



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



Ministero della Transizione Ecologica



Ricerca di Sistema elettrico

Testing del sistema di bordo per ospitare il nuovo sistema di accumulo e di trasferimento dell'energia

Adriano Alessandrini, Luca Pugi, Lorenzo Berzi,
Tommaso Favilli



Report RdS/PTR2021/210

TESTING DEL SISTEMA DI BORDO PER OSPITARE IL NUOVO SISTEMA DI ACCUMULO E DI TRASFERIMENTO DELL'ENERGIA

Adriano Alessandrini (Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale di Firenze DICEA)

Luca Pugi (Dipartimento di Ingegneria Industriale di Firenze DIEF)

Lorenzo Berzi (Dipartimento di Ingegneria Industriale di Firenze DIEF)

Tommaso Favilli (Dipartimento di Ingegneria Industriale di Firenze DIEF)

Novembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Obiettivo: Tecnologie

Progetto: Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

Work package: Mobilità

Linea di attività: *(titolo completo)*

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *«Installazione e testing di un sistema di accumulo innovativo su un prototipo di bus elettrico»*

Responsabile scientifico ENEA: Fernando Ortenzi

Responsabile scientifico DICEA : Adriano Alessandrini

Indice

SOMMARIO.....	5
1 INTRODUZIONE	6
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	7
1.1 SPECIFICHE E REQUISITI DEL SISTEMA.....	7
1.1.1 <i>Veicolo di riferimento: Tecnobus Gulliver</i>	7
1.1.2 <i>Batteria Li-ion XBW Mechatronics</i>	9
1.1.3 <i>Convertitori DC-DC Zekalabs</i>	9
1.2 BANCO PROVA PER CARATTERIZZAZIONE DEI CONVERTITORI	12
1.2.1 <i>Layout e componenti del banco prova</i>	12
1.2.2 <i>Test 1: Alimentazione lato LV</i>	14
2 ALLOGGIAMENTO DELL’IMPIANTO SUL VEICOLO	17
3 VERIFICA DEL SISTEMA IN CONDIZIONI REALI.....	19
3.1 ESECUZIONE COLLAUDI IN AMBIENTE CONTROLLATO	19
3.1.1 <i>Test della batteria e del controllo con ciclatore ad alta tensione</i>	20
3.1.2 <i>Test della batteria e del controllo con ciclatore a bassa tensione</i>	21
3.2 ESECUZIONE COLLAUDI IN AMBIENTE REALE	23
3.3 ADEGUAMENTO DEL SISTEMA DI CONTROLLO	26
4 CONCLUSIONI.....	27
5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	28

Sommario

Il presente documento rappresenta il secondo report annuale relativo a progettazione, prototipazione e testing di sistemi innovativi per la ricarica rapida di veicoli di trasporto urbano elettrici. Questo lavoro è sviluppato tramite un'attività congiunta che coinvolge l'Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile (ENEA), l'Università di Firenze (UNIFI) (coi dipartimenti di Ingegneria Civile (DICEA) e di Ingegneria Industriale (DIEF)) ed il Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi Roma 3.

Oggetto della sperimentazione è la realizzazione di un prototipo di sistema di trazione elettrico e relativo sistema di ricarica alle fermate prototipato ed installato su un minibus Tecnobus Gulliver che si ricarica ai capolinea entrando in contatto col sistema di accumulo di terra tramite pantografo. Il progetto è realizzato in modo da poter in futuro sostituire il pantografo statico (funzionante solo con veicolo fermo) con un accoppiamento dinamico fatto con doppio pattino strisciante su catenaria (conduttore in tensione) e "terza" rotaia annegata nell'asfalto (conduttore a terra).

Il presente documento descrive le attività di testing realizzate sul sistema, oggetto della progettazione e sperimentazione con particolare riferimento a sistemi di bordo e storage a bordo del veicolo.

L'impianto viene realizzato e sperimentato sfruttando una caratteristica del veicolo benchmark che è stata già ampiamente utilizzata in passato da ENEA ed UNIFI per accelerare lo sviluppo e la sperimentazione dei sistemi: il veicolo presenta un vano batterie con cassoni estraibili, originariamente progettato per una facile manipolabilità dei pacchi di batterie al piombo, originariamente molto ingombranti e molto pesanti.

Questa soluzione ingegneristica del veicolo è stata sfruttata per realizzare un quadro elettrico modulare alloggiato all'interno dei cassoni (opportunamente elaborati e modificati) che può essere assemblato separatamente dall'autobus, installato molto rapidamente sullo stesso e successivamente ispezionato con grande facilità perché l'intero impianto è facilmente removibile intervenendo su poche connessioni elettriche al restante impianto dell'autobus (sostanzialmente conforme all'originale) ed estraendo con semplici attrezzature (transpallet) il quadro elettrico con le medesime semplici procedure ed attrezzature originariamente previste dal progettista per ricarica/sostituzione/manutenzione dell'originale pacco di batterie al piombo.

Anche il programma di prove proposto sfrutta questa possibilità in modo massiccio prevedendo sostanzialmente tre fasi:

Il programma di prova si articola in tre fasi successive:

- Verifica di connessioni e funzionalità del sistema presso i laboratori UNIFI: si verificano le funzionalità elementari, le connessioni elettriche e le principali caratteristiche del quadro elettrico realizzato; queste attività preliminari svolte in accordo a buone pratiche tecniche non sono documentate in questo report se non in termini di avvenuta esecuzione e quindi di coerenza del prodotto consegnato in ENEA con le originali specifiche di sistema UNIFI
- Prove HIL (Hardware In the Loop): il sistema viene trasportato in ENEA ed accoppiato ai ciclatori/simulatori di carico presenti nei laboratori nel centro ENEA di Casaccia e sottoposto ad una serie di prove in cui si verifica la corretta funzionalità sotto carico del sistema riproducendo condizioni di prova del tutto verosimili rispetto a quelle reali.
- Prove su veicolo e/o quadro collegato alla infrastruttura di ricarica.

1 Introduzione

Il presente report descrive le attività svolte dal team dell'Università di Firenze, tramite collaborazione tra il Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIEF) e il Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale (DICEA), relativamente al testing del sistema di accumulo a bordo dei veicoli progettato e costruito nella precedente annualità.

Questo lavoro rappresenta attività di supporto rispetto all'obiettivo di sperimentazione di un sistema di ricarica rapida per minibus elettrici, equipaggiati con batterie ad elevata potenza specifica, tramite connessione a pantografo alla stazione posta al capolinea. L'infrastruttura di ricarica è provvista accumulatore inerziale a volano [1], utile per realizzare uno stadio di accumulo intermedio volto a ridurre richieste di potenza elevate direttamente dalla rete elettrica.

Gli obiettivi sono rivolti al testing del sistema di conversione potenza elettrica DC tra lato alta tensione (sistema di accumulo a batteria) e bassa tensione (sistema di trazione elettrico), sia dal punto di vista tecnologico/funzionale, che da quello prestazionale ed energetico. Il prototipo è il veicolo Gulliver, sviluppato dalla Tecnobus, opportunamente modificato per i propositi della sperimentazione. Il veicolo di riferimento era stato oggetto di sperimentazioni passate, sempre relative al retrofitting del bus [1]-[14].

Inizialmente vengono brevemente riassunte le specifiche di progetto del sistema, oggetto del precedente report "Progettazione del sistema di bordo per ospitare il nuovo sistema di accumulo e di trasferimento dell'energia" [15].

Il precedente lavoro è stato anche oggetto di pubblicazione su conferenza internazionale IEEEIC2021 [16], che aveva come oggetto principale la modellazione del bus ai fini della validazione delle specifiche di potenza ed energetiche del sistema.

I convertitori di potenza e relativi sistemi ausiliari sono stati alloggiati all'interno del semi-vano designato. L'unità di controllo, l'alimentatore a 24V, il sistema di feedback del pantografo e i convertitori a 12V sono stati disposti su diverse scatole per garantire separazione galvanica e meccanica tra componenti costruttivamente e funzionalmente differenti. Il controllore Mini-PLC Barth è stato programmato per gestire le fasi di scarica e carica della batteria che avvengono sulla linea a 72 del sistema di trazione, durante le fasi di accelerazione e frenatura rigenerativa. È dunque necessario uno stadio di conversione tra motore elettrico e sistema di accumulo, che presenta una tensione nominale nettamente superiore intorno ai 350V. Lo stesso controllore deve essere in grado di gestire anche la ricarica ad alta potenza realizzata direttamente sul bus DC della batteria mediante connessione a pantografo. Lo stesso deve permettere la gestione delle fasi di salita e discesa del pantografo sulla calotta di ricarica mediante pulsanti attuati dagli operatori. Deve inoltre essere in grado di gestire situazioni pericolose e di emergenza garantendo la sicurezza ed affidabilità del sistema (per esempio, distacco di emergenza dal pantografo).

Test di validazione preliminari sono stati eseguiti nei laboratori di ENEA a Roma Casaccia, mediante l'ausilio di un ciclatore che permette di applicare carichi di potenza noti al livello di tensione desiderato, collegandosi direttamente sul bus DC della batteria o sulla linea LV a 72V. In questo ultimo caso sarà il sistema di conversione potenza progettato a gestire il flusso di potenza da e verso l'accumulatore.

Il relativo sistema di comunicazione, con protocollo CAN Open, e le procedure di messa in sicurezza sono stati implementati con l'intento di predisporre il sistema di conversione all'integrazione nel veicolo di riferimento. La campagna di prove eseguite è rivolta a valutare l'adeguatezza del sistema proposto con le specifiche operative del veicolo, in termini di potenza e tempi di risposta.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

Gli aspetti prestazionali e di ingombro sono stati verificati in una fase preliminare [15], antecedente all'installazione del sistema convertitore, per evitare di operare con un sistema non adeguato per specifiche ed ingombri. La verifica degli aspetti logistici ed affidabilistici/funzionali invece sono oggetto del secondo report, che ha previsto attività di modellazione 3d avanzate tramite software CAD, per verificare gli ingombri; installazione e montaggio dei componenti nel vano, con relative procedure di montaggio, messa in opera e dismissione; sperimentazione preliminare, per verificare una corretta integrazione con i sistemi ausiliari previsti e la compatibilità con il batteria, ricarica a pantografo e sistema di trazione del bus.

Il presente report è così articolato: il sotto-capitolo 2.1 riporta le caratteristiche del caso studio e le specifiche tecniche del sistema da progettare. I convertitori scelti sono descritti nella sezione 2.2, così come le specifiche della batteria. I sottosistemi ausiliari ai convertitori di potenza sono mostrati nella sezione 2.3. I modelli CAD sono nella sezione 2.4. Le procedure di montaggio/smontaggio e collegamento/disconnessione sono elencate nella sezione 2.5, sotto forma di checklist, da considerarsi come supporto all'installazione, messa in opera e dismissione del sistema di conversione. La sezione 2.5 descrive il banco prova realizzato per il testing dei convertitori DC-DC e le relative procedure. Conclusi e sviluppi futuri sono nel capitolo 3.

