



Ricerca di Sistema elettrico

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

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

- 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)

Dicembre 2020

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

Obiettivo: Tecnologie

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

Work package: Mobilità

Linea di attività: 2.34 - Progettazione e sviluppo prototipale di un powertrain per minibus elettrici adatto ad un accumulo per ricarica rapida/ultrarapida

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work package: Maria Pia Valentini, ENEA

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.....	4
1 INTRODUZIONE	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 SPECIFICHE E REQUISITI DEL SISTEMA.....	5
2.1.1 <i>Veicolo di riferimento: Tecnobus Gulliver</i>	6
2.1.2 <i>Sistema di accumulo</i>	7
2.1.3 <i>Sistema di trazione</i>	8
2.1.4 <i>Stazione di ricarica</i>	8
2.1.5 <i>Sistema a Pantografo</i>	9
2.1.6 <i>Accumulatore statico a volano</i>	10
2.1.7 <i>Convertitore DC/DC</i>	11
2.2 MODELLO IN AMBIENTE DI SIMULAZIONE.....	12
2.2.1 <i>Descrizione del modello</i>	12
2.2.2 <i>Risultati delle simulazioni</i>	13
2.3 PROGETTAZIONE DEL SISTEMA DI CONVERSIONE POTENZA DC/DC	15
2.3.1 <i>Convertitori DC-DC: indagine di mercato</i>	15
2.3.2 <i>Batteria: Indagine di mercato</i>	18
2.3.3 <i>Panoramica del sistema di conversione potenza DC/DC</i>	22
2.4 PROGETTAZIONE MECCANICA ED INGOMBRI	23
2.4.1 <i>Modello CAD</i>	26
2.5 BANCO PROVA PER CARATTERIZZAZIONE DEI CONVERTITORI	28
2.5.1 <i>Layout e componenti del banco prova</i>	28
2.5.2 <i>Test 1: Alimentazione lato LV</i>	30
3 CONCLUSIONI.....	32
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	33

Sommario

Il presente documento rappresenta il primo 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).

I requisiti del sistema da progettare sono stati analizzati in modo da definire le condizioni al contorno per il design dell'impianto di conversione potenza elettrica DC-DC tra batteria veicolo ed azionamento del sistema di trazione elettrico.

Per il supporto alla progettazione della soluzione finale proposta, è stato sviluppato un modello dinamico del bus a 3 gradi di libertà in ambiente MATLAB Simulink, validato rispetto a dati reali acquisiti durante un percorso della linea urbana di riferimento.

I requisiti di ingombro e le prestazioni minime dei componenti del sistema sono state stabilite come attività propedeutica alla progettazione. Considerando le specifiche ed i requisiti di design, è stata condotta una indagine di mercato preliminare, con l'obiettivo di individuare i componenti maggiormente adatto all'applicazione considerata. Una volta definita la configurazione d'impianto, i vincoli di spazio ed ingombro sono stati verificati mediante modello CAD del veicolo.

Successivamente, specifiche procedure di prova sono state implementate ed eseguite su un banco prova, realizzato specificatamente per questa applicazione: l'intento principale di verificare la corretta integrazione del sistema di gestione della potenza elettrica da installarsi a bordo del mini e-bus. L'elemento centrale, oggetto di questa relazione, è rappresentato dai convertitori di potenza elettrica DC-DC tra la batteria ed il sistema di trazione del bus. Questo sarà oggetto di sperimentazione approfondita, rivolta a caratterizzarne le prestazioni.

Una volta scelti i componenti del sistema, sono stati predisposti il sistema di comunicazione tra i dispositivi, le procedure di protezione/sicurezza ed il protocollo di monitoraggio/salvataggio dati.

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 alla "Progettazione del sistema di bordo per ospitare il nuovo accumulo e del nuovo sistema di trasferimento dell'energia".

Questo lavoro rappresenta attività di supporto rispetto all'obiettivo di sperimentazione di un sistema di ricarica rapida per autobus 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 design dell'impianto 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 logistico e degli ingombri. 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 definite le condizioni al contorno per una progettazione ottimale del sistema di conversione potenza, a partire dalle specifiche dei sistemi a cui devi interfacciarsi: la batteria per l'accumulo di energia a bordo, detto lato High Voltage (HV), e l'azionamento del sistema di trazione, detto lato Low Voltage (LV).

Un modello semplificato di veicolo e relativi sottosistemi di bordo è stato sviluppato ed implementato in ambiente di simulazione MATLAB Simulink, così da poter caratterizzare il comportamento dei layout di impianto elettrico proposti, rispetto alle prestazioni richieste. Il modello virtuale, parametrizzato secondo i dati del veicolo, è tarato utilizzando dati cinematici ed energetici acquisiti durante un ciclo guida relativo al percorso della linea 17 dell'ATAC di Roma.

Una volta identificata la soluzione maggiormente adeguata rispetto al comportamento atteso/desiderato, è stata condotta uno studio preliminare, rivolto a stabilire le prestazioni minime richieste ad ogni componente per un loro funzionamento sicuro ed efficiente durante tutte le possibili fasi sperimentali ed operative. È stata inoltre condotta un'analisi di mercato per verificare disponibilità, convenienza e appropriatezza dei componenti da acquistare. La verifica degli ingombri è supportata da attività di progettazione meccanica tramite modelli CAD, in modo da verificare il rispetto dei vincoli di spazio e peso disponibili sul veicolo elettrico.

In parallelo a queste attività è stato realizzato un banco prova per la sperimentazione dei convertitori di potenza DC-DC adottati. 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.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

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. Il modello proposto in ambiente MATLAB Simulink ed i relativi risultati di simulazione vengono descritti nel paragrafo 2.2. Le proposte di impianto esplorate sono descritte nella sezione 2.3, così come le prestazioni dai componenti e la relativa indagine di mercato, nonché i modelli CAD. La sezione 2.4 descrive il banco prova realizzato per il testing dei convertitori DC-DC e le relative procedure. Conclusi e sviluppi futuri sono nel capitolo 3.

2.1 Specifiche e Requisiti del sistema

In questa sezione vengono descritte 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 ultra-rapida (flash) [2],[4],[7],[9],[12],[13] per veicoli di trasporto pubblico urbano a trazione elettrica. L'attività descritta in questa report è rivolta allo

sviluppo 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 progettare 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.

2.1.1 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
Massa a vuoto	3500	kg
Massa a pieno carico	6300	kg
Resistenza di rotolamento	0.035	/
Coefficiente di resistenza aereodinamico	0.7	/
Area frontale	5.69	m ²
Interasse	3.080	m
Interasse anteriore	1.386	m
Interasse posteriore	1.694	m
Carreggiata	2	m
Raggio ruota	0.365	m
Rapporto di trasmissione	12.863	/
Efficienza di trasmissione	90	%

2.1.2 Sistema di accumulo

Le batterie da installarsi a bordo del minibus sono dimensionate in modo da garantire che il veicolo sia in grado di eseguire più volte il percorso designato dalla tratta riportata nella in

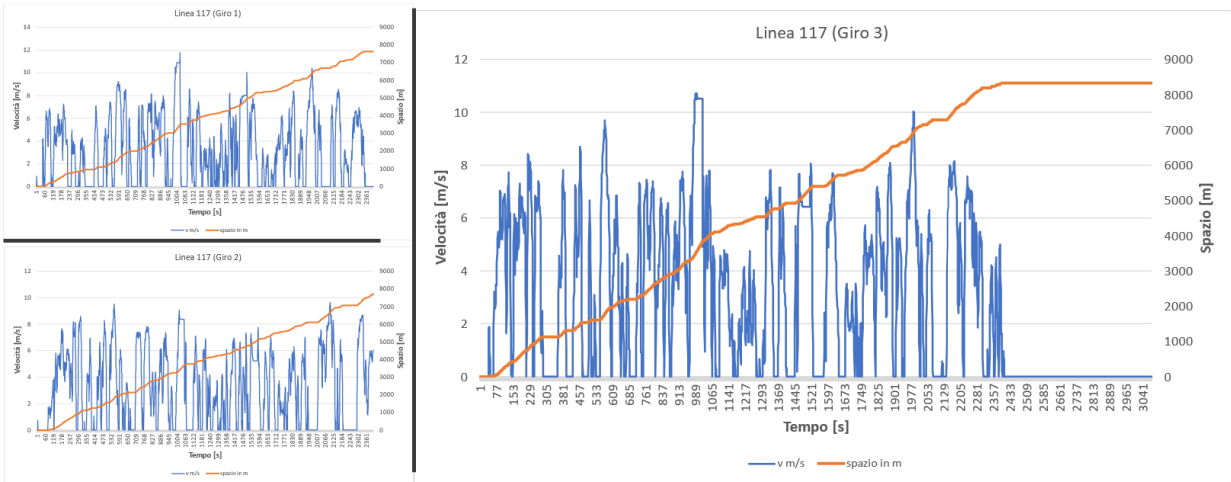


Figura 5 e riprodotta in simulazione come in Figura 6. Questo perché, per diversi motivi, la ricarica rapida al capolinea, eseguita con collegamento tramite pantografo, potrebbe essere ritardata rispetto quanto schedato (in base alla congestione del traffico o altri fattori), di durata ridotta o addirittura non disponibile (guasti o altri eventi, come la postazione occupata da veicoli). Di fatto, le celle del sistema vengono sovradimensionate rispetto alla capacità nominale sufficiente ad una corsa, proprio per scongiurare tutti gli eventi indesiderati detti. I requisiti del sistema di accumulo del minibus sono riassunti in Tabella 2.

Tabella 2 Parametri di progetto del pacco batteria a bordo del Tecnobus Gulliver

Parametro	Valore	Unità
Potenza massima in ricarica	40	kW
Corrente massima in ricarica	3.35C	/
Tensione nominale	300	V
Tensione massima	400	V
Tensione minima	200	V
Tensione nominale lato LV	72	V
Tensione massima lato LV	90	V
Tensione minima lato LV	60	V
Energia	12	kWh

2.1.3 Sistema di trazione

Il veicolo è equipaggiato con un sistema di trazione elettrico, le cui principali specifiche sono quelle di Tabella 3. Il motore aziona l'avantreno del veicolo ed in grado di far raggiungere al bus una velocità massima di circa 35 km/h, sufficiente nell'ambito di utilizzo del veicolo.

Tabella 3 Parametri del sistema di trazione a bordo del Tecnobus Gulliver

Parametro	Valore	Unità
Potenza massima	24.8	kW
Coppia massima	235	Nm
Velocità nominale	1039	rpm
Tensione nominale	72	V
Tensione massima	100	V
Tensione minima	60	V

2.1.4 Stazione di ricarica

Come detto precedentemente, la ricarica del bus avviene ad ogni corsa, presso il capolinea [2],[9],[10],[11],[12],[13],[14]. L'energia da ricaricare deve essere tale da garantire la completa ricarica della batteria, la cui capacità è dimensionata in modo che il veicolo sia in grado di percorrere l'intera corsa più

volte. Questo per consentire al pilota di riprendere la corsa anche se la completa ricarica al capolinea non fosse realizzabile. Il sistema progettato prevede un accumulatore statico alla fermata designata alla ricarica rapida, ed un collegamento elettrico realizzato mediante sistema a pantografo.

2.1.5 Sistema a Pantografo

La ricarica del bus, da effettuarsi al capolinea, avviene mediante sistema a pantografo [3],[5], le cui specifiche sono riassunte in Tabella 4. Come visibile in Figura 2 il dispositivo di collegamento è costituito da 3 sottosistemi:

1. Pantografo: è l'elemento mobile installato sul tetto del veicolo mediante apposito telaio, in grado di sollevarsi e realizzare collegamento elettrico con la cupola. Questo componente è costituito a sua volta da diversi elementi, utile a compensare deviazioni di mutuo posizionamento in direzione longitudinale, laterale e verticale.
2. Cupola di contatto: tipicamente montata su trave, ospita la testa del pantografo per garantire continuità del contatto elettrico;
3. Sistema di stoccaggio e fissaggio: quando il pantografo è scollegato elettricamente, deve essere fissato in posizione orizzontale. Il sistema di fissaggio assicura la posizione di riposo durante la movimentazione del veicolo, in modo da scongiurare possibili movimenti in direzione verticale e laterale. Inoltre, fornisce protezione da agenti ambientali, come polvere, foglie, rami, neve etc. È dotata di spazzole per pulire i contatti elettrici della testa del pantografo.

