1 - Preparazione del pacco batterie portandolo a un SOC=30 % (batteria quasi scarica per meglio evidenziare gli effetti dei condensatori).
- 2 - Allestimento "con convertitore", scarica di 5 secondi a 200 A.
- 3 - Ricarica per 40 secondi a 100 A.
- 4 - Allestimento "con convertitore", scarica di 10 secondi a 200 A.
- 5 - Ricarica per 40 secondi a 100 A.
- 6 - Allestimento "con convertitore", scarica di 20 secondi a 200 A.
- 7 - Ricarica per 40 secondi a 100 A.
- 8 - Allestimento "sole batterie", scarica di 5 secondi a 200 A.
- 9 - Ricarica per 40 secondi a 100 A.
- 10 - Allestimento "sole batterie", scarica di 10 secondi a 200 A.
- 11 - Ricarica per 40 secondi a 100 A.
- 12 - Allestimento "sole batterie", scarica di 20 secondi a 200 A.
- 13 - Ricarica per 40 secondi a 100 A.

I risultati di queste prove sono i seguenti:

Durata sec.	Corrente A	Potenza W Solo batterie	Potenza W Con convertitore	Miglioramento %
5	200	7752	7957	2,6
10	200	7782	7867	1,1
20	200	7749	7763	0,2

## **7.6 Considerazioni sulla sperimentazione**

Il sistema tenuto in prova ha dimostrato di corrispondere alle aspettative di progetto, e in particolare:

- 1) La funzionalità del sistema è stata sempre assicurata. Le uniche failures sono avvenute per la non perfetta impostazione del limite minimo di tensione governabile, parametro comunque facilmente aggiustabile.
- 2) E' stata verificata la funzione di "soccorso" alle batterie nelle fasi di improvvisa presa e rilascio di carico. In tali circostanza a forte dinamica richiesta viene soddisfatta quasi interamente dai condensatori.
- 3) Come conseguenza di quanto sopra si ottiene il risultato utile di addolcire il modo di lavorare della batteria, che è il principale obiettivo del sistema. Le correnti di batteria non vengono però "spianate" completamente, e di conseguenza i risultati previsti in termini di miglioramento dell'autonomia del veicolo, in base alle prove preliminari sulle batterie (vedi questo stesso rapporto) non possono essere raggiunti
- 4) Il contenuto energetico dei condensatori è piuttosto basso, e ciò implica un tempo di azione che nei casi pratici è sotto i 10 secondi. Tale valore però ben si adatta alle dinamiche di potenza dell'uso veicolistico, per esempio nel caso dell'effettuazione di un sorpasso.
- 5) Non si è prodotto, se non in minima parte, l'auspicato aumento di autonomia di percorrenza. Questo è sicuramente dovuto alle differenze esistenti tra una prova su strada (vedi le esperienze citate all'inizio sulla vettura Spazia) e la riproduzione dei carichi con il ciclatore, al mancato spianamento completo del carico sulle batterie, al sovradimensionamento delle batterie stesse, in grado da solo di effettuare agevolmente il recupero in frenata, perché accettano senza problemi le correnti massime impostate in ricarica.

## **8. Divulgazione dei risultati delle attività**

L'attività in corso tra ENEA e Università di Padova è stata presentata preliminarmente alla Formula ATA EHI 2010 e verrà presentata, in forma estesa, in quella dell'anno corrente. E' anche oggetto della pubblicazione segnalata in bibliografia [12].

## **9. Conclusioni e sviluppi successivi**

Il sistema di accumulo misto soddisfa le specifiche di progetto descritte nella Fase 1 ed è quindi in grado di ridurre in modo sostanziale le sollecitazioni di corrente nella batteria, sia considerando le singole modalità di prova effettuate che in riferimento allo svolgimento del ciclo ECE15 da parte della microcar considerata

Tra i risultati attesi dall'introduzione dell'accumulo misto, quello fondamentale non è tanto il miglioramento delle prestazioni quanto l'aumento di vita delle batterie, con conseguente riduzione dei costi. Questo tema è stato affrontato nello studio parallelo del Politecnico di Milano. I risultati ottenuti sono sintetizzati nella tabella che segue, relativa a due dimensionamenti possibili per un accumulo elettrico misto per una micro vettura (10 kWh di contenuto energetico), e per confronto lo stesso accumulo senza SC.

Ipotizzando una durata del veicolo pari a 70000 km, in tabella sono confrontati i tre casi:

Taglia super-condensatori	Costo super-condensatori €	Aumento km percorsi $\Delta y$ km	Totale km percorsi con un pacco batterie $(y_1 + \Delta y)$ km	Sostituzioni pacco batterie in 70000 km	Costo totale batterie in 70000 km €	Costo totale sistema di accumulo €	Costo chilometrico totale €/km
40 Wh - 7 kW	1900	9600	21600	3	6000	7900	0.11
100 Wh - 11 kW	4100	17400	29400	2.4	4800	8900	0.13
Solo pacco batterie 10 kWh (€ 2000)				5.8	11600		0.17

## 10. Bibliografia

- [1] D. Doerffel and S.A. Sharkh, "A critical review of using the Peukert equation for determining the remaining capacity of lead-acid and lithium-ion batteries", *Journal of Power Sources*, vol. 155, n° 2, pp. 395-400, April 2006.
- [2] Y.H. Sun, H.L. Jou, J.C. Wu, "Multilevel Peukert equations based residual capacity estimation method for lead-acid battery", *Proc. of International Conference on Sustainable Energy Technologies*, 2008, pp.101-105.
- [3] F.G. Capponi, P. Santoro and E. Crescenzi, "HBCS converter: a bidirectional DC/DC converter for optimal power flow regulation in supercapacitor applications", *Proc. of IEEE Industry Application Conference*, 2007, pp. 2009-2015.
- [4] S. Barsali and M. Ceraolo, "Dynamical Models of Lead-Acid Batteries: Implementation Issues", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 17, n. 1, pp. 16-23, March 2002.
- [5] L. Gao, Member, R.A. Dougal, and S. Liu, "Power Enhancement of an Actively Controlled Battery/Ultracapacitor Hybrid", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 20, n. 1, pp. 236-243, January 2005.
- [6] C. Romaus, J. Bocker, K. Witting, A. Seifried, and O. Znamenshchikov, "Optimal energy management for a hybrid energy storage system combining batteries and double layer capacitors", *Proc. of Energy Conversion Congress and Exposition*, 2009, pp. 1640-1647.
- [8] Y.H. Sun, H.L. Jou and J.C. Wu, "Multilevel Peukert Equations Based Residual Capacity Estimation Method", *Proc. of ICSET*, 2008, pp. 101-105.
- [9] M. Ceraolo, "New dynamical models of lead-acid batteries", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 15, n. 4, pp. 1184-1190, 2000.
- [10] H. He, R. Xiong and J. Fan, "Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach", *Energies*, n. 4, pp. 583-598, 2011.
- [11] A. Jossen, "Fundamentals of battery dynamics", *Journal of Power Sources*, n. 154, pp. 530-538, 2006
- [12] Manuele Bertoluzzo<sup>1</sup>, Giuseppe Buja<sup>2</sup>, Giovanni Pede and Angelo Puccetti "Hybrid battery-supercapacitor storage system for electric city cars" *EEVC Brussels, Belgium*, October 26-28, 2011