1.1 Specifiche e Requisiti del sistema

In questa sezione vengono brevemente riportate le caratteristiche di progettazione del sistema di conversione potenza in corrente continua relative al caso studio in oggetto [3],[5],[6],[10],[11],[14].

Il progetto prevede la sperimentazione di un sistema di ricarica rapida [2],[4],[7],[9],[12],[13] per veicoli di trasporto pubblico urbano a trazione elettrica. L'attività descritta in questa report è rivolta alla progettazione esecutiva di un sistema di conversione bidirezionale dell'energia elettrica (da alta tensione a bassa tensione e viceversa) e relativa batteria, da installarsi a bordo del veicolo; inoltre, è prevista la realizzazione e messa in servizio di un accumulatore di energia posizionato in corrispondenza del capolinea e/o delle fermate previste dal percorso dell'autobus, in cui realizzare la colonnina per la ricarica rapida. Nella fattispecie, è stato preso in considerazione un impianto con accumulatore a volano, che prevede un ulteriore stadio di conversione energia meccanica-elettrica.

Specifiche e requisiti degli impianti sono definite a partire dalle sperimentazioni e simulazioni eseguite dal partner ENEA presso il centro di ricerca a Casaccia, riassunte nel report [1]. In questo capitolo vengono descritte le condizioni al contorno del sistema di conversione, oggetto della progettazione e sperimentazione riassunte in questo documento.

L'impianto da realizzare è il sistema di conversione potenza elettrica in corrente continua (DC/DC) da installare a bordo veicolo. Tale sistema deve garantire il trasferimento di potenza elettrica tra la batteria ed il sistema di trazione del veicolo e viceversa (nel caso di frenata rigenerativa), assunte in questo documento rispettivamente come lato High Voltage (HV) e lato Low Voltage (LV). Siccome la tensione è variabile in un range sufficientemente ampio, è necessario una rapida dinamica nel passaggio tra modalità Buck e Boost. Devono necessariamente essere predisposte anche tutte le misure di sicurezza necessarie ad evitare eventi pericolosi nei confronti degli utenti, ma anche atte a salvaguardare il sistema da guasti o eventi indesiderati.

1.1.1 Veicolo di riferimento: Tecnobus Gulliver

Il minibus elettrico, oggetto della presente attività di sperimentazione, è il modello *Gulliver*, prodotta dalla azienda **Tecnobus** (Figura 1). Tale veicolo di riferimento è sovente utilizzato in ambito urbano come mezzo di trasporto pubblico. Tra le sue caratteristiche di forza, c'è senz'altro la natura elettrica del sistema di trazione, che lo rende un candidato appetibile sotto diversi punti di vista: elevata efficienza di trazione, buona autonomia (per percorsi brevi) e impatto ambientale dovuto alle emissioni estremamente contenuto. I parametri principali del caso studio sono riassunti in Tabella 1.

È importante precisare che i dati qui riportati sono quelli relativi al veicolo dopo l’emissione del bando di revamping che interessa 60 minibus operanti nel comune di Roma. In particolare, il sistema di accumulo originale è stato sostituito con uno di egual capacità ma peso ridotto: la nuova batteria, con celle a tecnologia LTO, ha una densità di carica nettamente superiore a quella convenzionalmente installata. Il carico massimo è quello relativo alla portata massima ammissibile, corrispondente a circa 31 passeggeri.



Figura 1 Tecnobus Gulliver, oggetto della sperimentazione

Tabella 1 Parametri del veicolo di riferimento Tecnobus Gulliver

Parametro	Valore	Unità
<i>Massa a vuoto</i>	3500	kg
<i>Massa a pieno carico</i>	6300	kg
<i>Resistenza di rotolamento</i>	0.035	/
<i>Coefficiente di resistenza aereodinamico</i>	0.7	/
<i>Area frontale</i>	5.69	m ²
<i>Interasse</i>	3.080	m
<i>Interasse anteriore</i>	1.386	m
<i>Interasse posteriore</i>	1.694	m
<i>Carreggiata</i>	2	m
<i>Raggio ruota</i>	0.365	m
<i>Rapporto di trasmissione</i>	12.863	/
<i>Efficienza di trasmissione</i>	90	%

Le prestazioni di batteria e convertitori sono qui descritte, così come le principali esigenze progettuali che ci hanno condotto a queste soluzioni ed i componenti ausiliari equipaggiati.

1.1.2 Batteria Li-ion XBW Mechatronics

Il sistema di accumulo da installarsi a bordo veicolo deve rispettare le specifiche di Tabella 2. La batteria scelta è quella proposta da **XBW Mechatronic Solutions**, che utilizza un pacco batteria *X-LiNano19646ENE* con celle Kokam NMC-LFT-LTO (Tabella 7).

La batteria è fornita con una serie di sistemi accessori, necessari alla messa in opera della stessa:

- Battery Management System (BMS): che permette la totale gestione dei limiti di batteria, anche rispetto a State-of-Charge (SOC) e temperatura. Fornisce anche gli stati della stessa in Real-Time (RT);
- Sonda di corrente a doppia scala: per il calcolo della potenza istantanea da e verso la batteria;
- Teleruttori ad alta tensione su polo positivo e negativo: per una connessione e disconnessione in sicurezza;
- Circuito di precarica: per adeguare la tensione prima della connessione al bus DC in alta tensione;
- Interruttore di disconnessione manuale con leva a due stadi: che garantisce un livello di sicurezza superiore, consentendo agli operatori di scollegarla e verificarne lo stato tramite semplice ispezione visiva;
- Dispositivo di monitoraggio dell'isolamento: utile a valutare lo stato di isolamento galvanico;
- Connettori per diagnostica, dati e potenza: da interfacciarsi con i controllori a bordo o display;
- Porta di comunicazione CAN Open: che assicura un livello di robustezza della comunicazione ai massimi livelli e invia sulla rete CAN già presente tutte le grandezze di batteria e riceve segnali di comando;
- Contenitore e coperchio in ferro verniciato IP54: per assicurare protezione e impermeabilità;
- Sistema di raffreddamento tramite ventilazione interna automatica: per lo smaltimento della potenza termica;
- Predisposizione per scheda di comunicazione Wi-fi: consentendo di verificarne lo stato e controllarne il comportamento tramite comunicazione wireless.

Tabella 7 Parametri della batteria XBW Mechatronic Solutions

Parametro	Valore	Unità
<i>Capacità Nominale</i>	46	Ah
<i>Energia Nominale</i>	16.3	kWh
<i>Potenza max di ricarica/scarica</i>	40	kW
<i>Corrente max in scarica continuativa</i>	552 (12C)	A
<i>Corrente max in scarica pulsante (10s)</i>	690 (15C)	A
<i>Corrente max in carica continuativa</i>	138 (3C)	A
<i>N rami in parallelo</i>	1	/
<i>Tensione nominale (cella)</i>	3.7	V
<i>N celle in serie</i>	138	/
<i>Tensione nominale</i>	355	V
<i>Tensione di lavoro</i>	324-394	V
<i>Tensione massima</i>	405	V
<i>Tensione minima</i>	298	V
<i>Temperatura ammessa</i>	[-20;55]	°C

1.1.3 Convertitori DC-DC Zekalabs

In questa sezione è descritto il sistema di conversione potenza in corrente continua [7], [8], [9].

L'individuazione delle prestazioni richieste dal convertitore è propedeutica alla scelta del componente appropriato, relativamente ai requisiti prestazionali del sistema da progettare. Tra le possibili soluzioni

disponibili nel mercato ne è stata selezionata una principale. I criteri di scelta sono stati il costo, la disponibilità degli stessi e della relativa assistenza tecnica, la facilità di controllo/interfacciamento, oltre alle caratteristiche elettriche e di potenza in accordo ai requisiti.

La scelta è rappresentata dalla soluzione proposta da Zekalabs modello LB-1071 (Figura 5), le cui caratteristiche di progetto sono in linea con i requisiti di progetto:

1. *Prestazioni*: sono adeguate rispetto ai vincoli progettuali determinati al Capitolo 2.1.7 e riassunti in Tabella 6;
2. *Ingombri*: le dimensioni dei convertitori sono contenute, in modo da garantire un adeguato spazio di manovra e per posizionare i componenti ausiliari per la conversione in sicurezza;
3. *Affidabilistico e funzionale*: garantiscono un funzionamento corretto e sicuro in tutte le situazioni in cui si troveranno ad operare, sia durante l'attività di sperimentazione e caratterizzazione, sia durante la messa in servizio.

LB-1071 DC/DC REDPRIME

40kW / 450V DC-DC converter



Figura 5 Convertitori DC-DC Zekalabs Converter da da 40kW

Infatti, questi convertitori hanno caratteristiche prestazionali e funzionali senz'altro in linea con le nostre esigenze operative. Sarebbe stato sufficiente utilizzare un unico esemplare. Tuttavia, per ragioni di sicurezza e per la presenza di carichi di spunto, che potrebbe portare a potenze transitorie superiori alla nominale, si è optato per considerare 2 convertitori operanti in parallelo con configurazione master-slave: il primo dispositivo pilota direttamente il secondo.

La soluzione proposta da Zekalabs non necessita di derating della potenza nominali impegnabile in funzione della tensione presente ai capi dei connettori di potenza.

Dai dati di Tabella 8 si evince come questa soluzione sia compatibile con i criteri di progettazione definiti al Capitolo 2.1.7. Questi sono equipaggiati con relativa scatola contattori LB-1111-1 (Figura 6), necessaria per gestire la fase di precarica dei dispositivi di conversione.

L'intento è quello di verificare la corretta funzionalità del sistema, ma anche compatibilità in termini di isolamento e dimensionamento termico, oltre che la robustezza del protocollo di controllo e comunicazione adottato, basato su CAN Open.

Tabella 8 Parametri del convertitore DC/DC Zekalabs LB-1071

Parametro	Valore	Unità
<i>Potenza</i>	40	kW
<i>Tensione massima side B</i>	450	V _{DC}
<i>Tensione massima side A</i>	410	V _{DC}
<i>Corrente massima side B</i>	115	A
<i>Corrente massima side A</i>	200	A

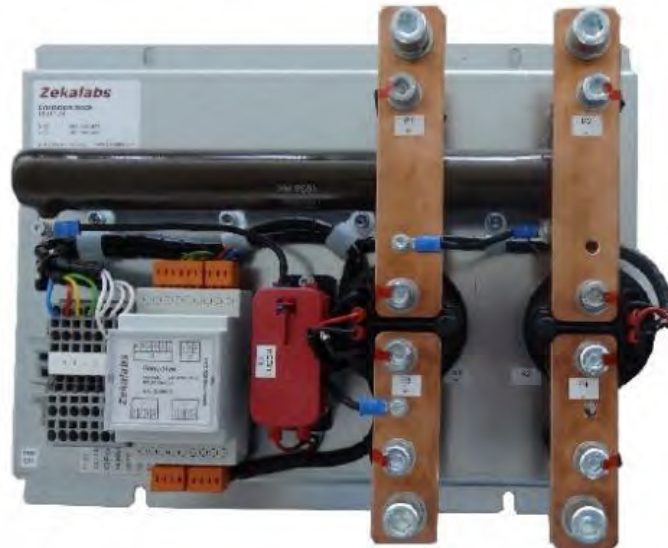


Figura 6 Scatola contattori di precarica LB-1111-1 dei convertitori DC-DC Zekalabs LB-1071

Lo schema di montaggio del sistema di conversione potenza adottato è raffigurato in Figura 7 e prevede di collegare al lato B la parte HV (nel nostro caso la batteria a 350V), mentre al lato A troveremo il DC-link (a cui è connesso il driver del sistema di trazione elettrico con tensione nominale di 72V). Lo schema include il blocco contattori LB-1111-1 per la precarica; tuttavia, non sono presenti i fusibili che devono essere necessariamente installati sul lato LV dei convertitori DC.