Tabella 4 Parametri del sistema di collegamento a pantografo

Parametro	Valore	Unità
<i>Corrente Massima continuativa (6 h)</i>	150	A
<i>Corrente Massima ric. rapida (15 min)</i>	500	A
<i>Corrente Massima pulsante (30 s)</i>	1000	A
<i>Tensione massima</i>	1000	V _{DC}
<i>Forza di Contatto</i>	250±10%	N
<i>Dimensione Pantografo (a riposo)</i>	2100(l)x1200(w)x475(h)	mm
<i>Altezza di Contatto Pantografo</i>	[1500;1800]	mm
<i>Peso Pantografo</i>	89	kg
<i>Dimensione Cupola</i>	1300(l)x770(w)x325(h)	mm
<i>Peso Cupola</i>	45	kg



Figura 2 Sistema a pantografo per collegamento elettrico durante ricarica rapida al capolinea

2.1.6 Accumulatore statico a volano

L'accumulatore di energia statico, da installarsi al capolinea, è di tipo inerziale; nella fattispecie, è stata adottata una soluzione con tecnologia a volano (anche detta flywheel) [1],[13]. In questo ambito, i volani presentano molteplici vantaggi rispetto alle altre tipologie di accumulatori investigate: le batterie al titanato di litio (LTO) ed i super-condensatori [2],[3],[5],[6],[9],[10]. Maggior affidabilità ed un conveniente rapporto prestazioni-costi hanno perciò orientato la scelta verso questi sistemi di accumulo di natura inerziale.

La ricarica della batteria del bus, che avverrà tramite collegamento a pantografo, sarà eseguita inizialmente a corrente costante, con un limite di potenza secondario, e successivamente a tensione costante. Il profilo di ricarica da adottare in ogni caso, è strettamente dipendente dal valore dello stato di carica SOC in cui si trova la batteria al momento della connessione alla stazione di ricarica. Tutte le grandezze elettriche saranno regolabili in un certo range di funzionamento. Il loro valore, dunque, è imposto dalle specifiche della batteria installata a bordo.

Come valori indicativi, possiamo avere ricariche a corrente costante fino a 180A e con tensioni fino a 450V. Durante la fase di ricarica la maggior parte della potenza è prelevata direttamente dall'accumulatore a volano. Tuttavia, qual ora la disponibilità della potenza dell'accumulatore statico sia limitata, è possibile prelevare una parte di energia dalla rete elettrica. La potenza complessiva è comunque limitata a 65 kW, valore strettamente legato allo stato in cui la rete elettrica di prova (quella del centro di ricerca ENEA) si trova ad operare. Per la stazione di ricarica a volano, visibile in Figura 3 si riportano le caratteristiche più importanti in Tabella 5. In specifico, la struttura del volano è composta dalle seguenti sezioni:

- *Volano*: costituito da un albero di supporto in acciaio bonificato sul quale vengono impilati 15 dischi, ciascuno del peso di 166 kg;
- *Motore/alternatore sincrono*;
- *Supporto e vincolo al suolo*;
- *Movimentazione*;
- *Vuoto*;

- Sistema di comando (cablaggi, tubazioni, etc.)

La struttura di supporto è realizzata tenendo conto della necessità di:

- Garantire la resistenza strutturale del sistema in tutte le condizioni di utilizzo e quindi le caratteristiche dimensionali;
- Garantire adeguati spazi per le ispezioni e le manutenzioni;
- Garantire la tenuta stagna (prevedendo guarnizioni tra le interfacce esterne);
- Garantire la robustezza (per carichi accidentali, trasporto, vuoto, etc.);
- Realizzare lavorazioni di precisione per assialità volano e centraggio, tolleranze.

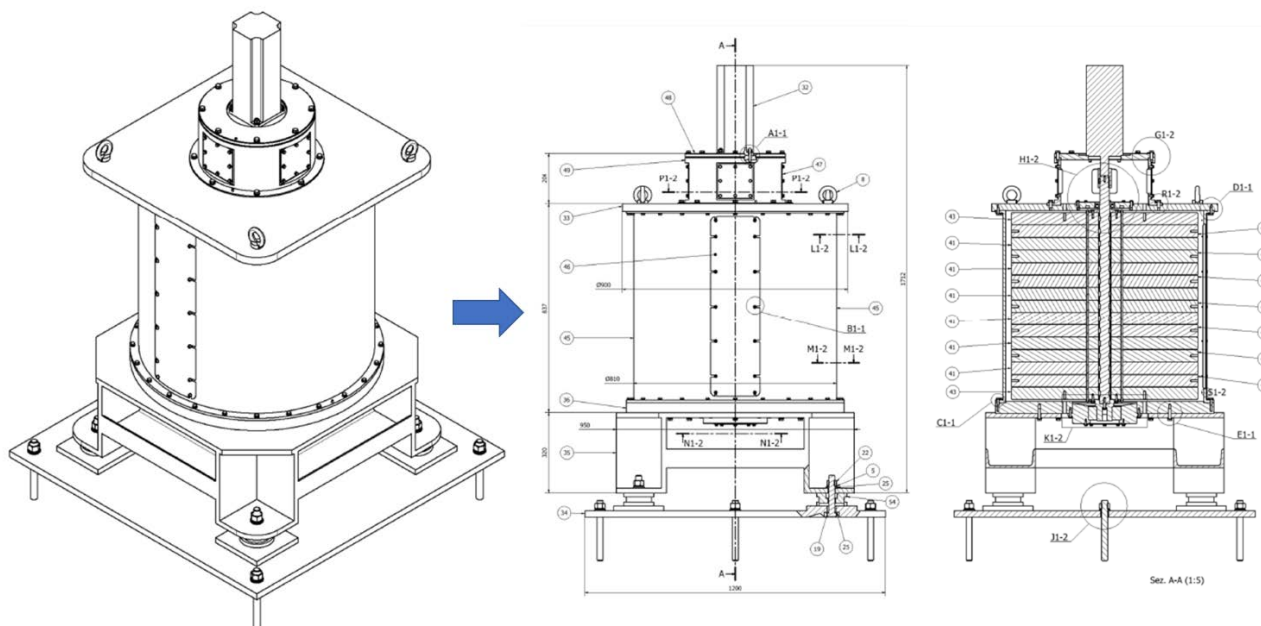


Figura 3 Accumulatore inerziale della stazione di ricarica rapida con volano (Flywheel)

Tabella 5 Parametri di dimensionamento dell'accumulatore statico della stazione di ricarica rapida

Parametro	Valore	Unità
Velocità di rotazione	2000-4000	rpm
Coppia Motrice MAX	60	Nm
Diametro esterno	742	Mm
Altezza	750	mm
Massa	2500	kg
Momento di Inerzia	171.41	Kgm ²
Rendimento Motore/alternatore	93	%
Potenza	20.32	kW
Corrente massima di ricarica	180	A
Tensione massima	450	V
Energia	9754/2.704	kJ/kWh

2.1.7 Convertitore DC/DC

Dai paragrafi precedenti di questo capitolo si possono evincere i vincoli di progettazione principale del sistema di conversione potenza elettrica DC-DC tra batteria e motore del bus. Infatti, i parametri di

accumulatore e sistema di trazione stabiliscono le condizioni al contorno per la scelta del convertitore, riassunte in Tabella 6.

Da questa trattazione si evince come le specifiche del sistema di conversione potenza DC-DC, che dovrà interfacciare lato HV e lato LV, debba essere un convertitore chopper buck-boost con tensione a monte tra i 200 e i 400V e tensione a valle tra i 60 e i 100V.

Tabella 6 Parametri di dimensionamento del convertitore DC/DC

Parametro	Valore	Unità
<i>Potenza</i>	40	kW
<i>Tensione nominale (HV)</i>	300	V
<i>Tensione massima (HV)</i>	400	V
<i>Tensione minima (HV)</i>	200	V
<i>Tensione nominale (LV)</i>	72	V
<i>Tensione massima (LV)</i>	100	V
<i>Tensione minima (LV)</i>	60	V

2.2 Modello in Ambiente di Simulazione

Il design del sistema di trasferimento dell'energia da installarsi a bordo del veicolo passa dalla determinazione dei requisiti funzionali e di progetto dello stesso. L'attività di simulazione proposta dunque, risulta propedeutica rispetto agli intenti principali del progetto in esame.

Il processo di sviluppo virtuale è basato su metodologie model-based eseguite in ambiente di simulazione e risulta fondamentale per la determinazione delle caratteristiche e requisiti dei dispositivi coinvolti.

Il modello del veicolo elettrico è stato implementato in ambiente MATLAB Simulink ed è stato predisposto per la realizzazione di cicli guida di riferimento. Le telemetrie del percorso e del profilo di velocità della linea 117 dell'ATAC sono state acquisite nell'arco di 3 diverse corse, tramite GPS.

Il modello del veicolo elettrico è stato implementato in ambiente MATLAB Simulink ed è stato predisposto per la realizzazione di cicli guida di riferimento. Le telemetrie del percorso e del profilo di velocità della linea 117 dell'ATAC sono state acquisite nell'arco di 3 diverse corse, tramite GPS.

Gli intenti di questa attività di simulazione sono molteplici:

- Calibrare e validare il modello rispetto ai parametri di progetto;
- Stimare i consumi di energia, le correnti assorbite (sia dal sistema di trazione che dei sistemi ausiliari) e lo stato di carica finale.

2.2.1 Descrizione del modello

Il modello a 7 gradi di libertà (gdl), rappresentato in Figura 4, è composto da diversi blocchi, dedicati a simulare i sottosistemi del veicolo che appartengono a domini fisici eterogenei (meccanici, elettrici, elettronici, termici, etc.). I principali sono i seguenti:

- *Modello di pilota*: riceve in ingresso i cicli di guida di riferimento e fornisce in uscita 3 segnali adimensionali relativi a sterzo, pedale freno ed acceleratore.
- *Modello di veicolo*: presenta 3 gdl (direzione longitudinale, laterale e rotazione di imbardata). Comprende anche il modello di sterzo, basato su quadrilatero di Ackermann ed i modelli di pneumatico, con 1 gdl ciascuno (relativo alla rotazione lungo il proprio asse y). Quest'ultimo utilizza un modello di Pajecka [15] per modellare il contatto nell'interfaccia ruota-asfalto;
- *Controllore di Brake Blending*: risolve il problema di allocazione della coppia frenante tra freno idraulico ed elettrico, quando la rigenerazione è abilitata [16],[17],[18];
- *Modello di motore elettrico*: riproduce il comportamento reale del sistema di trazione elettrico, ricalcando la curva caratteristica ideale coppia-velocità con i due tratti iso-coppia ed iso-potenza [19];
- *Modello di freno idraulico*: in grado di applicare coppia frenante dissipativa mediante sistema tradizionale a disco [20],[21];

- **Modello di Batteria:** parametrizzato rispetto alle caratteristiche del sistema di accumulo scelto, fornisce indicazioni su corrente, tensione e potenza di batteria, computando inoltre lo Stato di Carica in tempo reale.
- **Sistema di visualizzazione di risultati:** consultabile in real-time durante l'esecuzione delle simulazioni.