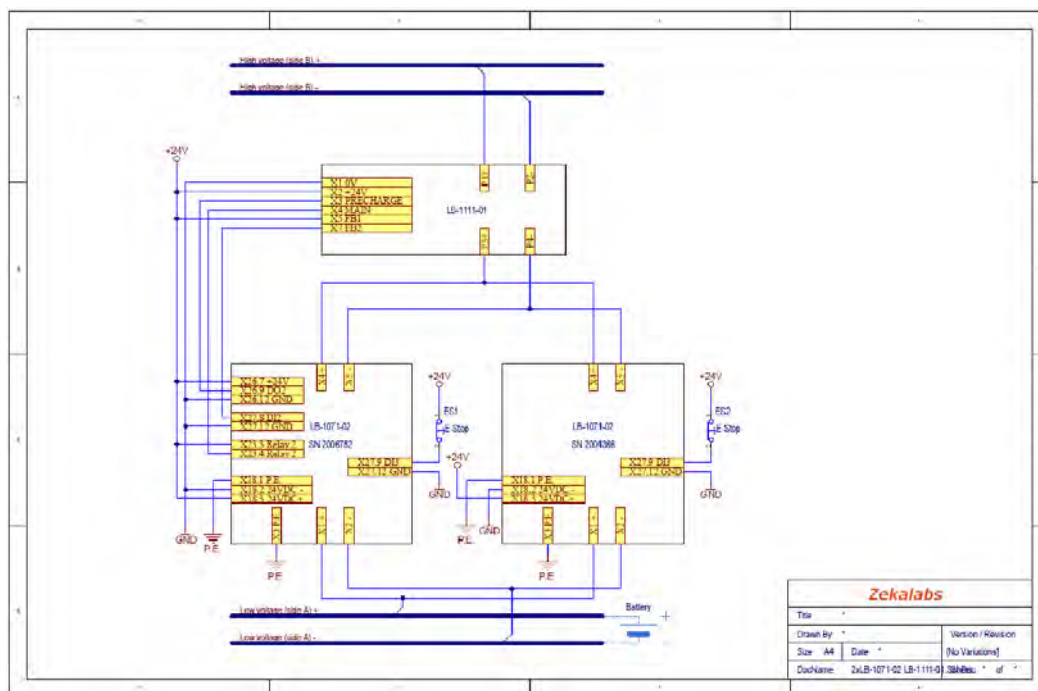


Figura 7 Schema di montaggio di convertitori DC-DC Zekalabs LB-1071 e blocco contattori LB-1111-1

Lo schema elettrico di collegamento di entrambi i convertitori è visibile in Figura 8. La lista delle connessioni invece, è riassunta in Tabella 9. Si fa notare, come visibile in Figura 7, come i connettori WAGO X26 (completo) ed il segnale X27.8 siano necessari solo per il convertitore MASTER, siccome la precarica viene gestita solo sullo Zekalabs principale.

1.2 Banco prova per caratterizzazione dei convertitori

L'intento del banco prova e dei relativi test è quello di verificare le prestazioni del sistema di conversione DC-DC, cuore del presente report di progettazione. È opportuno testare l'adeguatezza del sistema hardware e software proposto nei confronti delle funzionalità principali alla quale i convertitori devono adempiere. Infatti, testare i protocolli di comunicazione, le modalità di funzionamento e le condizioni operative ci permette di identificare possibili fonti di guasto e malfunzionamento a cui l'impianto potrebbe essere soggetto. Questa attività dunque, preliminare alla messa in opera del bus, ci da informazioni fondamentali su eventuali misure da implementare, sia lato software che hardware (ad esempio, la necessità o meno dei super-condensatori).

1.2.1 Layout e componenti del banco prova

Nella realizzazione delle prove, oltre al convertitore Zekalabs di Figura 6 ed il relativo blocco contattori di precarica di Figura 7, sono stati adoperati anche i componenti di Figura 16:

- Relè di controllo a bassa tensione;
- Resistenze di Carico 47Ω 500W;
- Fusibili a riarmo manuale;
- Mini-PLC Bart STG850;
- Diodi ultrarapidi 1200VDC;
- Teleruttori.

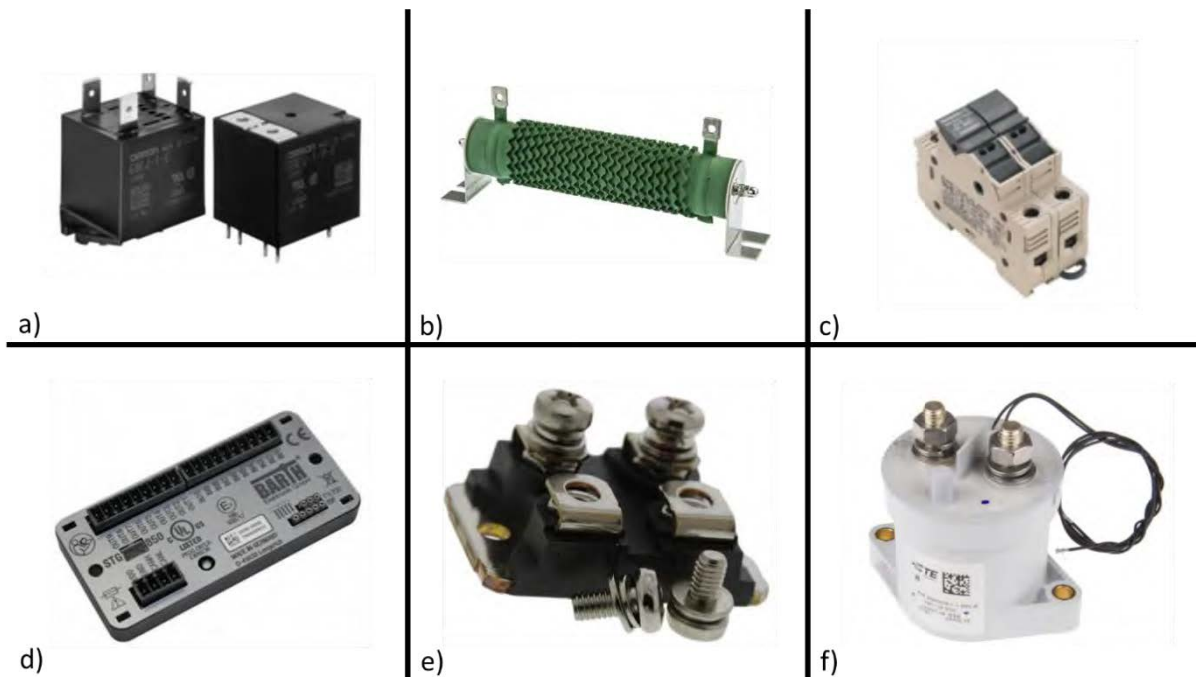


Figura 27 Dispositivi adoperati durante le prove di caratterizzazione dei convertitori Zekalabs

Per completare i test sono stati usati anche: un pacco batteria a 48V, relativo BMS, un caricabatteria Zivan NG1 (Figura 17), un carico ohmico composto da 2 stringhe di 4 lampadine a 12V ed un ciclomotore elettrico 48V da utilizzare come carico.



Figura 28 Caricabatteria Zivan NG1

Nella fattispecie sono state ideate 5 diverse prove:

1. Alimentazione lato LV - Lato HV a vuoto;
2. Alimentazione lato HV - Lato LV a vuoto;
3. Alimentazione lato HV - Lato LV con resistenze di carico;
4. Alimentazione lato HV - Lato LV con resistenze, batteria e carica-batteria;
5. Alimentazione lato HV - Lato LV con ciclomotore, batteria e carica-batteria.

Soltanto la prima di queste verrà affrontata in dettaglio questo report.

1.2.2 Test 1: Alimentazione lato LV

Per la realizzazione di questa prova è stato realizzato lo schema di Figura 20. In particolare, questa applicazione prevede batteria, BMS, carico Ohmico, caricabatteria, oltre agli alimentatori ausiliari a 12V e 24V, per alimentare l'elettronica dei vari dispositivi coinvolti. Si fa notare come in questa prima implementazione convertitori Zekalabs non siano connessi al circuito di potenza, ma soltanto al canale di comunicazione CAN-bus. Questa scelta è dovuta al fatto che fosse più opportuno configurare il lato LV del banco prova prima di integrare i sistemi di conversione DC-DC, che richiedono ulteriori sistemi hardware e software.

Il controllo dell'intero sistema è stato realizzato tramite il mini-PLC barth STG850, la cui programmazione è eseguita tramite software proprietario (miCon-L), come visibile in Figura 18. Quest'ultimo presenta un'interfaccia grafica estremamente intuitiva e completa, corredata di pulsanti e display virtuali, utili a innescare specifiche funzione e visualizzare variabili in tempo reale, rispettivamente. La comunicazione tra i sotto-sistemi coinvolti è realizzata mediante protocollo CAN-Open.

Il sistema proposto è programmato per inseguire un valore di corrente desiderato, relativamente a scarica e carica della batteria. Qual ora il carico richiedesse una corrente maggiore della DCL fornita dal BMS, il caricabatteria si attiva per fornire il surplus di potenza necessario. Se il valore massimo di corrente erogabile dalla batteria superasse quella richiesta dalle lampadine, gli ampere in accesso vengono adoperati per ricaricare la batteria stessa. L'inseguimento è realizzato tramite PID.

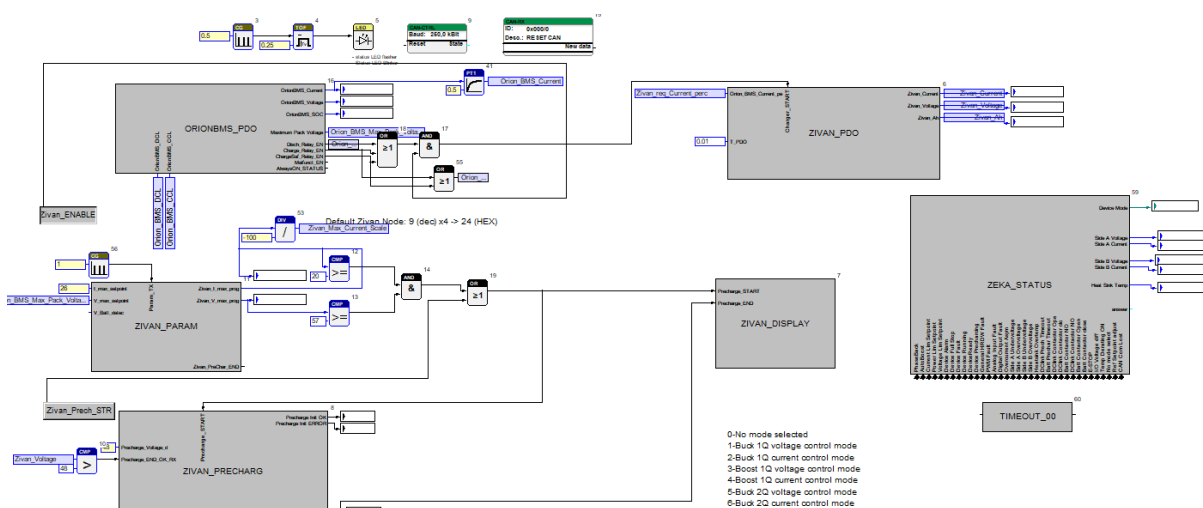


Figura 29 Software di controllo miCon-L prova 1 lato LV

Per concludere il capitolo si riporta lo schema semplificato del test 5 (Alimentazione lato HV - Lato LV con ciclomotore, batteria e carica-batteria), visibile in Figura 19.

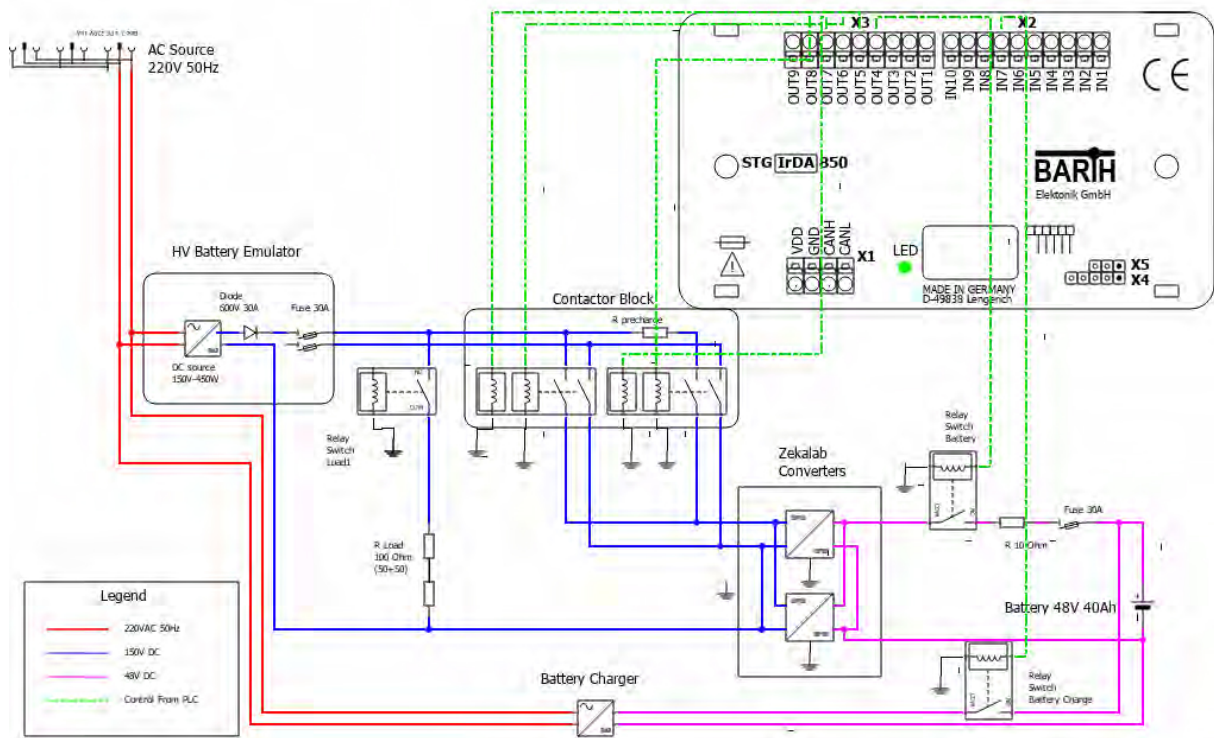


Figura 30 Schema semplificato del test 5 (Alimentazione lato HV - Lato LV con ciclomotore, batteria e carica-batteria)

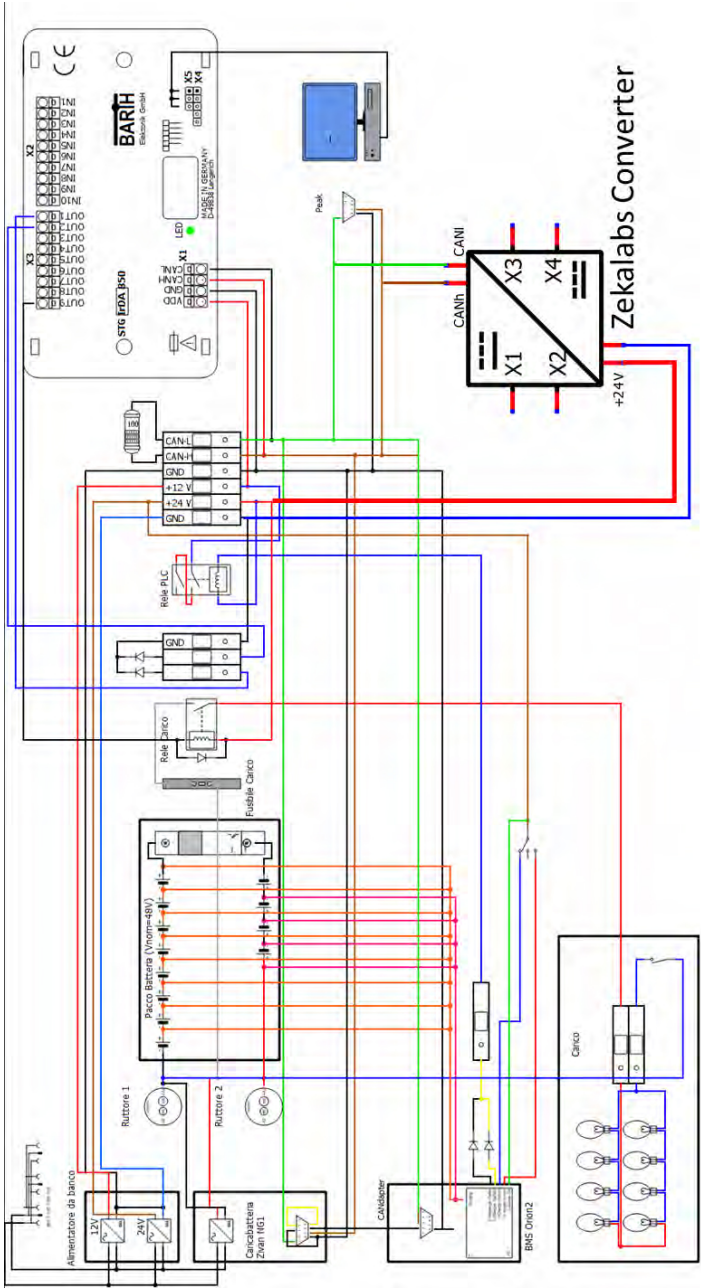


Figura 31 Schema di montaggio prova 1 lato LV

2 Alloggiamento dell'impianto sul veicolo

La scelta effettuata è stata di mantenere i due alloggiamenti originariamente previsti da TECNOBUS per alloggiare gli accumulatori a 72V e di alloggiare al loro interno i due sottosistemi principali, e segnatamente:

1. La batteria ad alta tensione
2. I sistemi di conversione e controllo dall'alta tensione alle tensioni di lavoro (72V, 24V e 12V nominali a seconda del sottosistema).

Tale soluzione permette di rispettare gli ingombri del veicolo per gli organi tecnici, senza invadere in alcun modo lo spazio destinato ai passeggeri. Inoltre, i componenti ad alta tensione vengono convenientemente mantenuti in condizione isolata rispetto agli occupanti stessi del veicolo.

Il montaggio e smontaggio dal veicolo può avvenire in tempi brevi grazie all'utilizzo di organi rotanti, in modo da semplificare le operazioni di rimessaggio, modifica e manutenzione, sempre necessari in attività di prototipazione come quella descritta.

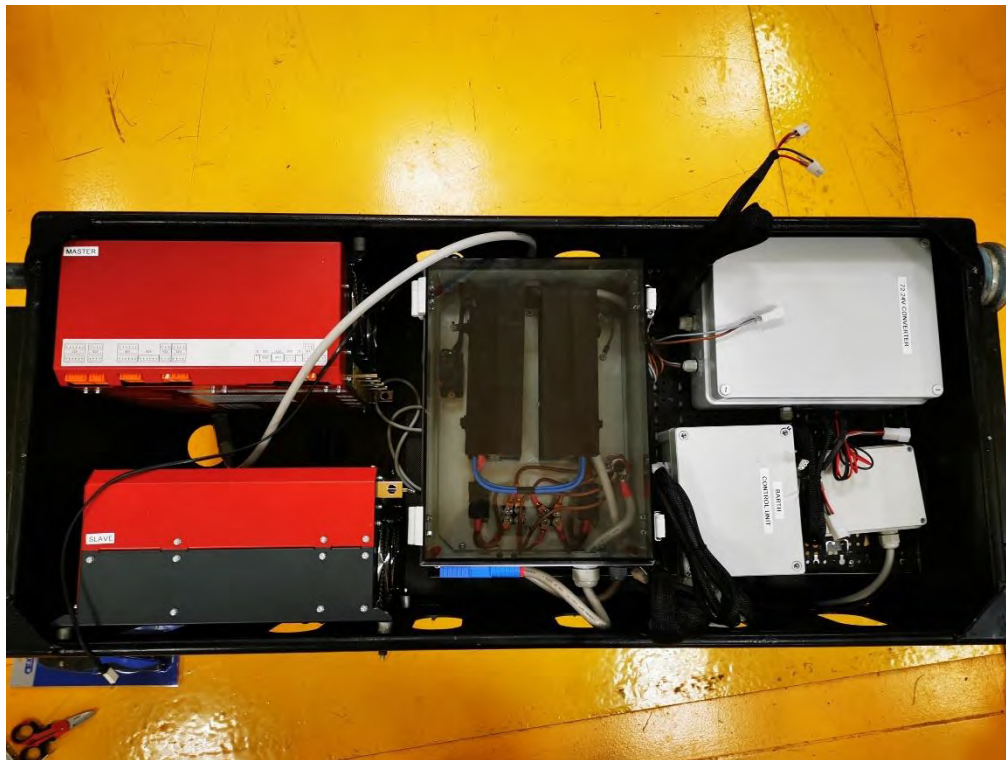


Figura 31. Alloggiamento dei convertitori e dei sistemi di controllo all'interno del primo contenitore.



Figura 32. Alloggiamento della batteria ad alta tensione nel primo convertitore.