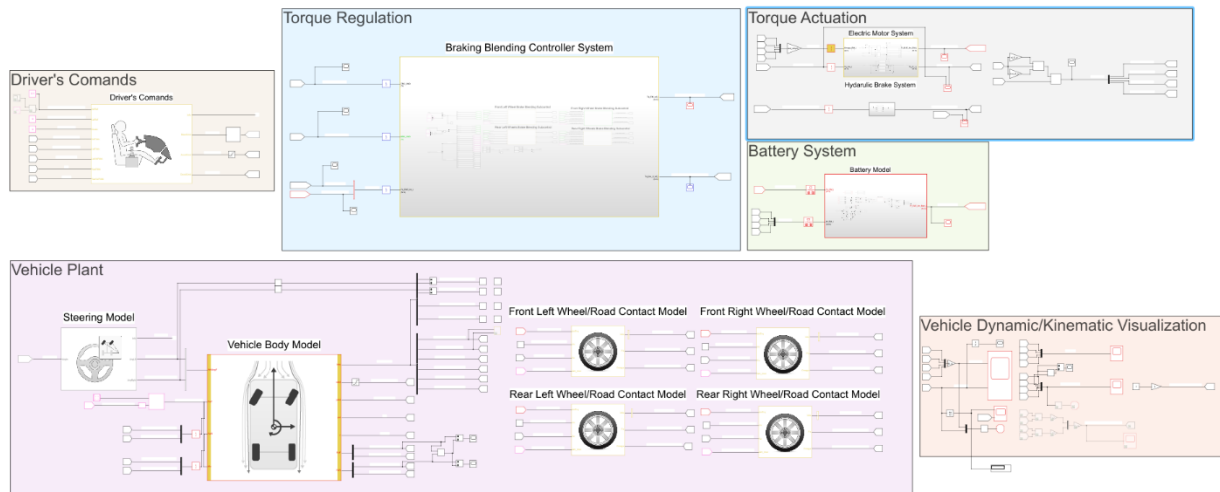


Figura 4 Modello MATLAB Simulink del Tecnobus Gulliver relativo alla sperimentazione in oggetto

2.2.2 Risultati delle simulazioni

Per adempiere agli intenti della modellazione del bus elettrico, abbiamo fatto riprodurre al veicolo virtuale alcuni cicli guida. I riferimenti di velocità sono stati acquisiti tramite gps sulla linea 117 di ATAC. Le telemetrie relative alle 3 corse di un Tecnobus Gulliver sono visibili in

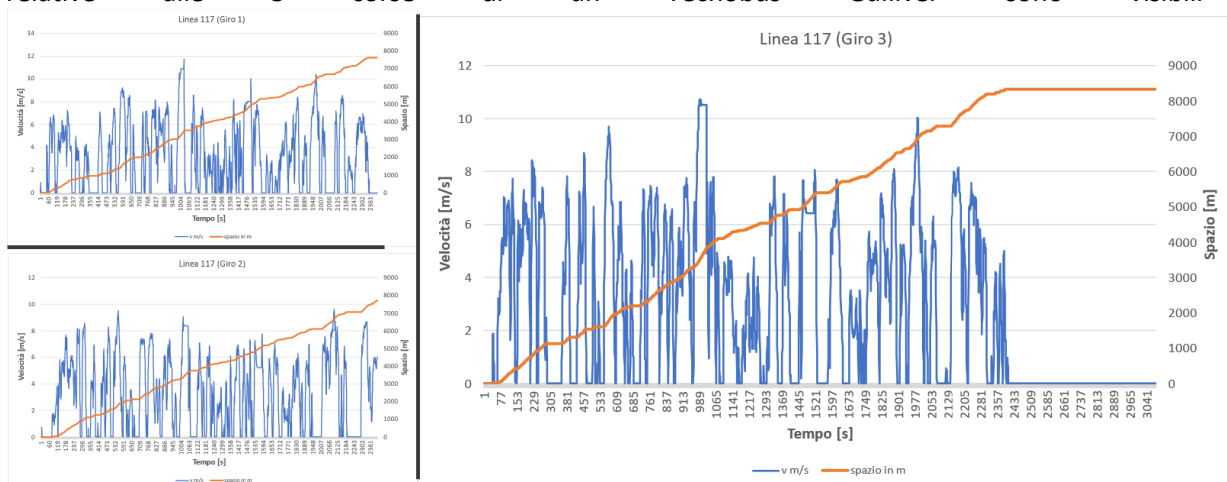


Figura 5. La Figura 6 si riferisce ad i risultati dei cicli simulati tramite il modello MATLAB Simulink proposto, che mostra il profilo di velocità ed il relativo consumo di energia tramite la curva dello Stato di Carica (SOC).

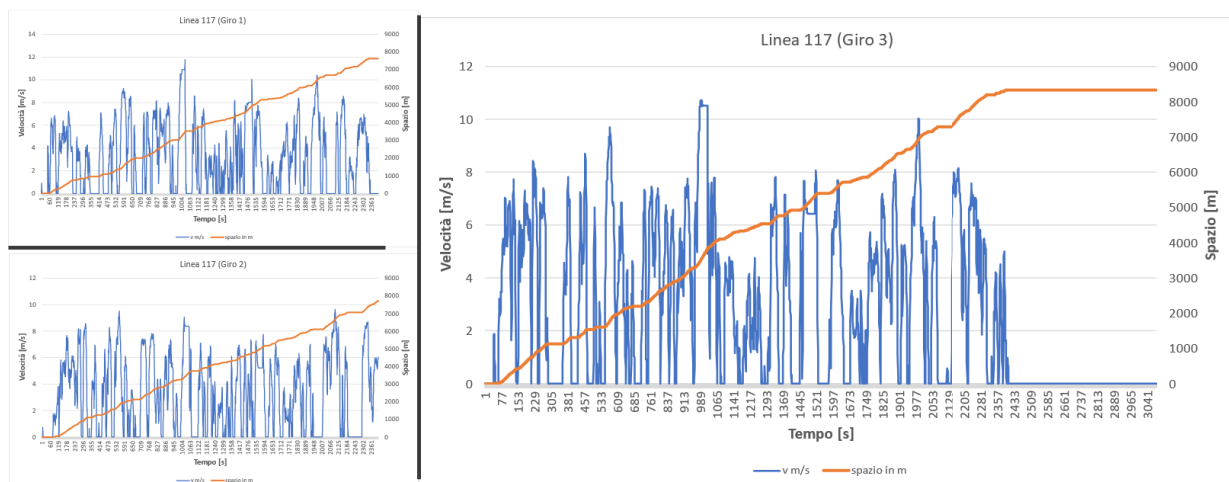


Figura 5 Cicli guida della linea ATAC 117 rilevati tramite gps simulati con il modello MATLAB Simulink

È evidente come il dimensionamento proposto è in accordo a quanto richiesto tramite le specifiche di progetto: il veicolo riesce a terminare con successo ogni singola corsa della linea, con uno SOC residuo di circa il 75%, margine di sicurezza più che accettabile. Infatti, qualora la ricarica al capolinea non fosse disponibile, la batteria ha ancora una quantità di energia residua sufficiente a permettere due ulteriori corse prima di richiedere una ricarica. Si fa notare come il consumo a veicolo fermo non sia nullo; i servizi essenziali del veicolo devono essere garantiti (sistema di regolazione termica, display e computer di bordo, alimentazione sistema apertura porte, etc.), perciò in fase di simulazione abbiamo considerato un consumo ad onda quadra (Figura 7).

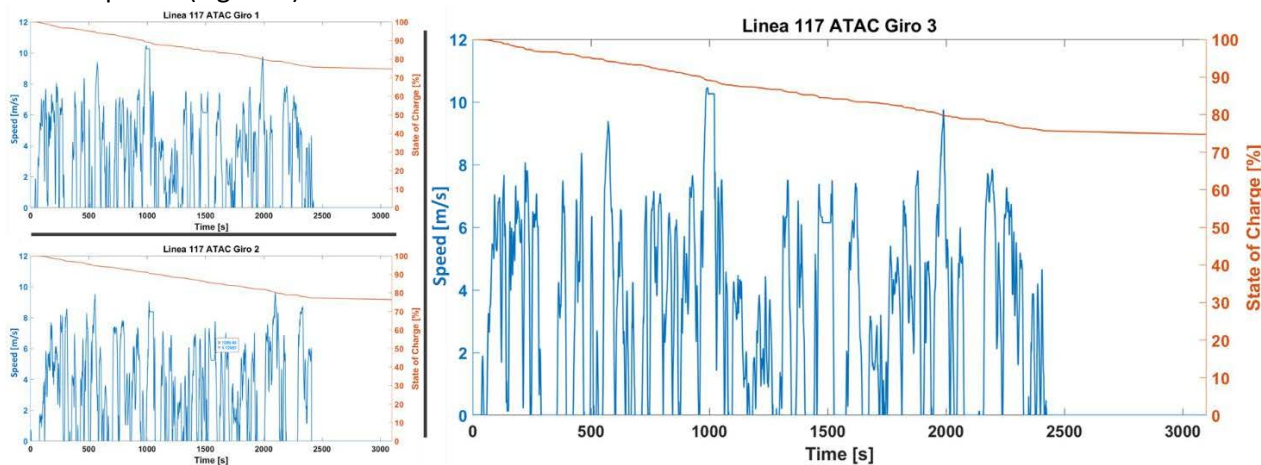


Figura 6 Ciclo guida della linea ATAC 117 simulato nel modello MATLAB Simulink e andamento SOC

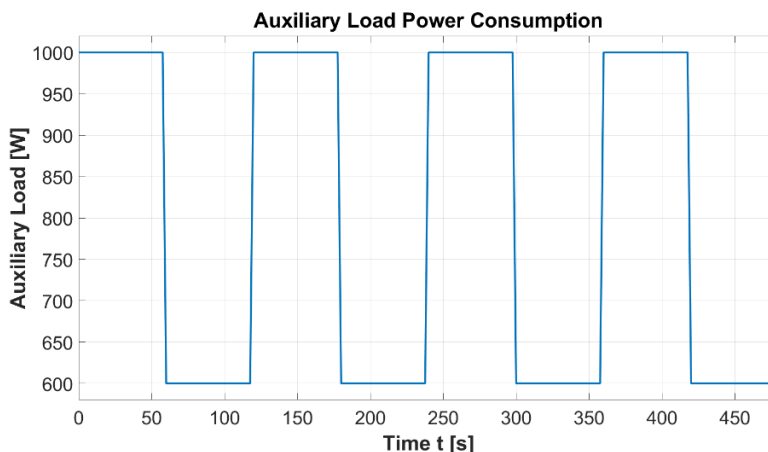


Figura 7 Andamento del consumo di potenza dei sistemi ausiliari

Tramite il modello di simulazione descritto in questo capitolo è stato possibile verificare che il dimensionamento del sistema di accumulo fosse compatibile con le prestazioni richieste. La capacità della batteria, infatti, è idonea a garantire un drive range in linea con quanto richiesto.

2.3 Progettazione del sistema di conversione potenza DC/DC

In questo capitolo è descritta la procedura di progettazione del sistema di conversione potenza in corrente continua [7],[8],[9]. I convertitori del sistema dovranno risultare adeguati sotto diversi punti di vista:

1. *Prestazionale*: questo requisito è soddisfatto scegliendo una soluzione che rispetti le i vincoli progettuali determinati al Capitolo 1 e riassunti in Tabella 6;
2. *Ingombri*: le dimensioni del sistema di conversione, comprensivo di convertitori, batteria e relativi componenti, devono rispettare i vincoli di spazio disponibili;
3. *Affidabilistico e funzionale*: garantendo un funzionamento corretto e sicuro in tutte le situazioni operative in cui si troverà a funzionare, sia durante l'attività di sperimentazione e caratterizzazione, sia durante la messa in servizio.

Il requisito 1 è soddisfatto scegliendo dispositivi che siano compatibili con le prestazioni di riferimento, definite al capitolo precedente. L'appropriatezza del sistema considerato con il requisito 2 è verificata tramite attività di assemblaggio virtuale del sistema all'interno del cassone designato, con l'ausilio di strumenti software CAD. Il soddisfacimento del requisito 3 invece è investigato tramite l'attività di caratterizzazione del convertitore, descritta nella sezione 2.4, che fa riferimento alla realizzazione di un banco prova specificamente realizzato a questo proposito. 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.

È evidente che gli aspetti prestazione e di ingombro debbano essere verificati in una fase preliminare, antecedente all'installazione del sistema convertitore, per evitare di operare con un sistema non adeguato per specifiche ed ingombri. L'aspetto affidabilistico/funzionale invece è oggetto della sperimentazione tramite banco prova, e prevede una corretta integrazione con i sistemi ausiliari previsti.

2.3.1 Convertitori DC-DC: indagine di mercato

La scelta dei convertitori DC-DC da impegnare in questa attività è coadiuvata alla determinazione delle prestazioni desiderate, nonché ai limiti di ingombro dettati dal veicolo.

È dunque opportuno, innanzitutto, determinarne i requisiti principali, così da poter individuare le prestazioni di riferimento a cui gli elementi del sistema devono attenersi. Una volta individuata la configurazione d'impianto di riferimento si è proceduto alla scelta dei componenti che compongono il sistema tramite un'indagine di mercato.