Figura 33. Attività di inserimento del primo contenitore nel vano dedicato sul veicolo.

3 Verifica del sistema in condizioni reali

Le prove sul sistema sono state svolte nelle seguenti condizioni:

1. In ambiente controllato, mediante erogazione di potenza dal lato alta tensione
2. In ambiente controllato, mediante erogazione di potenza dal lato bassa tensione
3. In ambiente funzionale, mediante marcia del veicolo.

3.1 Esecuzione collaudi in ambiente controllato

Al termine dell'assemblaggio della batteria e dei sistemi di controllo, l'assieme è stato portato al centro prove ENEA di Casaccia per l'esecuzione di test preliminari in ambiente controllato. Dal punto di vista dell'attività qui descritta, i collaudi sono stati necessari per validare il protocollo di comunicazione CANopen utilizzato, verificare il corretto dimensionamento dei cablaggi e il rispetto delle specifiche di sistema richieste ai fornitori.

Allo scopo è stato realizzato un ciclo di potenza sintetico che, utilizzando telemetrie provenienti da precedenti attività, avesse la stessa valenza statistica di un ciclo su strada. Considerando le caratteristiche dei ciclatori, sono stati utilizzate curve basate su segmenti di corrente (o potenza) costante, basate su percentili noti. Sono stati scelti i percentili: 50, 75, 90, e 98, mantenendo come valore minimo il percentile 50 per evitare fasi a bassa potenza che avrebbero reso lunga l'effettuazione del test offrendo scarsa sollecitazione.

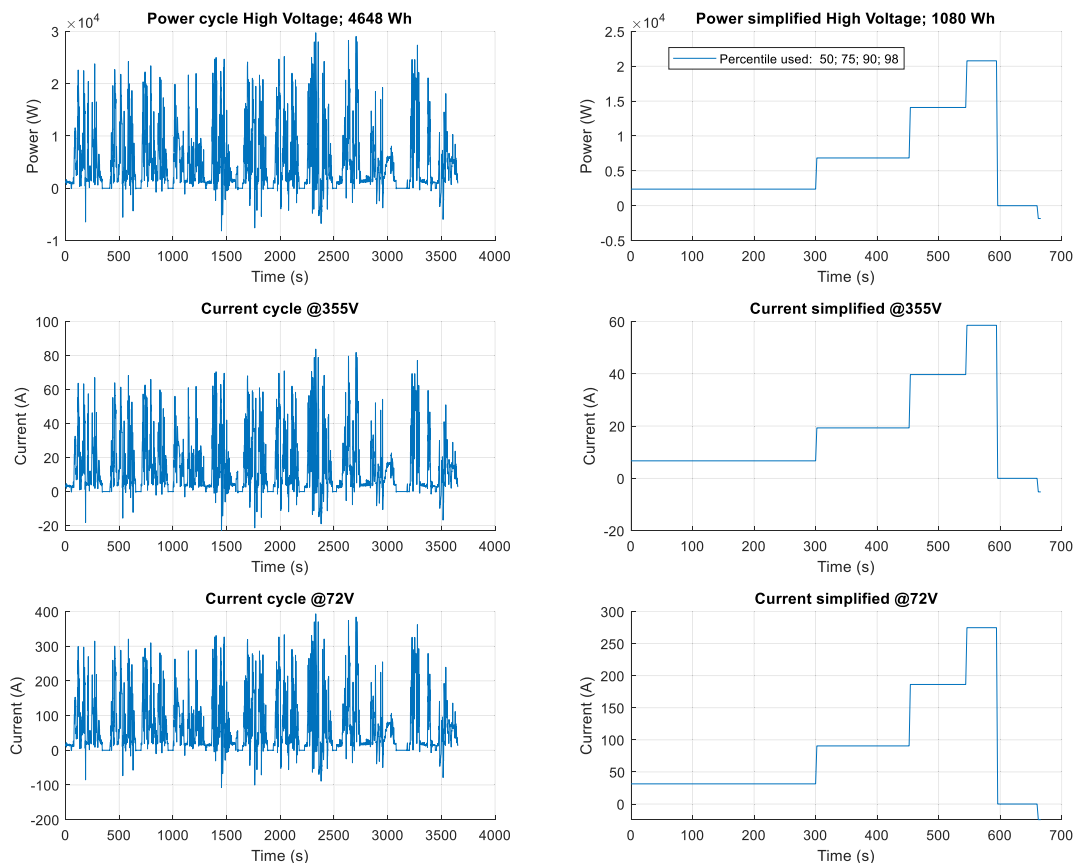


Figura 34. Realizzazione di un ciclo di controllo equivalente al ciclo di potenza noto.

3.1.1 Test della batteria e del controllo con ciclatore ad alta tensione

Utilizzando un ciclatore connesso al lato alta tensione della batteria sono state effettuate prove di carica e scarica rispetto il ciclo descritto al paragrafo precedente. Inoltre, la batteria è stata caricata con una potenza costantemente elevata allo scopo di sollecitarla termicamente.

Gli esiti, in linea con le attese, confermano la funzionalità rispetto alle specifiche richieste, e la correttezza del protocollo di comunicazione adottato che vede perfetta coincidenza tra i valori rilevati dal ciclatore e i valori di corrente e tensione forniti dall'autodiagnosi della batteria via CANopen.

Il test è stato considerato superato.

Le temperature in ogni istante della prova sono risultate coerenti con i carichi presentati e sempre al di sotto dei valori ammessi come massimi.

Il test della batteria e della diagnostica è pertanto da considerarsi superato.

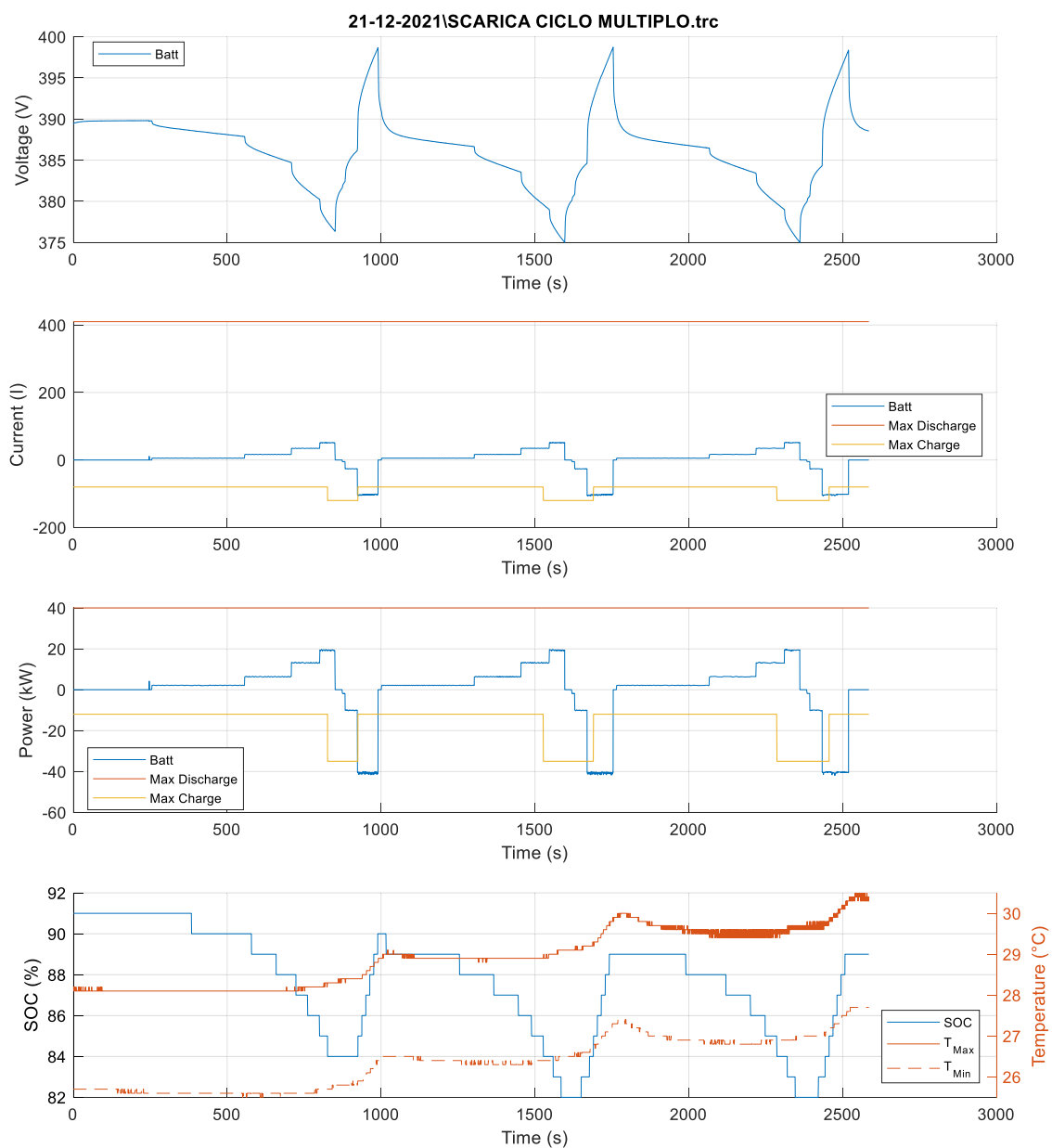


Figura 35. Cicli misti per la scarica della batteria e la successiva ricarica fino allo stato precedente.

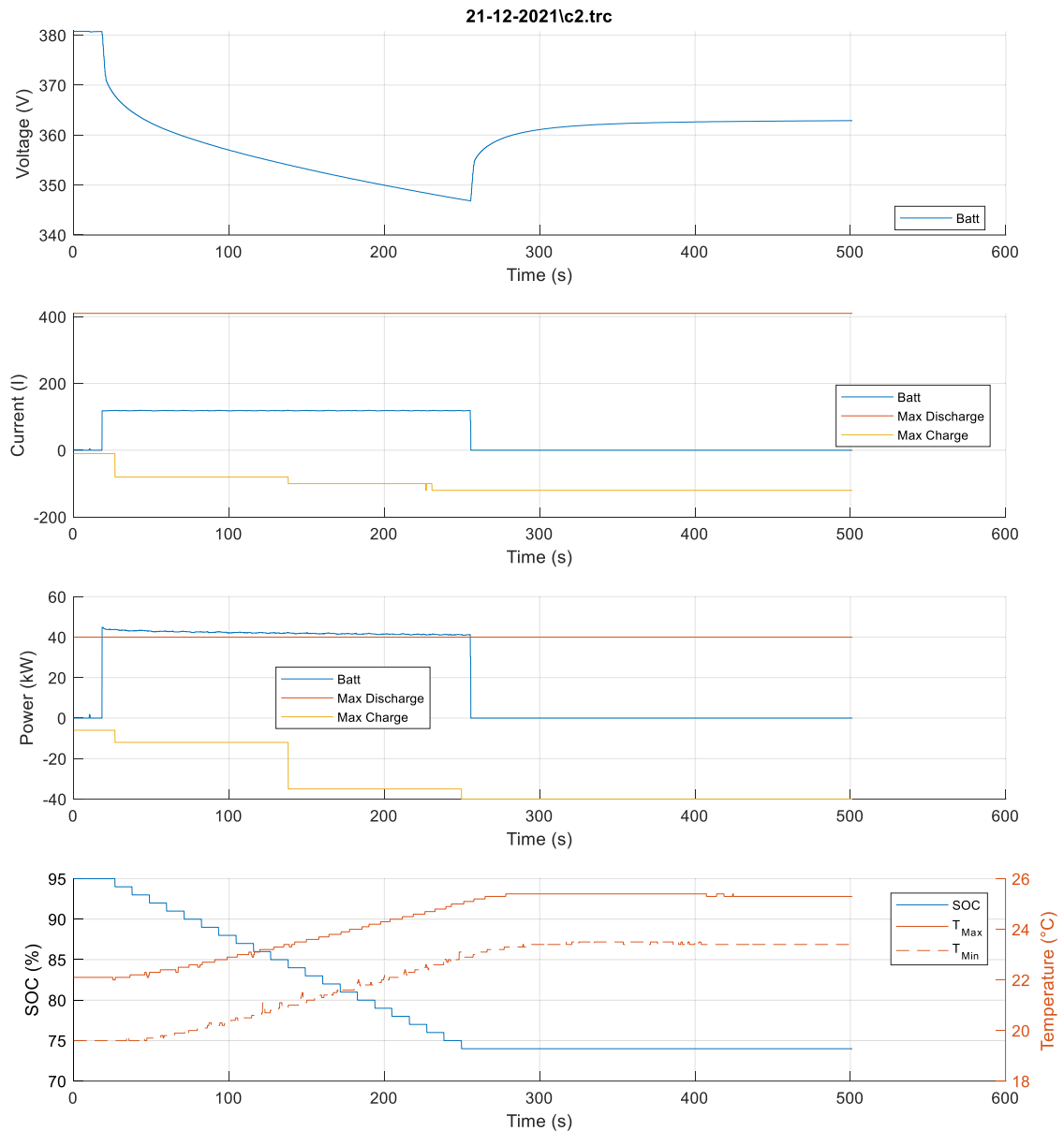


Figura 35. Carica ad alta potenza.

3.1.2 Test della batteria e del controllo con ciclatore a bassa tensione

La seconda fase di test ha visto l'utilizzo del ciclatore collegato al lato a bassa tensione allo scopo di verificare non solo la batteria, ma tutto il sistema di conversione e controllo nel suo complesso.

In tale occasione, inoltre, è stata svolta un ciclo di carica-scarica completo che ha evidenziato la correttezza delle condizioni di arresto imposte dal controllo sviluppato all'interno del progetto tramite il già descritto mini-PLC di prototipazione.

L'esito della prova è da considerarsi positivo a seguito delle seguenti osservazioni:

- Il passaggio buck-boost avviene automaticamente, anche se i tempi di reazione imposti dal ciclatore sono non restrittivi
- Le temperature rimangono nell'ambito ammissibile, anche sotto carico

- I convertitori lavorano effettivamente in parallelo, anche se sono state testate più tarature allo scopo di inserire una tolleranza sull'oscillazione di tensione in uscita in modo da favorire l'equilibrio delle correnti tra i due convertitori installati.

Inoltre, sempre utilizzando i convertitori come tramite tra batteria e ciclatore, è stato effettuato uno stress-test giudicato estremamente selettivo tramite il quale la batteria è stata completamente scaricata e successivamente ricaricata fino al valore massimo di SOC.

L'esito, in questo caso, è da considerarsi positivo per la perfetta rispondenza della diagnostica rispetto ai valori rilevati. Si evidenzia come la batteria, giunta intorno al 8-9% di SOC, offre una potenza disponibile ridotta rispetto a quanto necessario per la trazione (giudicata inferiore ai 10kW dall'autodiagnostica); tale caratteristica, attesa per quanto noto sulle celle di carica, verrà rispettata nel sistema di controllo installato sul veicolo.

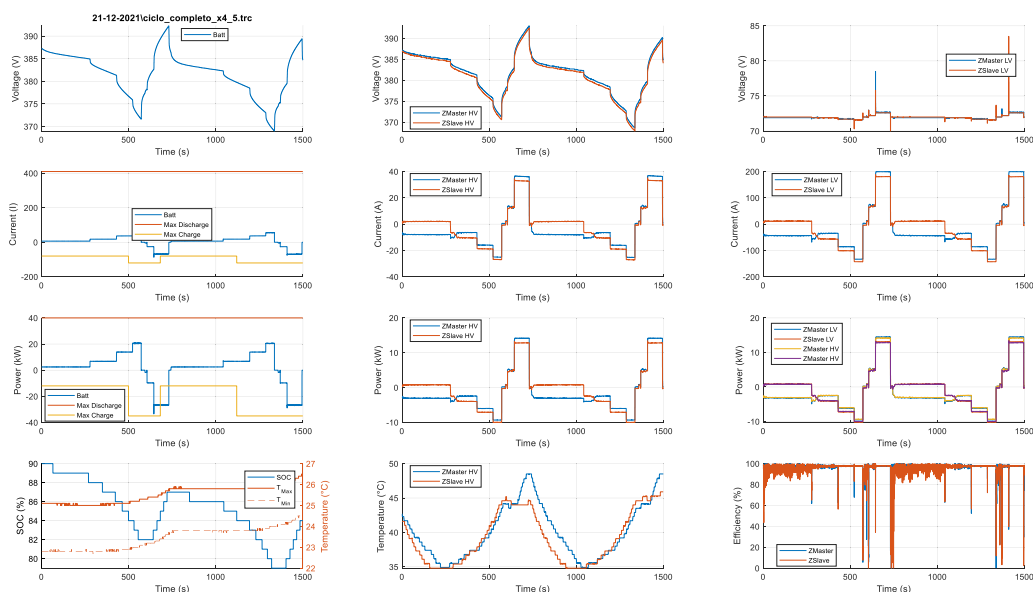


Figura 36. Esecuzione di un ciclo di carica-scarica dal lato a bassa tensione.

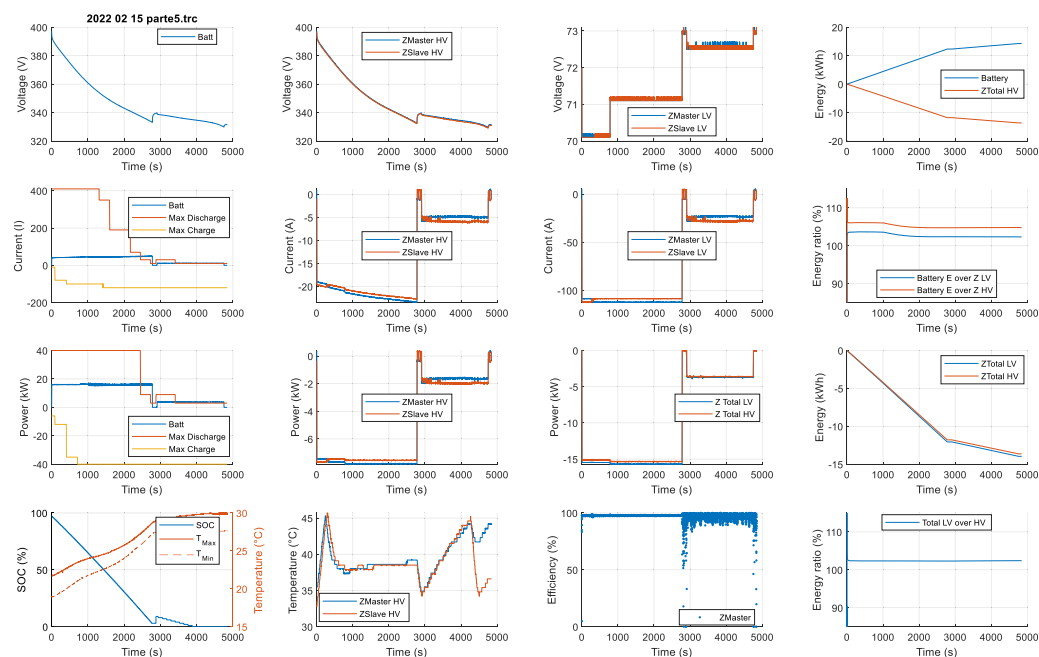


Figura 37. Scarica completa della batteria (da 98% SOC fino a 2% rilevato dalla diagnostica)

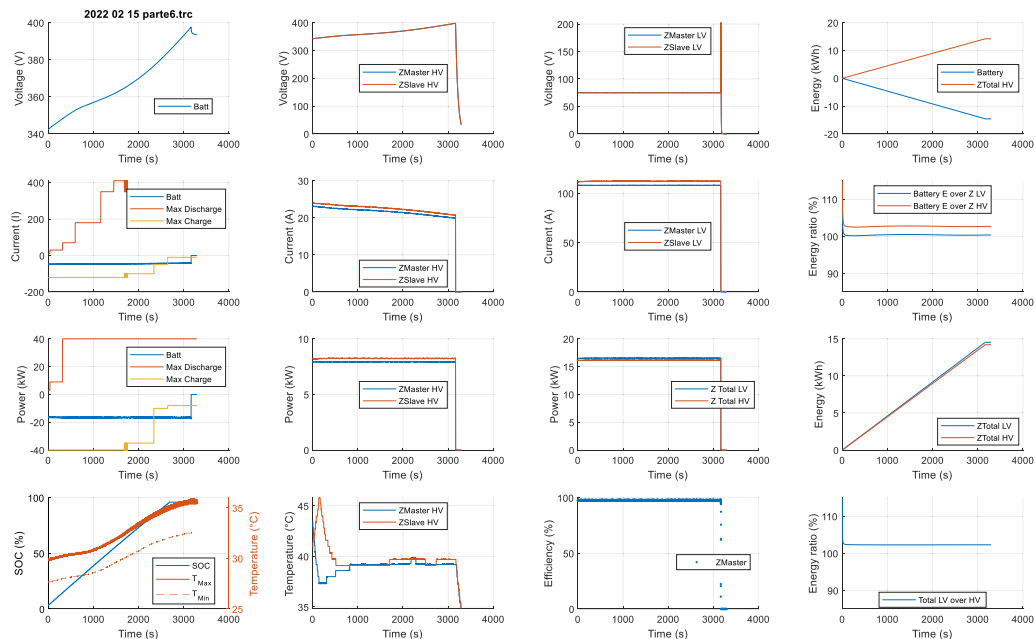


Figura 38. Carica completa della batteria (da 2% SOC fino a 98% rilevato dalla diagnostica)

3.2 Esecuzione collaudi in ambiente reale

Superate le fasi di prova in ambiente controllato, il veicolo è stato allestito utilizzando il sistema di retrofit, montando contestualmente un sistema di telemetrie basate su GPS e CANbus logger, che rende i dati disponibile su cloud.