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 sono state individuate 2 principali. I criteri che ci hanno condotto al confronto tra queste soluzioni sono il costo, la disponibilità e la facilità di controllo/interfacciamento, oltre alle caratteristiche elettriche e di potenza in accordo ai requisiti.

TAME Power Converter

La prima soluzione investigata è rappresentata dai convertitori proposti dalla TAME Power, con i modelli Convy prodotti nelle 2 configurazioni con raffreddamento ad aria o a liquido (Figura 8).

Smart DCDC Converter Reversible

CONVY productline - Air cooled version



Smart DCDC Converter Reversible

CONVY productline - Liquid cooled version



Figura 8 Convertitori DC-DC Tame Power Convy con raffreddamento ad aria (sinistra) e a liquido (destra)

Relativamente all'applicazione in oggetto, un parametro interessante da osservare riguarda la politica di derating della potenza al lato LV dei convertitori, visibili in . Come si evince, è necessario l'utilizzo di più unità in parallelo per sopperire ad una potenza massima di 40kW. La soluzione con raffreddamento a liquido garantisce un livello di dimensionamento maggiore, con potenze tollerate nettamente superiori. Tuttavia, per questa analisi si considera solo la configurazione con raffreddamento ad aria. I motivi sono molteplici: maggior semplicità di implementazione (non è richiesto sistema di raffreddamento a liquido, che risulta maggiormente complesso, costoso e ingombrante, oltre che richiedere un'approfondita analisi sull'affidabilità); la disponibilità dello stesso (era stato già acquistato ed utilizzato durante attività sperimentale passata) ed il costo più contenuto (considerata la compatibilità con i requisiti di progetto). Riguardo la soluzione raffreddata ad aria, osservando la curva di carico ammessa (Figura 9 a sinistra), è necessario considerare l'utilizzo di più convertitori in parallelo: per garantire l'erogazione della potenza di picco con una tensione LV di circa 100V sarebbero necessari 4 convertitori TAME Power air cooled. Le ridotte prestazioni di questo convertitore fanno propendere per l'utilizzo di una soluzione alternativa.

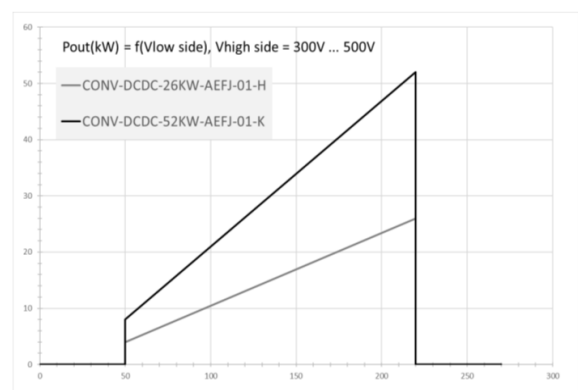
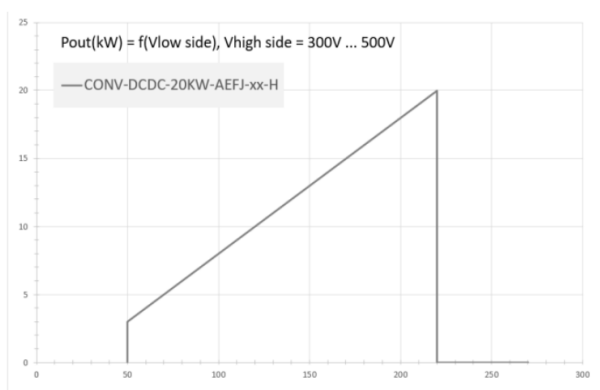


Figura 9 Curve di potenza dei convertitori TAME Power Convy, rispettivamente con raffreddamento ad aria (sinistra) e a liquido (destra)

Zekalabs Converter

L'alternativa è rappresentata dalla proposta di Zekalabs Converter. Anche in questo caso vengono messe a confronto due configurazioni con potenze e voltaggi HV molto diversi tra loro (Figura 10).

LB-1024-01 DC/DC REDPRIME

200kW, 750V DC/DC converter



LB-1071 DC/DC REDPRIME

40kW / 450V DC-DC converter



Figura 10 Convertitori DC-DC Zekalabs Converter da 200kW (sinistra) e da 40kW (destra)

Questi convertitori hanno caratteristiche prestazionali e funzionali senz'altro in linea con le nostre esigenze operative. Il modello da 200kW è estremamente sovradimensionato. Sarebbe sufficiente utilizzare un convertitore Zekalabs di piccola taglia. Tuttavia, per ragioni di sicurezza e di possibili 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. A differenza della loro controparte targate Tame Power, la soluzione proposta da Zekalabs non necessita di derating della potenza nominale impegnabile in funzione della tensione presente ai capi dei connettori di potenza.

Dai dati di Tabella 7 si evince come questa soluzione sia compatibile con i criteri di progettazione definiti al Capitolo 1. Si è dunque optato per questa configurazione, procedendo all'acquisto di una coppia di convertitori LB-1071. Questi sono equipaggiati con relative scatole contattori LB-1111-1 (Figura 11), necessari per la fase di precarica dei dispositivi di conversione.

Tabella 7 Parametri del convertitore DC/DC Zekalabs LB-1071

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

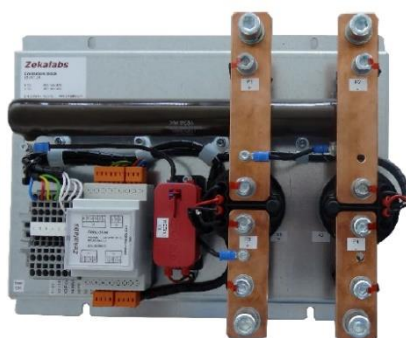


Figura 11 Scatola contattori di precarica LB-1111-1 dei convertitori DC-DC Zekalabs LB-1071

Soluzione scelta

Lo schema di montaggio del sistema di conversione potenza scelto è raffigurato in Figura 12 e prevede di collegare al lato B la parte HV (nel nostro caso la batteria a 330V), 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 da ambedue i lati dei convertitori DC.

2.3.2 Batteria: Indagine di mercato

Il sistema di accumulo da installarsi a bordo veicolo deve rispettare le specifiche di Tabella 2. Le batterie candidate per questo caso studio sono messe a confronto, in modo da individuare la soluzione che meglio si presta all'applicazione in oggetto. Anche in questo caso, le alternative a confronto sono due: la scelta finale è basata su criteri di compatibilità elettrica, meccanica (ingombri), facilità di utilizzo ed interfacciamento, nonché convenienza economica.

Impact Clean Power Technology

La prima batteria investigata è rappresentata dalla soluzione proposta da Impact Clean Power Technology. I battery pack *Uves LTO standard* vengono realizzati in 2 formati, visibili in Figura 13, i cui parametri sono riassunti in Tabella 8.

Tra le due configurazioni, la prima risulta quella preferibile, considerato che gli ingombri che richiede risultano maggiormente compatibili con lo spazio a disposizione a bordo veicolo: questa dovrà essere installata nel cassone posteriore del minibus, insieme al sistema di conversione potenza e relativi sottosistemi (controllore CAN, BMS, contattori, fusibili, etc.).

Il sistema di accumulo considerato è corredato di relativa "Safety Box", che dovrà essere necessariamente tenuta di conto nel computo degli ingombri (Figura 14). Quest'ultima contiene il Battery Management System (BMS) ed il data logger.

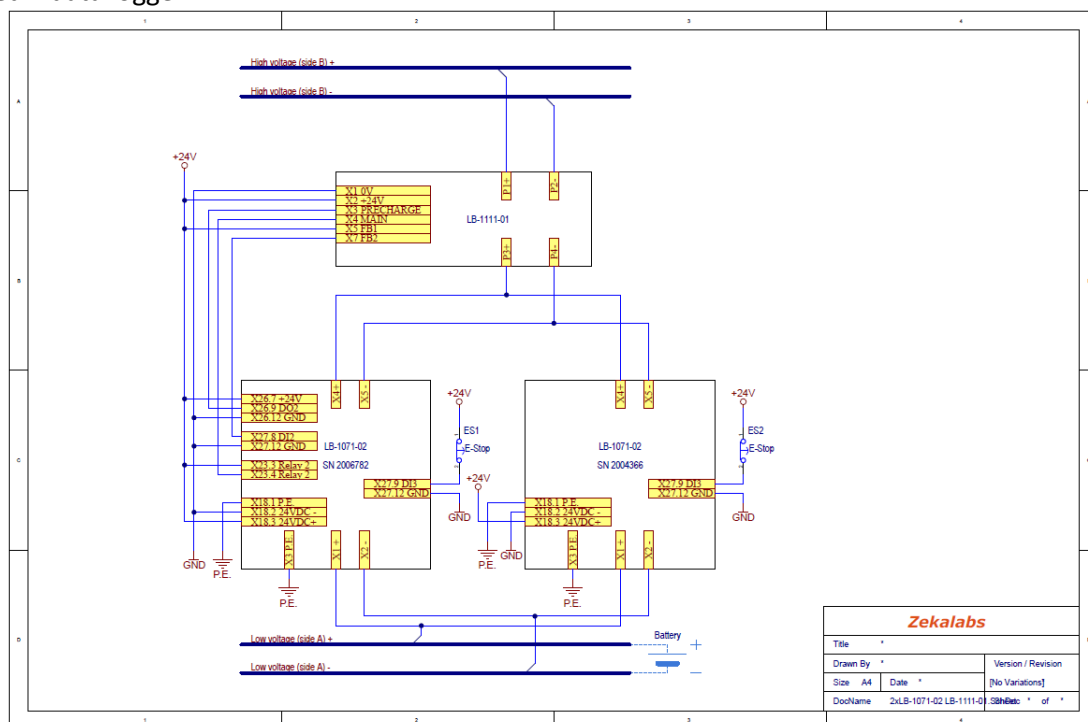


Figura 12 Schema di montaggio di convertitori DC-DC Zekalabs LB-1071 e blocco contattori LB-1111-1



Figura 13 Configurazioni dei pacchi batteria LTO proposte da Impact

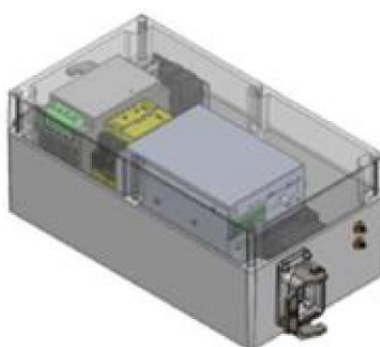


Figura 14 Safety Box della batteria proposta da Impact

È importante tener di conto che questa batteria necessita di un sistema di raffreddamento a liquido, misto 50% H₂O e 50% glicole, che sia in grado di dissipare una potenza termica di 1kW. Il suo dimensionamento e scelta verrà nel prossimo sotto-capitolo.

Tabella 8 Parametri della batteria 144S2P Impact Technology

Parametro	Valore	Unità
Capacità nominale	46	Ah
Energia Nominale	15.2	kWh
Corrente max in scarica continuativa	200	A
Corrente max in scarica pulsante (10s)	400	A
Corrente max in carica continuativa	200	A
Corrente max in carica pulsante (10s)	400	A
N rami in parallelo	1	/
Tensione nominale (cella)	2.4	V
N celle in serie	138	/
Tensione nominale	331	V
Tensione massima	389	V
Tensione minima	288	V
Temperatura ammessa	[-30;45]	°C

Sistema di raffreddamento batteria Uves LTO standard

La batteria impiegata richiede l'utilizzo di un sistema di raffreddamento a liquido misto H₂O e glicole (50/50) che sia in grado di smaltire 1kW di potenza termica con una portata di 10 l/min.

Per un corretto dimensionamento del gruppo radiatore-ventola a partire dalle specifiche dette, si consideri le seguenti ipotesi:

- La conduzione degli elementi metallici non rappresenta un fattore limitante;

- Il meccanismo di scambio calore per convezione tra aria e metallo sia superiore allo scambio per irraggiamento. Questa approssimazione è valida tanto più per sistemi con convezione forzata.