Il veicolo è stato quindi guidato in strada privata allo scopo di:

- Verificare la rispondenza dei convertitori alle variazioni rapide di potenza richieste dal sistema di trazione
- Verificare la stabilità del funzionamento in presenza di vibrazioni e areazione ridotta causa installazione nel vano
- Verificare la guidabilità del veicolo rispetto alle tensioni di funzionamento, potenzialmente dissimili da quelle dell'impianto originario.

Al termine della fase di installazione, la funzionalità primaria del veicolo è risultata in linea con le attese in quanto è stato possibile mantenere i sistemi avviati senza sostentamento dell'esterno per numerose ore (circa 3 ore di log totali), a testimonianza del corretto dimensionamento delle batterie ausiliarie e dei convertitori necessari per il sotto-impianto a 24V (tensione di sicurezza per i sistemi CANbus).

Successivamente, sono state svolti alcuni percorsi su strada, per un totale di 2600metri percorsi circa.

L'esito delle prove, riassunto nelle figure seguenti, è stato non tanto di verificare i consumi del veicolo – derivanti dalla natura stessa della macchina – quanto, piuttosto, la rispondenza del sistema di controllo alle esigenze della guida. Sono state verificare e validate in condizioni operative le seguenti caratteristiche:

- Il passaggio buck-boost avviene correttamente effettuando una manovra di kick-down seguita da tip-out: la potenza passa da +28kW (in linea con l'assorbimento massimo atteso) a -5kW (rigenerazione) senza che si verifichi alcun problema ai convertitori. L'esito è giudicato soddisfacente
- L'areazione dei convertitori è sufficiente, non venendo mai superati i 45° anche in presenza di pieno sole e temperature superiori ai 25°.



Figura 39. Installazione dell'impianto nel sistema veicolo.



Figura 40. Sistema montato e pronto all'uso.

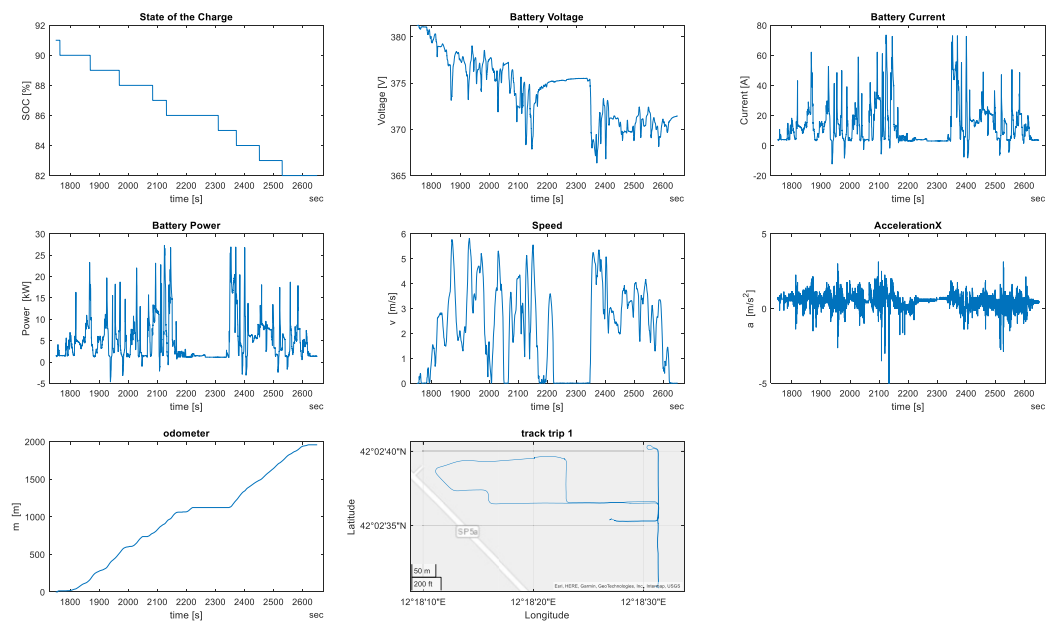


Figura 41. Trip1: principali dati di potenza, tensione e corrente di funzionamento.

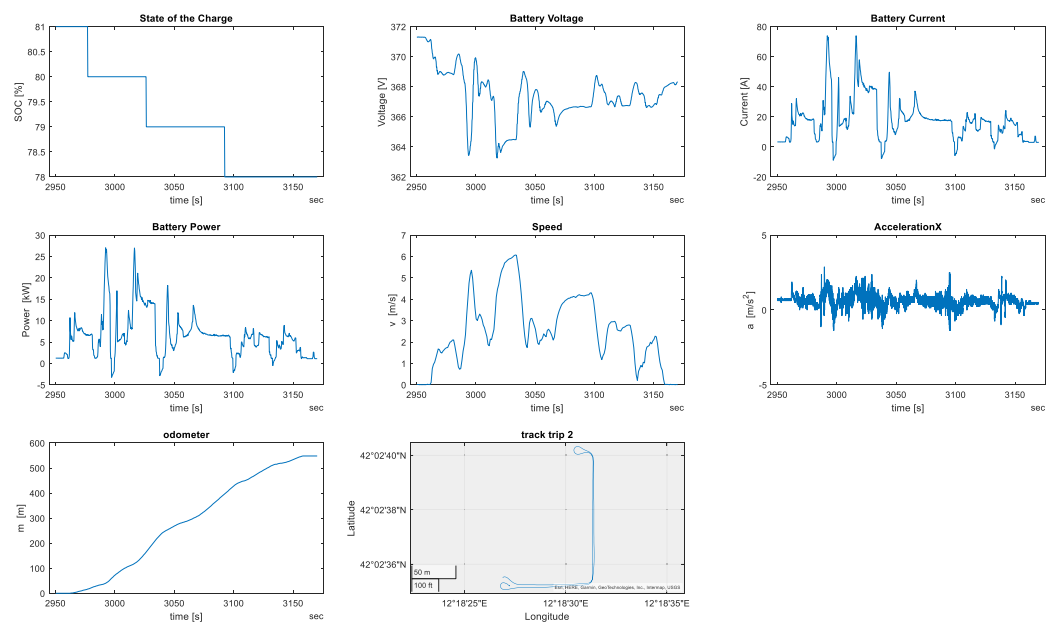


Figura 42. Trip2: principali dati di potenza, tensione e corrente di funzionamento.

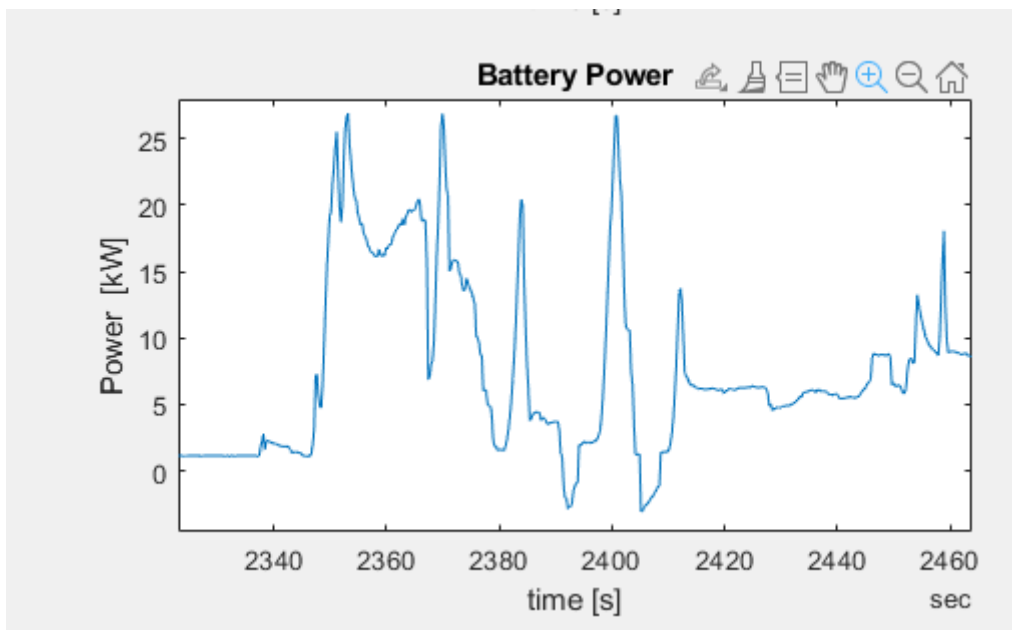


Figura 43. Trip2: Dettaglio della prova relativa al kick-down seguito da tip-out e passaggio da potenze positive a negative nei tempi richiesti dalla marcia del veicolo.

3.3 Adeguamento del sistema di controllo

Al termine dell'effettuazione delle prove, il sistema di controllo è stato giudicato validato e pertanto è stato completato rimuovendo i consensi manualmente imposti in fase di test (necessari per garantire la sicurezza di ogni step effettuato) e automatizzando la procedura di avvio secondo quanto messo a punto in fase di test. In particolare, il programma implementato nel PLC opera secondo la seguente richiesta:

- Verifica di tutte le condizioni di funzionamento
 - Consenso in caso di assenza di timeout di ogni singolo sottosistema CANbus
 - Consenso in caso di assenza di errori da parte dei convertitori
- Verifica della pressione del bottone "fullstop"
- Avvio vero e proprio dei convertitori:
 - Esecuzione di RESET dei convertitori
 - Esecuzione della precarica (5s)
 - Esecuzione dell'avvio del primo convertitore (5s)
 - Aumento della tensione di uscita da 30 a 72V (per evitare ritorni di tensione causa interazione con il sistema di bordo del veicolo)
 - Avvio del secondo convertitore (a distanza di 0.5s)
 - Avvio dei convertitori ausiliari a 12V e 24V.

Tale sequenza si svolge automaticamente in un tempo inferiore a 10-15s, coerentemente con l'esigenza di avere il veicolo disponibile anche ad un personale non qualificato.

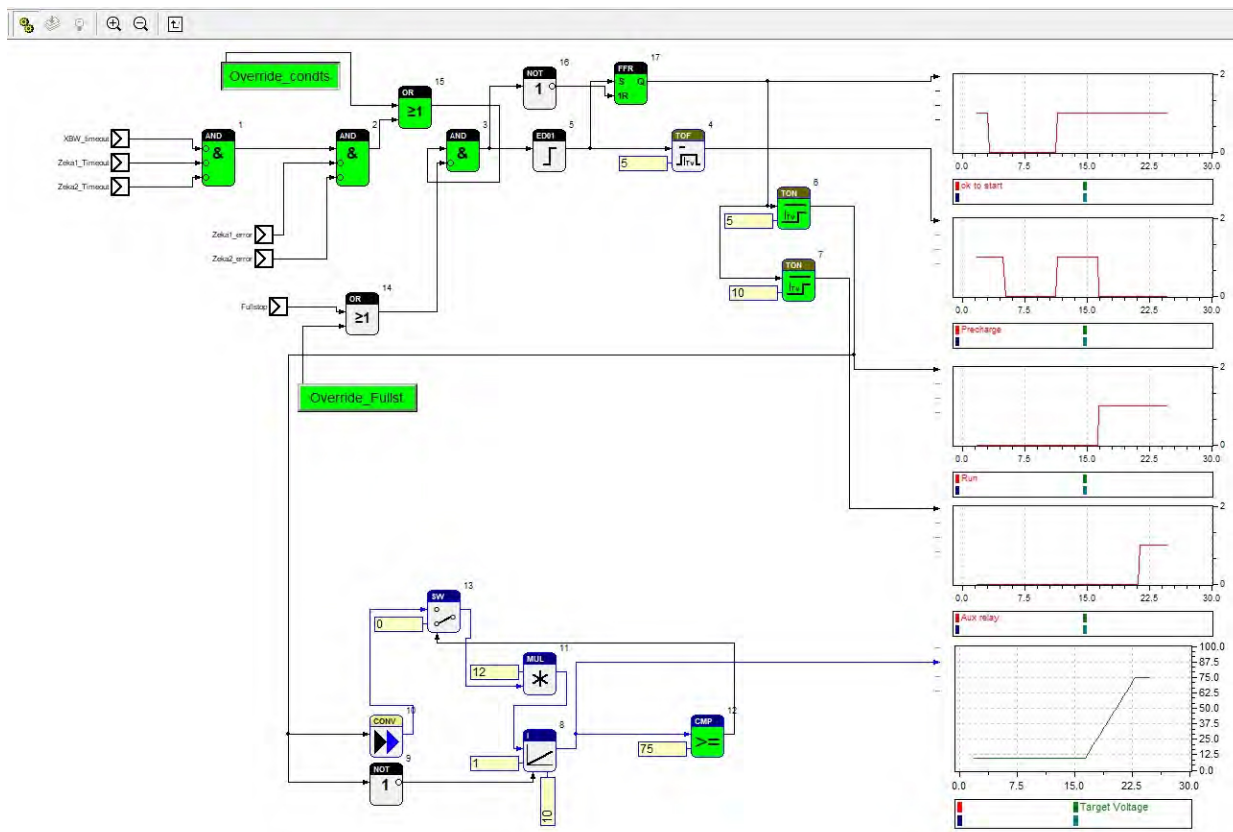


Figura 44. Avviamento automatico dei sottosistemi batteria, convertitori principali e secondari.

4 Conclusioni

Il presente report riassume le attività di testing effettuate sull'impianto di retrofit ad alta tensione per il minibus elettrico Tecnobus Gulliver.

Le attività si sono svolte aumentando progressivamente il numero di sottosistemi coinvolti, esaminando prima la sola batteria, poi il sistema comprendente i convertitori di potenza, dopo di che si è passati a montare il sistema sul veicolo e a testarlo in condizioni operative, automatizzando anche la procedura di avvio.

L'esito delle prove è confortante sia per il rispetto delle specifiche di progetto richieste sia per la rispondenza alle esigenze di guidabilità e funzionalità del veicolo. Sono disponibili tracce CANbus e GPS delle prove effettuate.

5 Riferimenti bibliografici

- [1] F. Ortenzi, 'Valutazione del consumo energetico e dell'energia di ricarica di un minibus in esercizio su una linea di trasporto pubblico urbano', Report, p. 36.
- [2] F. Ortenzi, M. Pasquali, and F. Sacco, 'Sperimentazione in scala reale di un sistema di ricarica flash con pantografo, al banco e su strada', p. 27.
- [3] F. Ortenzi, M. Pasquali, G. Pedè, S. Costà, and F. Sacco, 'Sperimentazione in scala ridotta di un sistema di ricarica ibrido per travaso di supercondensatori per TPL', p. 34.
- [4] L. Berzi et al., 'Structural and energy storage retrofit of an electric bus for high-power flash recharge', *Procedia Structural Integrity*, vol. 24, pp. 408–422, 2019, doi: 10.1016/j.prostr.2020.02.038.
- [5] F. Ortenzi, G. Pedè, and P. Antonini, 'Design of the Storage System of a High Performance Hybrid Vehicle', Sep. 2015, pp. 2015-24–2544, doi: 10.4271/2015-24-2544.
- [6] Alessandrini et al., 'Design of a Hybrid Storage for Road Public Transportation Systems', in *Advances in Italian Mechanism Science*, vol. 68, G. Carbone and A. Gasparetto, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 149–157.
- [7] Alessandrini et al., 'A Flash Charge System for Urban Transport', in *2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEEIC / I&CPS Europe)*, Genova, Italy, Jun. 2019, pp. 1–6, doi: 10.1109/IEEEIC.2019.8783867.
- [8] Alessandrini, F. Cignini, F. Ortenzi, G. Pedè, and D. Stam, 'Advantages of retrofitting old electric buses and minibuses', *Energy Procedia*, vol. 126, pp. 995–1002, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.08.260.
- [9] F. Ortenzi, S. Orchi, and G. Pedè, 'Technical and economical evaluation of hybrid flash-charging stations for electric public transport', in *2017 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Toronto, ON, Mar. 2017, pp. 549–554, doi: 10.1109/ICIT.2017.7915417.
- [10] F. Ortenzi, M. Pasquali, P. P. Prosini, A. Lidozzi, and M. Di Benedetto, 'Design and Validation of Ultra-Fast Charging Infrastructures Based on Supercapacitors for Urban Public Transportation Applications', *Energies*, vol. 12, no. 12, p. 2348, Jun. 2019, doi: 10.3390/en12122348.
- [11] F. Cignini et al., 'Experimental Data Comparison of an Electric Minibus Equipped with Different Energy Storage Systems', p. 16, 2020.
- [12] Alessandrini et al., 'Design and Testing of a Flash Recharge System for a Bus including foreseen effects in terms of Storage Life Extension', in *2020 IEEE 20th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*, Palermo, Italy, Jun. 2020, pp. 63–68, doi: 10.1109/MELECON48756.2020.9140606.
- [13] Alessandrini et al., 'Design and Development of a Prototype of Flash Charge Systems for Public Transportation', in *Applications in Electronics Pervading Industry, Environment and Society*, vol. 627, S. Saponara and A. De Gloria, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 293–299.
- [14] M. di Benedetto, F. Ortenzi, A. Lidozzi, and L. Solero, 'Design and Implementation of Reduced Grid Impact Charging Station for Public Transportation Applications', *WEVJ*, vol. 12, no. 1, p. 28, Feb. 2021, doi: 10.3390/wevj12010028.
- [15] A. Alessandrini, L. Pugi, L. Berzi, T. Favilli, 'Progettazione del sistema di bordo per ospitare il nuovo sistema di accumulo e di trasferimento dell'energia', Report RdS/PTR2020/XXX, Giugno 2021
- [16] H. Pacejka, *Tire and Vehicle Dynamics*. Elsevier, 2005.
- [17] L. Pugi, T. Favilli, L. Berzi, E. Locorotondo, and M. Pierini, 'Brake Blending and Optimal Torque Allocation Strategies for Innovative Electric Powertrains', in *Applications in Electronics Pervading Industry, Environment and Society*, vol. 573, S. Saponara and A. De Gloria, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 477–483.
- [18] L. Berzi et al., 'Brake Blending Strategy on Electric Vehicle Co-simulation Between MATLAB Simulink® and Simcenter Amesim™', in *2019 IEEE 5th International forum on Research and Technology for Society and Industry (RTSI)*, Florence, Italy, Sep. 2019, pp. 308–313, doi: 10.1109/RTSI.2019.8895548.

- [19]T. Favilli, L. Pugi, L. Berzi, M. Pierini, and N. Tobia, 'Regenerative Fuzzy Brake Blending Strategy on Benchmark Electric Vehicle: the FIAT 500e', in 2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Madrid, Spain, Jun. 2020, pp. 1–6, doi: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope49358.2020.9160584.
- [20]R. Krishnan, Electric motor drives: modeling, analysis, and control. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 2001.
- [21]L. Pugi et al., 'Fast Modelling and Identification of Hydraulic Brake Plants for Automotive Applications', TJFP, Nov. 2020, doi: 10.13052/ijfp1439-9776.2122.
- [22]T. D'hondt et al., 'Modeling and Identification of an Electric Vehicle Braking System: Thermal and Tribology Phenomena Assessment', Apr. 2020, pp. 2020-01–1094, doi: 10.4271/2020-01-1094.

Appendice: curriculum scientifico del gruppo di lavoro

Ingegnere meccanico con dottorato in energetica Adriano Alessandrini è attualmente professore associato di trasporti (ICAR-05) presso il DICEA – Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Firenze. Dal 1998 ha partecipato a più di 30 progetti di ricerca. I suoi principali interessi di ricerca sono l'impatto ambientale dei veicoli (e dei conducenti) e dei sistemi di trasporto innovativi. CityMobil2, la più grande iniziativa europea sui sistemi di trasporto su strada completamente automatizzati che ha coordinato, lo ha reso uno degli scienziati più visibili nel settore dei veicoli stradali automatizzati, generando richieste di intervento e partecipazione a tavole rotonde e comitati di alto livello. Gli è stato chiesto di tenere lezioni a Princeton presso l'Università Tecnica di Delft e presso la DG MOVE della Commissione Europea; è stato invitato più volte come relatore plenario al meeting annuale TRB al meeting estivo TRB su Road Vehicle Automation e alle sessioni tecniche dei congressi mondiali ITS.

Nel 2015 è stato selezionato per essere uno dei 25 scienziati che rappresentano l'Europa al simposio UE-USA sull'automazione a Washington nell'aprile 2015. Per la sua visione di una nuova società generata dal trasporto automatizzato è stato selezionato due volte nel 2014 e nel 2016 per il premio EU Champion of Transport Research. Nel 2015 ha servito su richiesta il Presidente degli Stati Uniti come Valutatore per il National Cooperative Highway Research Program (NCHRP).

Luca Pugi prof. Associato (SSD Ing.Ind 13) presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dove si occupa dei corsi di Trazione Stradale (B024414), Meccatronica (B019381) e del Modulo di Meccanica Applicata del laboratorio di progettazione industriale(B025509).

I principali ambiti di ricerca riguardano la simulazione di sistemi dinamici con particolare riferimento ad applicazioni mobili, la prototipazione di sistemi meccatronici, la mobilità sostenibile.

Autore di oltre 250 pubblicazioni indicizzate (H-INDEX 24) è coautore di almeno tre brevetti internazionali e fondatore di due spin off riconosciuti dall'università di Firenze numerosi gli award ottenuti per pubblicazioni ed attività di ricerca realizzate.

Nato nel 1991, Tommaso Favilli si è laureato in Ingegneria Elettrica e dell'Automazione nel 2018 all'Università di Firenze. Attualmente ricopre il ruolo di candidato PhD presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale di Firenze (DIEF). Le sue attività sono principalmente relative alla modellazione e simulazione in tempo reale di veicoli elettrici autostradali, riguardanti dinamica, controllori di stabilità, gestione della potenza e algoritmi di ottimizzazione. Conoscenze specifiche sono state acquisite rispetto a architetture di powertrain elettrici, impianti frenanti, miscelazione di frenata e alla progettazione di sistemi di stabilità laterale robusti.