Sulla base di queste considerazioni, si suppone uno scambio termico ad 80°C ridotto del 25%, rispetto a 40°C. In primis, si calcola la potenza specifica di scambio P_{spec} , come rapporto tra la potenza termica da smaltire P ed il salto termico ΔT . Come detto sopra si considera un coefficiente di sicurezza k_s pari a 4/5. Si è proceduto supponendo le condizioni operative maggiormente gravose e proibitive. Nello specifico, abbiamo considerato temperatura ambiente di 40°C ed una temperatura di batteria di 45°C.

$$P_{spec} = k_s \frac{P}{\Delta T} = 0.8 \frac{1 \cdot 10^3}{(45 - 40)} = 0.16 \text{ kW/}^\circ\text{C}$$

Nota potenza specifica e portata, è stato possibile scegliere il sistema di raffreddamento a partire dalle curve caratteristiche dei fornitori, riportate in Figura 15.

Il sistema S2 sembra essere quello maggiormente appropriato, siccome garantisce la potenza specifica desiderata con una portata minima nettamente superiore a quella richiesta. In Figura 16 è visibile la messa in tavola del sistema di raffreddamento scelto e le relative quote dimensionali, espresse in millimetri. I parametri principali invece, sono riassunti in Tabella 9.

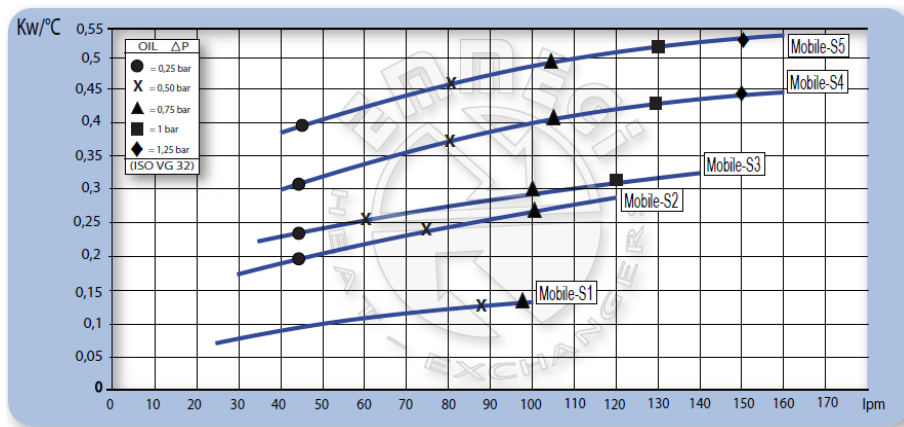


Figura 15 Curve caratteristiche dei sistemi di raffreddamento di tipo mobile S proposte da EMMEGI

Tabella 9 Parametri del sistema di raffreddamento S2 di EMMEGI

Parametro	Valore	Unità
Tensione di alimentazione	24	V _{DC}
Potenza nominale	0.08	kW
Velocità ventola	2350	rpm
Diametro ventola	Ø 280	mm
Peso	7.5	kg

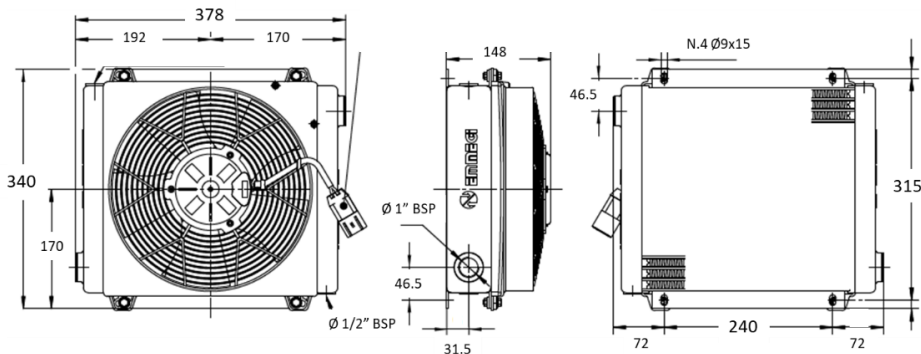


Figura 16 Messa in tavola con quote in millimetri del sistema di raffreddamento batteria S2 di EMMEGI

L'altro sistema di accumulo investigato è quello proposto dalla XBW Mechatronic Solutions, che utilizza un pacco batteria X-LiNano19646ENE con celle Kokam Li-Ion (Tabella 10)

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

- Battery Management System;
- Sonda di corrente a doppia scala;
- Teleruttori ad alta tensione su polo positivo e negativo;
- Circuito di precarica;
- Interruttore di disconnessione manuale con leva a due stadi;
- Dispositivo di monitoraggio dell'isolamento;
- Connettori per diagnostica, dati e potenza;
- Porta di comunicazione CAN Open;
- Contenitore e coperchio in ferro verniciato IP54;
- Sistema di ventilazione interno automatico;
- Predisposizione per scheda di comunicazione Wi-fi.

Tabella 10 Parametri della batteria X-LiNano19646ENE XBW Mechatronic Solutions

Parametro	Valore	Unità
Capacità Nominale	46	Ah
Energia Nominale	16.3	kWh
Potenza max di ricarica/scarica	40	kW
Corrente max in scarica continuativa	552 (12C)	A
Corrente max in scarica pulsante (10s)	690 (15C)	A
Corrente max in carica continuativa	138 (3C)	A
N rami in parallelo	1	/
Tensione nominale (cella)	3.7	V
N celle in serie	138	/
Tensione nominale	355	V
Tensione massima	408	V
Tensione minima	298	V
Temperatura ammessa	[-20;55]	°C

Rispetto alla controparte, questa soluzione ha diversi vantaggi: sistema di protezione e comunicazione CAN "incapsulato", con benefici dal punto di vista degli ingombri; la presenza di un sistema di monitoraggio dell'isolamento interno; la possibilità di non prevedere un sistema di raffreddamento attivo aggiuntivo (è presente un sistema di termoregolazione interno ad aria). Tuttavia, presenta anche alcuni svantaggi, come la necessità di effettuare derating di potenza sopra i 28°C e sotto i 22°C. Per temperature sotto lo zero e superiori a 45°C la ricarica è interrotta.

Super-condensatori Eaton

Tutti i sistemi elencati fin ora sono fondamentali per un corretto funzionamento del bus elettrico ma potrebbero risultare non sufficienti in particolari condizioni operative. Per esempio, all'accensione del veicolo o durante le fasi di transizione di funzionamento buck/boost dei convertitori, i valori di potenza richiesti potrebbero eccedere quella disponibile per brevi periodi di tempo. Pertanto, è opportuno prevedere, almeno in questa fase preliminare, la presenza di un sistema accumulo di backup destinato a coprire i transitori di potenza, evitando un sovradimensionamento della batteria primaria. A tal proposito abbiamo considerato la presenza di un banco di super-condensatori. La campagna di testing dei convertitori, oggetto Capitolo 4, ha tra gli obiettivi principali anche quello di verificare la necessità o meno di questo sistema di supporto. Si prenda in esame il prodotto proposto da Eaton, i super-cap serie XVM di Figura 17, i cui parametri sono visibili in Tabella 10.



Figura 17 Super-condensatori Eaton serie XVM

Per il dimensionamento abbiamo considerato la tensione nominale a cui il pacco super-cap è sottoposto, ovvero quella dell'azionamento (72V) secondo la seguente equazione, che stabilisce il numero di moduli da installare.

$$n_{sc} = \frac{V_{az}}{V_{scnom}} = \frac{72}{16.2} = 5.2 \cong 6$$

Per l'energia immagazzinata, abbiamo usato la seguente relazione:

$$E = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} \frac{(V_{max}^2 - V_{min}^2)}{C} \cdot \eta = \frac{1}{2} \cdot 65 \cdot (84^2 - 60^2) \cdot \frac{0.9}{3600} = 28.08 \text{ Wh}$$

2.3.3 Panoramica del sistema di conversione potenza DC/DC

Una volta individuati i componenti principali del sistema di conversione da progettare ed i relativi parametri funzionali, è possibile fornire una visione d'insieme dell'intero impianto in oggetto [4]. Si faccia riferimento all'impianto di Figura 18, in cui è riportato lo schema elettrico semplificato dell'intero sistema in oggetto; qui si possono trovare tutti gli elementi finora descritti ed i relativi collegamenti elettrici di potenza.

La comunicazione e l'interfacciamento tra i vari sottosistemi avviene tramite protocollo CAN-Open, il quale garantisce elevate velocità di trasmissione dati e alti livelli di robustezza rispetto a disturbi di carattere elettrico ed elettro-magnetico. Il controllo del sistema è realizzato mediante mini-PLC Barth, che esegue numerose funzionalità:

- Telemetria in tempo-reale delle grandezze elettriche e dello stato del sistema;
- Attuazione dei processi di inizializzazione, operatività, spegnimento e messa in sicurezza;
- Monitoraggio e diagnostica componenti.

A partire dallo schema di Figura 18, è importante andare ad analizzare possibili modalità di guasto non protette internamente dai componenti, in modo da predisporre opportune misure di sicurezza.

In relazione a questo punto, si consideri la Figura 19, che riporta lo schema di connessione dell'impianto al bus DC ad altra tensione. Ognuno dei componenti che si affaccia alla rete HV è protetto da contattori (pantografi, batteria e convertitori). Siccome il bus DC a bassa tensione non prevede nessuna capacità o batteria tampone, è evidente che i convertitori DC-DC dovranno essere collegati anche durante le fasi di ricarica tramite pantografo, altrimenti si perde l'alimentazione per i servizi di base del veicolo, come illuminazione, impianto di regolazione termica e apertura porte. Si consideri la seguente modalità di guasto: cosa accade se durante la carica, per qualche motivo (es. fusibile interno), si disconnette la batteria? Il rischio è associato proprio alle sovratensioni induttive, dovute all'interruzione di corrente, secondo l'equazione seguente.

$$V = L \frac{di}{dt}$$

La componente induttiva più preponderante è quella del convertitore della stazione di ricarica a volano. Per limitare l'effetto pericoloso, questo è dotato di zavorra capacitiva, in grado di assorbire l'energia associata a fenomeni induttivi dei componenti a valle.

Anche l'induttanza parassita dei cavi produrrà sovratensioni transitorie di valore difficilmente determinabile. Questo problema, tipico per impianti di questo tipo, è mitigato dai tempi di apertura dei sistemi di protezione:

l'arco che si forma dissiperà parte dell'energia passante. Inoltre, utilizzare sezionatori sotto carico come teleruttori e limitare la lunghezza dei cavi sono ottime soluzioni per limitare ulteriormente picco e durata delle sovratensioni.

Il convertitore DC-DC di potenza scelto (Zekalabs) garantisce un ulteriore grado di protezione, grazie alla rispondenza a norme specifiche di compatibilità elettromagnetica: nella fattispecie la **IEC 61000-4-4:2004** contro transienti elettrici pericolosi (fino a 2kV).

2.4 Progettazione meccanica ed ingombri

Il modello CAD del sistema di conversione DC-DC ed i relativi componenti è stato sviluppato in modo da verificare la congruenza del sistema proposto con i vincoli di montaggio ed ingombro sull'assieme bus. In particolare, è necessario che l'intero sistema da installare, che sarà preventivamente testato e montato presso i laboratori di Calenzano dell'Università degli Studi di Firenze, rientri in termine di volume e compatibilità nel cassone designato. Tuttavia, è fondamentale che il posizionamento dei diversi elementi nello spazio a disposizione sia tale da agevolare una serie di interazioni da parte degli installatori e manutentori. Infatti, sono stati considerati i seguenti criteri:

- *Ingombro e peso*: in modo da rispettare i vincoli imposti, in questo caso, dal cassone posteriore del Gulliver;
- *Facilità di installazione, accesso e verifica*: per garantire un accesso semplice e rapido da parte degli operatori, sia in fase di installazione che di revisione;
- *Compatibilità sistemi*: è importante far notare che nel suddetto alloggiamento devono coesistere dispositivi anche molto diverse tra loro, sia dal punto di vista dei livelli di tensione che da quello funzionale (sistemi di potenza, sistemi di controllo, sistemi di sicurezza e supervisione, etc.). Si ritiene dunque opportuno prestare particolare attenzione nella fase di posizionamento dei componenti alla mutua compatibilità, anche per assicurare un corretto afflusso di aria per il raffreddamento (per esempio, i convertitori Zekalabs sono corredati di ventole aggiuntive per la convezione forzata);
- *Sicurezza*: in modo da scongiurare eventi pericolosi (come corto-circuiti, urti, sovratemperature, etc.), salvaguardando gli operatori rispetto ad incidenti ed il sistema nei confronti di guasti e malfunzionamenti, sia durante il montaggio che l'operatività.

Tenendo bene a mente questi criteri di progettazione, sono stati eseguiti vari tentativi di posizionamento in ambiente virtuale CAD dei vari componenti coinvolti. Nello specifico, è previsto che l'intero sistema di conversione sia alloggiato nel cassone posteriore del Tecnobus. In fase iniziale era stato previsto che questo fosse suddiviso in 2 casse più piccole, detti "semi-cassoni" (visibile in Figura 20, sia per garantire separazione meccanica tra sistemi con funzionalità diverse (uno era destinato ad ospitare la batteria, nell'altro avremmo dovuto alloggiare i convertitori ed i dispositivi ausiliari) sia per agevolare il montaggio dei due sistemi in ambienti diversi (quali i laboratori dell'Università di Firenze a Calenzano che quelli di ENEA situati a Casaccia in provincia di Roma). Per completezza, è stato eseguito un tentativo di posizionamento anche nel cassone completo di Figura 21.

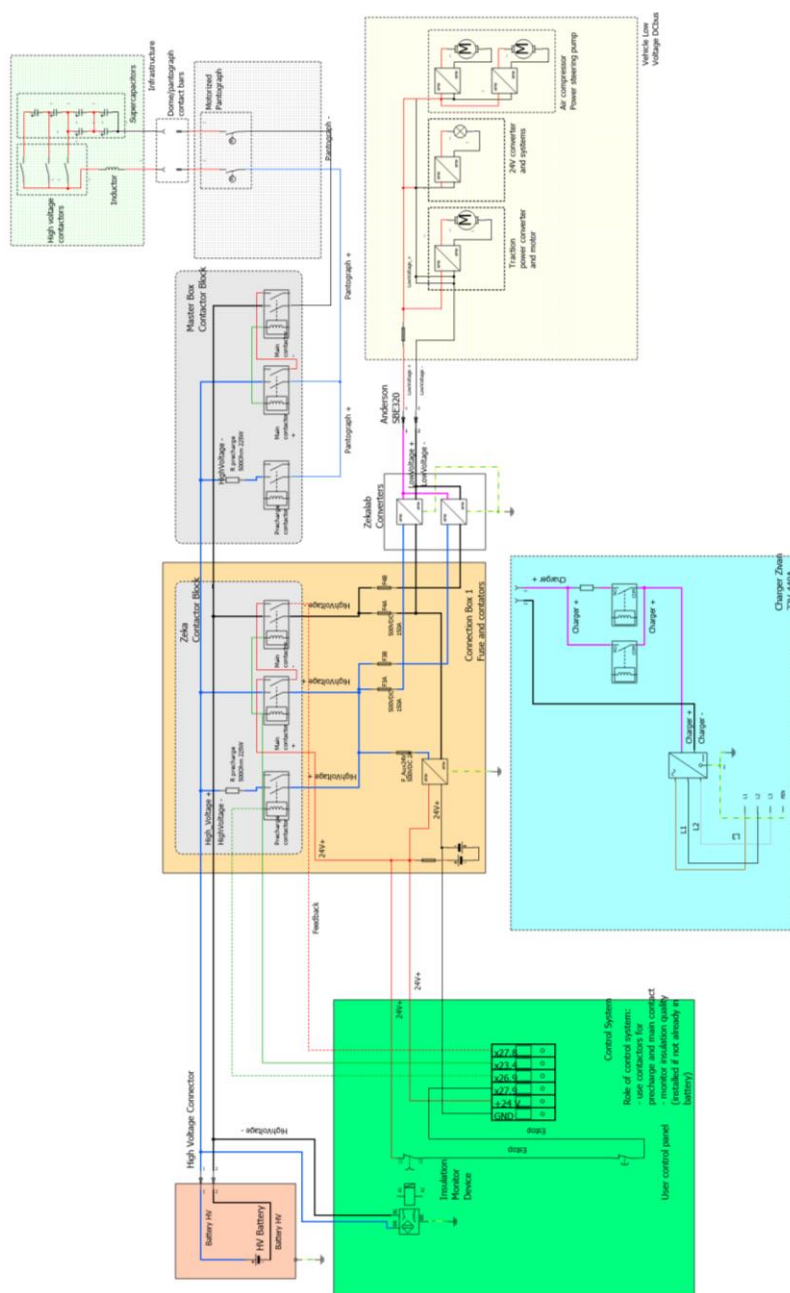


Figura 18 Visione d'insieme dell'impianto di conversione potenza DC-DC da progettare

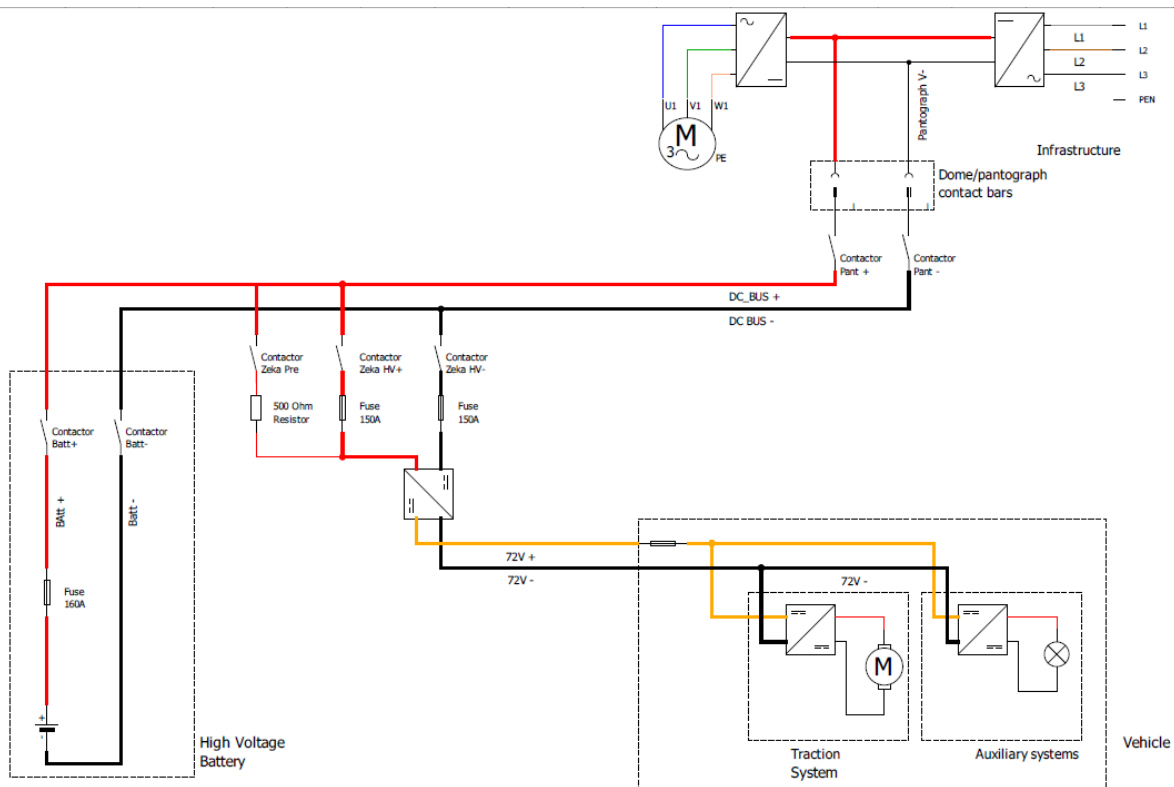


Figura 19 Analisi di specifica modalità di guasto: disconnessione batteria durante carica

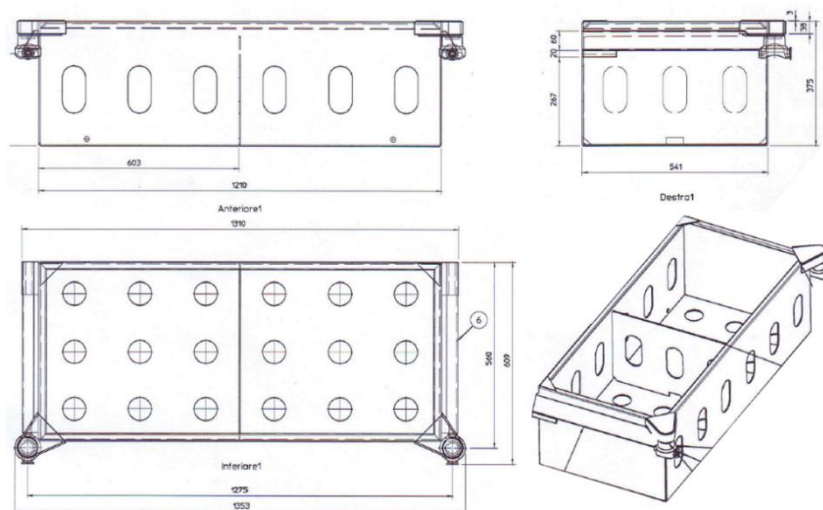


Figura 20 Viste con quote del semi-cassone posteriore del Tecnobus Gulliver

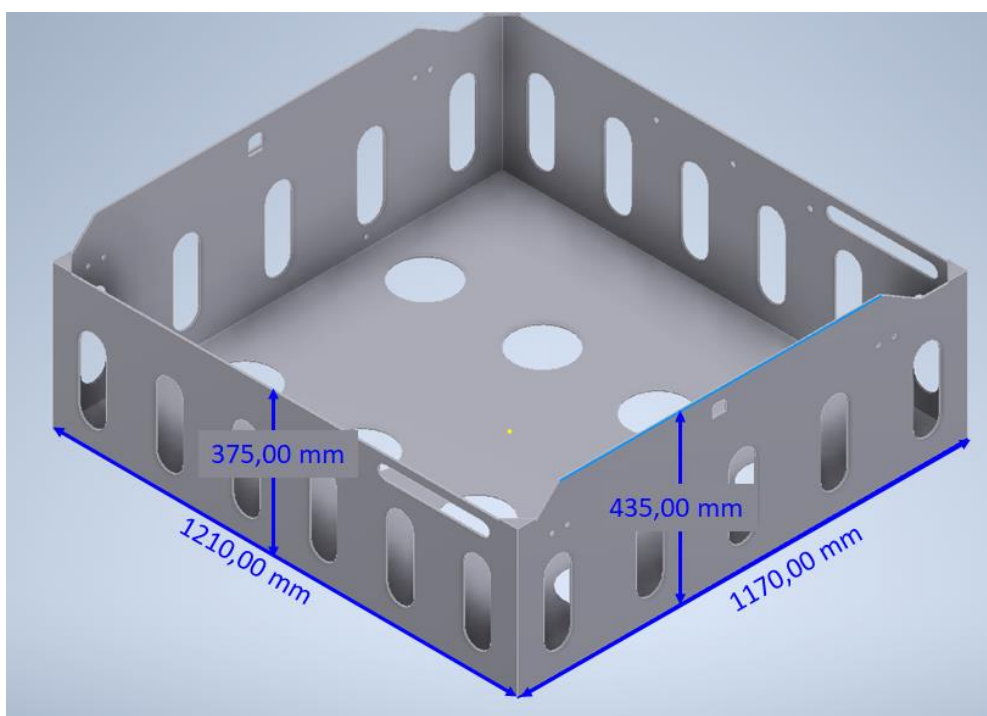


Figura 21 Modello CAD del cassone posteriore del Tecnobus Gulliver

2.4.1 Modello CAD

Per quanto riguarda il semi-cassone, in Figura 22 è visibile il modello dello stesso in cui sono installati i due convertitori e il pacco di super-condensatori. L'ulteriore spazio a disposizione è sufficiente ad ospitare anche i contactor block, l'unità di controllo ed i cavi di connessione.

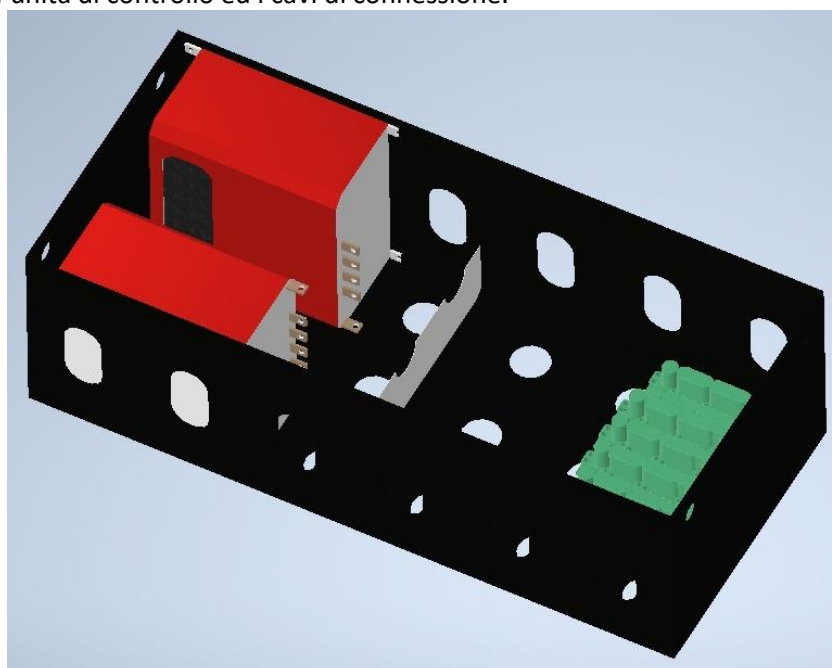


Figura 22 Modello CAD del semi-cassone con coppia di convertitori Zekalabs e pacco super-capacitori

Considerate le viste del cassone di Figura 21, è stato sviluppato anche un modello CAD 3D dello stesso e dei relativi sottosistemi da alloggiare [4]. Il modello è completato con le staffe di supporto e con la copertura in vetroresina, utile a verificare gli ingombri anche in direzione verticale.

Nella configurazione di Figura 23 possiamo vedere la soluzione di posizionamento ipotizzata. Questa prevede un setto separatore utile ad impilare scatola contattori e safety box della batteria in un livello superiore rispetto a batteria e convertitori.

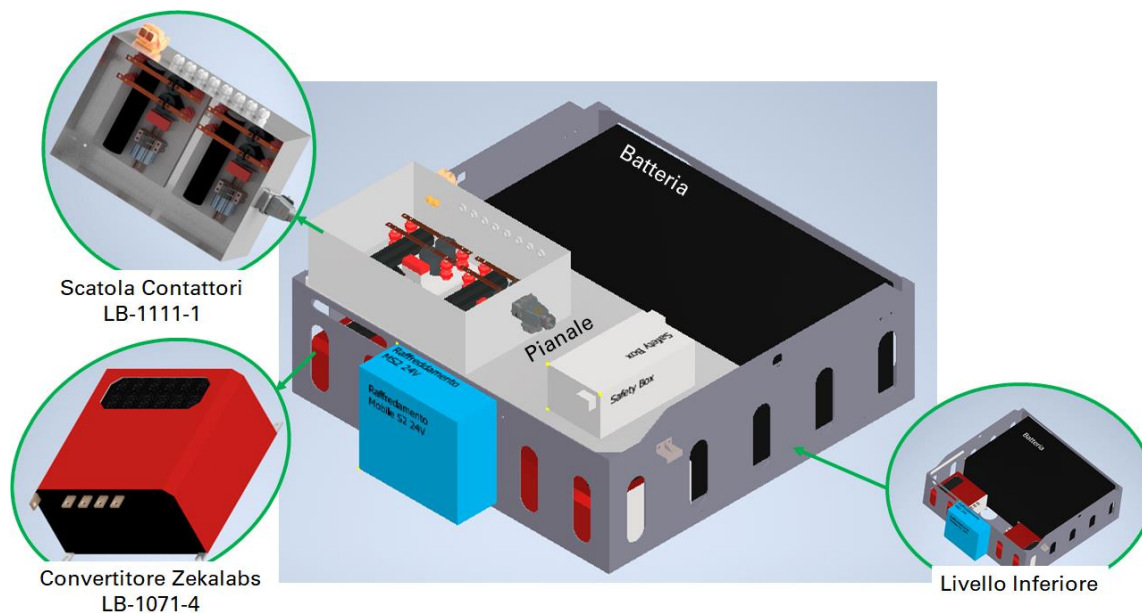


Figura 23 Modello CAD del cassone posteriore con elementi del sistema di conversione alloggiati

Nella vista di Figura 24 è visibile il cassone completo installato nelle staffe di supporto del bus, mentre in Figura 25 è possibile verificare la compatibilità della soluzione proposta con gli ingombri in direzione verticale, vincolati al pannello in vetroresina superiore.

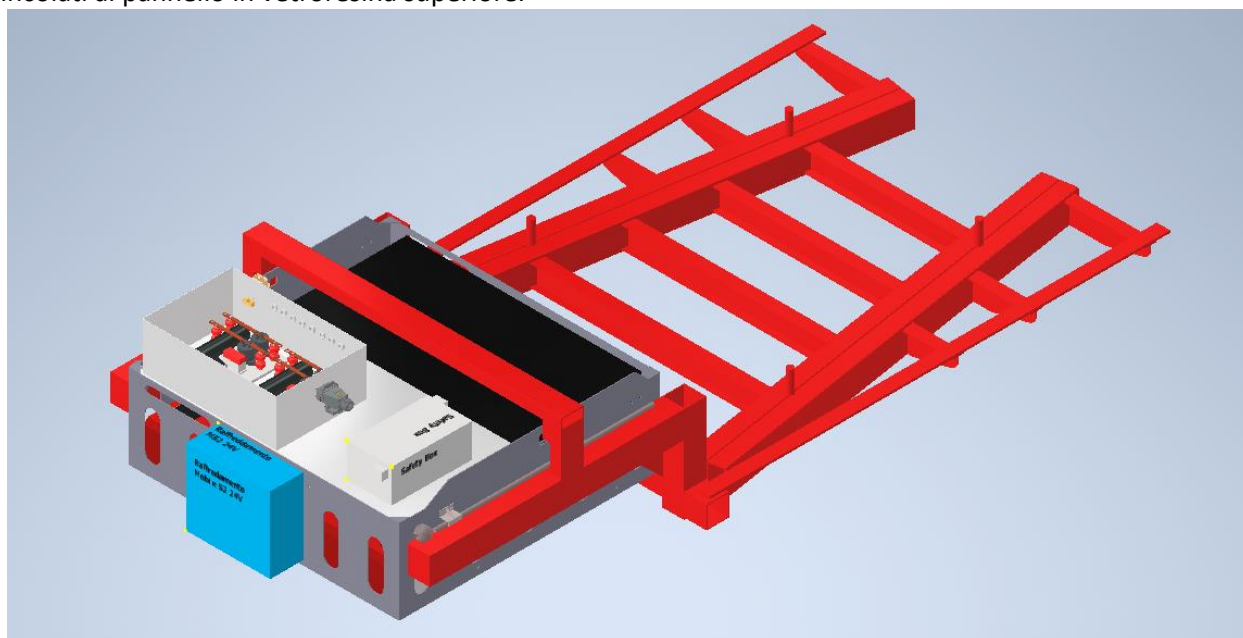


Figura 24 Modello CAD del cassone posteriore installato nelle staffe di supporto del bus

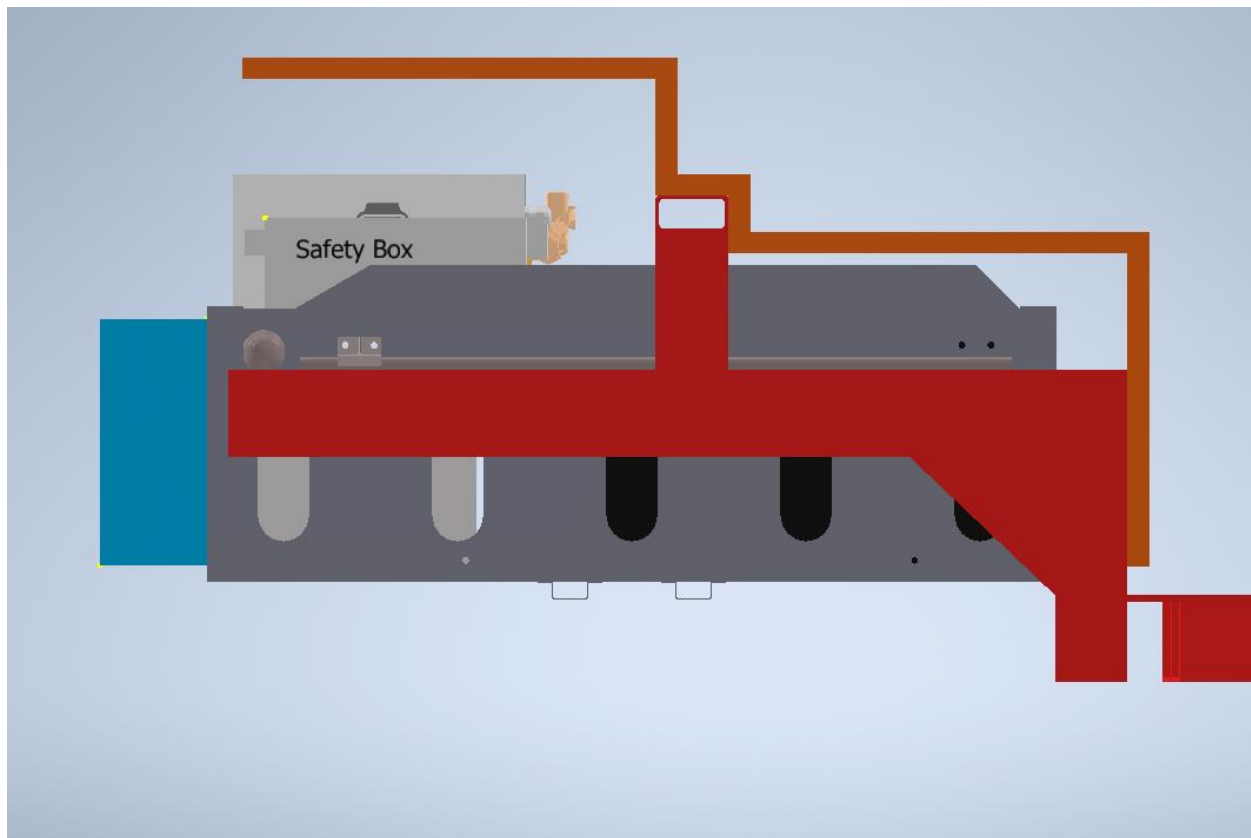


Figura 25 Modello CAD del cassone posteriore installato nelle staffe di supporto del bus con pannello in vetroresina

2.5 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 indentificare 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).

2.5.1 Layout e componenti del banco prova

Nella realizzazione delle prove, oltre al convertitore Zekalabs di Figura 10 ed il relativo blocco contattori di precarica di Figura 11, sono stati adoperati anche i componenti di Figura 26:

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

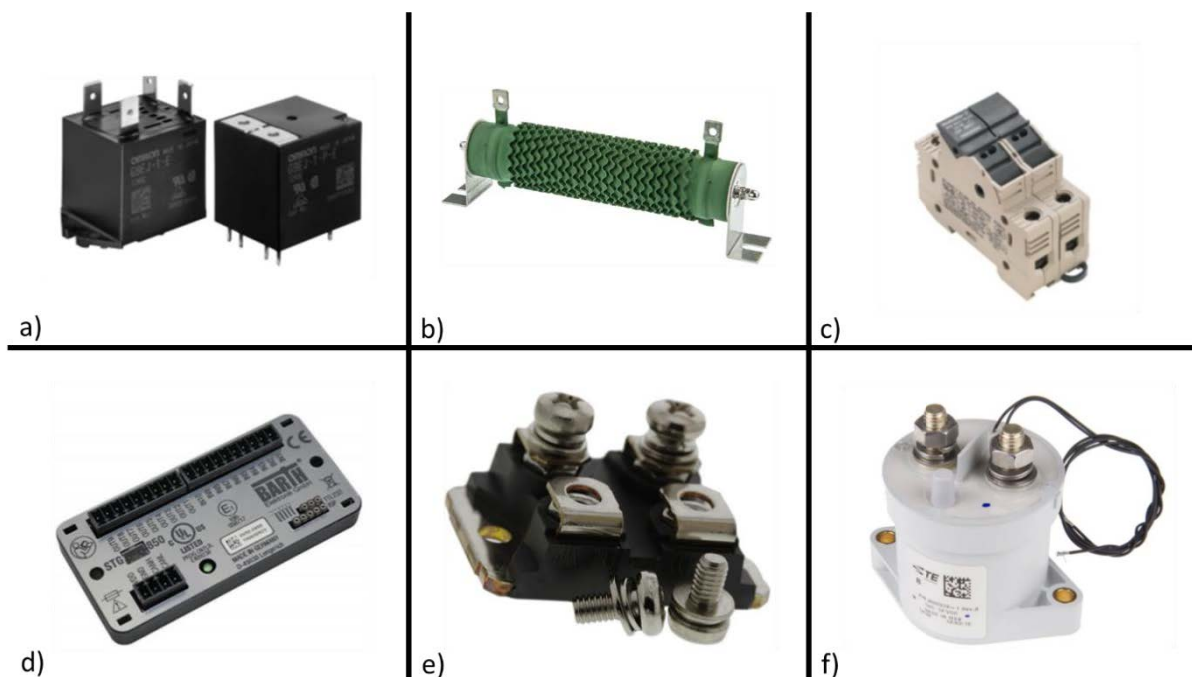


Figura 26 Dispositivi adoperati durante le prove di caratterizzazione dei convertitori Zekalabs

Per completare i test sono stati usati anche: un pacco batteria a 48V, relativo BMS, un caricabatteria Zivan NG1 (Figura 27), un carico ohmico composto da 2 stringhe di 4 lampadine a 12V ed un ciclomotore elettrico 48V da utilizzare come carico.



Figura 27 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, le altre verranno trattate nelle relazioni seguenti.

2.5.2 Test 1: Alimentazione lato LV

Per la realizzazione di questa prova è stato realizzato lo schema di Figura 30. 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 28. 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.

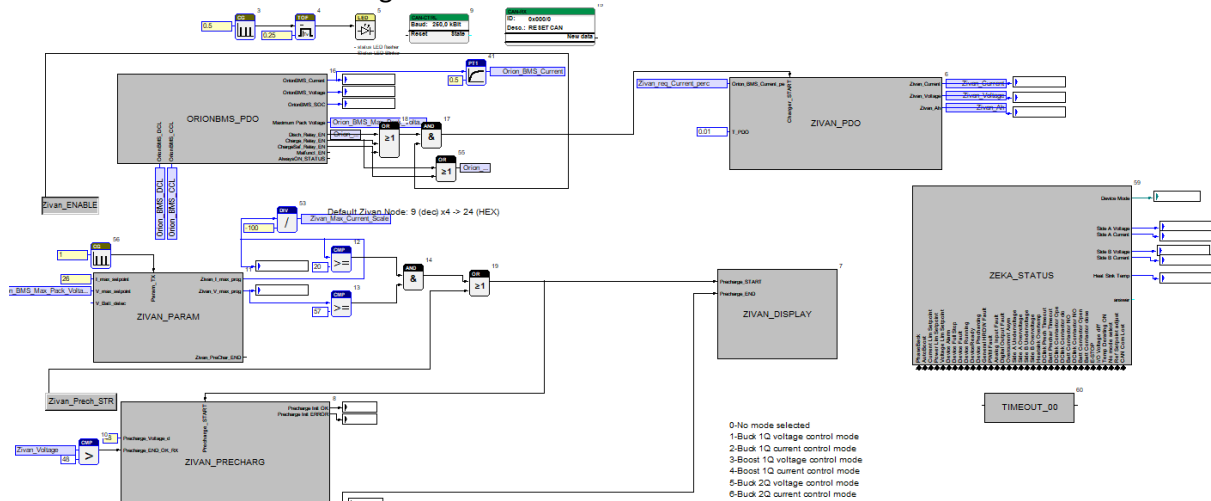


Figura 28 Software di controllo miCon-L prova 1 lato LV

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 29.

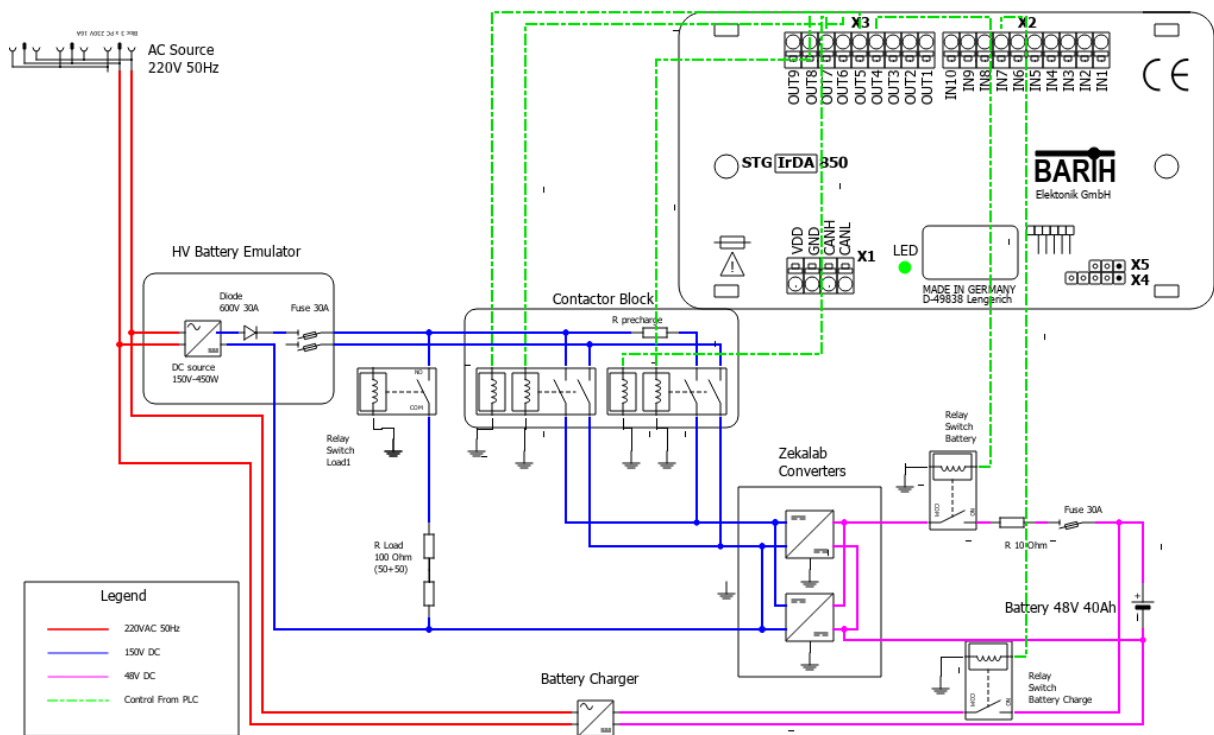


Figura 29 Schema semplificato del test 5 (Alimentazione lato HV - Lato LV con ciclomotore, batteria e carica-batteria)

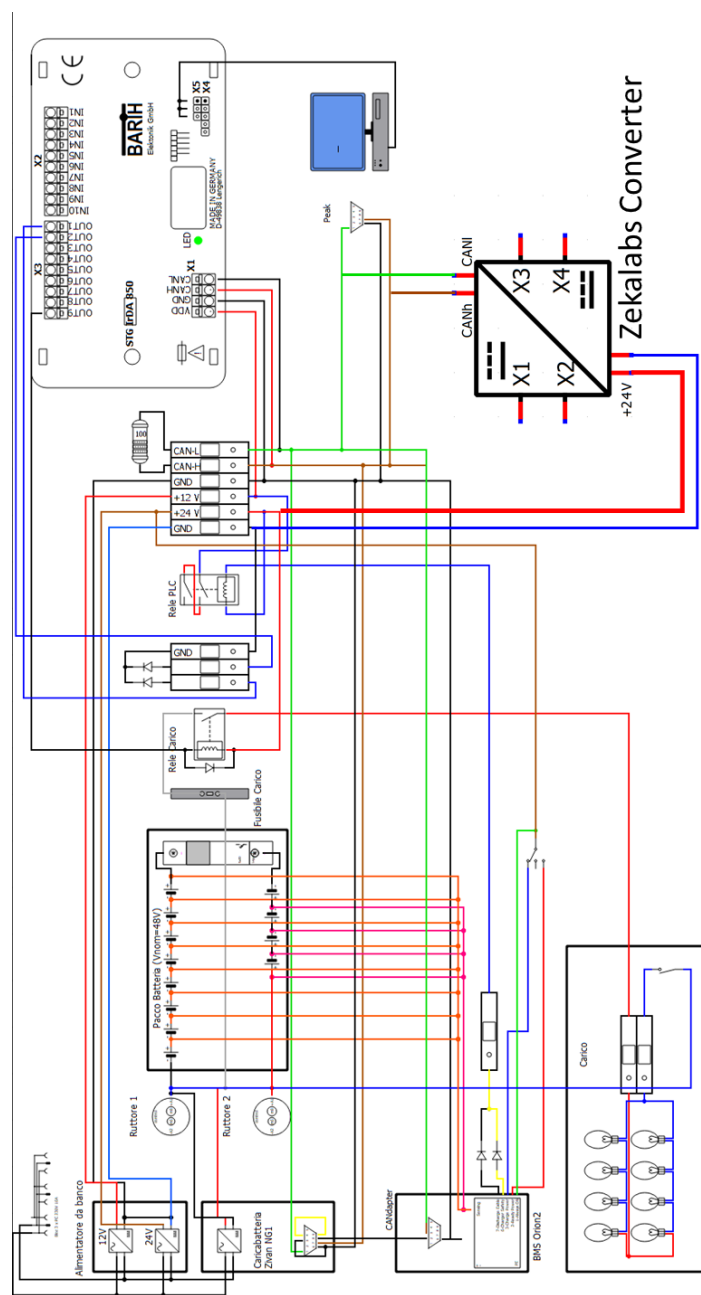


Figura 30 Schema di montaggio prova 1 lato LV

3 Conclusioni

Il presente report riassume le attività di progettazione preliminare rivolte alla progettazione del sistema di bordo per ospitare il nuovo sistema di accumulo e di trasferimento dell'energia, da installarsi su un Tecnobus Gulliver. In particolare, contiene tutte le specifiche di dimensionamento e le scelte progettuali, propedeutiche alla verifica di compatibilità elettrica e meccanica tra i diversi sistemi da interfacciare, quali sistema di accumulo del bus (batteria), convertitori di potenza DC-DC a bordo, stazione di ricarica a pantografo ed accumulatore inerziale a volano.

Inizialmente le specifiche elettriche dei sistemi sono descritte.

Un modello di simulazione del bus è stato implementato in ambiente MATLAB Simulink, facendo riprodurre al veicolo specifici cicli guida relativi all'applicazione investigata, in modo da verificare l'idoneità del dimensionamento supposto. I risultati sono in accordo a quanto atteso: la batteria è in grado di fornire le prestazioni desiderata.

Dopo un'indagine di mercato, batteria e sistema di conversione DC-DC sono stati scelti ed il layout generale d'impianto è stato proposto. Attività di supporto tramite disegno meccanico CAD sono state eseguite per verificare gli ingombri dei sistemi da installare nei semi-cassoni posteriori del Gulliver.

Infine, attività di testing delle prestazioni dei convertitori Zekalabs sono predisposte e test preliminari di interfacciamento tramite protocollo di comunicazione CAN Open sono stati eseguiti con successo.

4 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 (EEEIC / I&CPS Europe)*, Genova, Italy, Jun. 2019, pp. 1–6, doi: 10.1109/EEEIC.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] H. Pacejka, *Tire and Vehicle Dynamics*. Elsevier, 2005.

- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] R. Krishnan, *Electric motor drives: modeling, analysis, and control*. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 2001.
- [20] L. Pugi et al., 'Fast Modelling and Identification of Hydraulic Brake Plants for Automotive Applications', *TJFP*, Nov. 2020, doi: 10.13052/ijfp1439-9776.2122.
- [21] 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.

Adriano Alessandrini - Ingegnere meccanico con dottorato in energetica 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 mecatronici, la mobilità sostenibile.

Autore di oltre 220 pubblicazioni indicizzate (H-INDEX 23) 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.

Tommaso Favilli Nato nel 1991, 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.