RdS
RICERCA DI SISTEMA

ENEA
AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

MINISTERO DELL'AMBIENTE E DELLA SICUREZZA ENERGETICA

Ricerca di Sistema elettrico

LA3.10 - Ricarica dinamica per TPL: Progettazione di un sistema di bordo per la ricarica in movimento di veicoli per TPL

Adriano Alessandrini, Lorenzo Berzi, Luca Pugi

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI FIRENZE
DICEA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE

RdS_PTR22-24_PR 1.7_LA3.10_018

LA3.10 - RICARICA DINAMICA PER TPL: PROGETTAZIONE DI UN SISTEMA DI BORDO PER LA RICARICA IN MOVIMENTO DI VEICOLI PER TPL

Adriano Alessandrini (UNIFI DICEA), Lorenzo Berzi (UNIFI DIEF), Luca Pugi (UNIFI DIEF)

Giugno 2023

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA
Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: *Decarbonizzazione/Digitalizzazione ed evoluzione delle reti*
Progetto: *Ricarica dinamica per TPL: Progettazione di un sistema di bordo per la ricarica in movimento di veicoli per TPL*
Linea di attività: *3.10*
Responsabile del Progetto: Fernando, Ortenzi, ENEA
Responsabile Linea di Attività: *Adriano, Alessandrini, UNIFI DICEA*
Mese inizio previsto: 1
Mese inizio effettivo: 1
Mese fine previsto: 18
Mese fine effettivo: 18

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Progettazione di un sistema di bordo per la ricarica in movimento di veicoli per TPL e progettazione e realizzazione di un sistema di trasporto con ricarica in movimento per il convoying*"
Responsabile scientifico ENEA: Fernando, Ortenzi
Responsabile scientifico Co-beneficiario: Adriano, Alessandrini, UNIFI DICEA

Indice

1 RISULTATI ATTESI 3
2 RISULTATI OTTENUTI 3
3 PRODOTTI ATTESI 4
4 PRODOTTI SVILUPPATI 5
5 ANALISI DEGLI SCOSTAMENTI SU ATTIVITÀ E RISULTATI 6
6 SINTESI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE 7
7 DETTAGLIO DELLE ATTIVITÀ SVOLTE 7
8 CONTRIBUTO DELLE EVENTUALI CONSULENZE ALLE ATTIVITÀ SOPRA DESCRITTE 11
9 PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE 12

1 Risultati attesi

La ricarica in movimento dei veicoli TPL a batteria apre delle grandi opportunità di flessibilità del servizio di trasporto con veicoli ecologici. Tram e filobus devono percorrere itinerari preassegnati mentre veicoli elettrici più piccoli possono effettuare servizi anche a domanda con itinerari di volta in volta differenti e passare solo su alcuni corridoi attrezzati per la ricarica in modo da non dilapidare l'energia accumulata nelle batterie.

La differenza dei sistemi di ricarica (soprattutto se ad elevata potenza, ossia oltre 3C, corrispondente alla possibilità di riportare la batteria allo stato di carica del 50% in 10 minuti) in movimento rispetto agli statici risiede nel fatto che, mentre il sistema di accumulo viene ricaricato a veicolo in moto, questo deve essere in grado di estrarre comunque una parte dell'energia accumulata per alimentare i motori di trazione. La progettazione quindi di un sistema di ricarica in movimento deve tenere in conto la differenza tra tensione di ricarica, tensione del sistema di accumulo a riposo e tensione richiesta all'alimentazione dei motori.

In questo progetto si impiega come veicolo prototipale un Gulliver Tecnobus da 5,5 metri con gruppo propulsore alimentato a 72 V, ospitante un sistema di accumulo con batteria al titanato di litio a 400 V. Tra i due gruppi deve essere realizzata l'elettronica di potenza, necessaria per i) alimentare i motori tramite abbassamento della tensione e ii) innalzare la tensione in fase di frenatura a recupero per approvvigionare la batteria. Questo sistema dovrà essere reso compatibile con una ricarica rapida in movimento a diverse tensioni in modo da adattarsi a diverse infrastrutture esistenti. Si definiscono dapprima i sistemi di accumulo e ricarica, quindi si progetta l'elettronica di bordo, gli azionamenti ed i necessari circuiti affinché il bus funzioni a batteria, in ricarica statica ed in ricarica in movimento.

I risultati attesi dalla LA 3.10 sono:

- Il progetto dell'architettura di bordo per la ricarica in movimento di un bus con sistema di alimentazione a 72V DC e sistema di accumulo 400V DC
- Il prototipo, implementato su un Gulliver Tecnobus esistente, del sistema progettato
- Il testing del prototipo con relativa valutazione di efficienza della ricarica e dell'intero sistema

2 Risultati ottenuti

I risultati ottenuti sono:

- Il progetto dell'architettura di bordo per la ricarica in movimento (100%)
- Il prototipo del sistema progettato ed il relativo testing (80%)

La sperimentazione preliminare sul prototipo è stata effettuata col materiale già disponibile; la sperimentazione su strada sarà effettuata al termine del secondo SAL insieme al sistema di ricarica completo, come previsto dal capitolato.

3 Prodotti attesi

I prodotti attesi dalla presente LA consistono in:

- Rapporto tecnico di completamento attività.
- Progetto definitivo della componente hardware.
- Prototipo del sistema per la ricarica in moto funzionante e testato per un singolo veicolo.

4 Prodotti sviluppati

I prodotti sviluppati dalla presente LA sono:

- Il presente rapporto tecnico dal titolo “Ricarica dinamica per TPL: Progettazione di un sistema di bordo per la ricarica in movimento di veicoli per TPL (LA3.10)”
- Progetto definitivo della componente hardware con sviluppo di prodotti in ambiente software inerenti all’architettura del prototipo, tra cui schemi elettrici, schemi meccanici e modelli CAD di assieme.

La sperimentazione preliminare sul prototipo è stata effettuata col materiale già disponibile; la sperimentazione su strada sarà effettuata al termine del secondo SAL insieme al sistema di ricarica completo, come previsto dal capitolato.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non ci sono scostamenti in questa LA.

6 Sintesi delle attività svolte

Il report tratta del progetto dell'architettura per la ricarica in movimento, contestualizzata rispetto a quanto già disponibile (minibus di progetto) e a quanto prevedibile per la messa in opera di un sistema economicamente sostenibile. In particolare, il prototipo deve integrare soluzioni pratiche per lo scambio di carica tra più veicoli disposti in convoglio. Ciò passa dalla necessità di recuperare energia elettrica da una catenaria a partire da un veicolo di testa, con sistemi isolati di sicurezza e la chiusura del circuito tramite contatto strisciante nelle zone coperte dalla linea di ricarica. Vengono illustrate le tecnologie previste per il raggiungimento di tali obiettivi, comprensivi dei fornitori individuati per il loro acquisto e il prezzo in relazione a quanto preventivo in fase di domanda.

7 Dettaglio delle attività svolte

7.1 Progetto dell'architettura di bordo per la ricarica in movimento

Il progetto dell'architettura di bordo per la ricarica in moto parte da quanto disponibile a livello veicolare. Il minibus disponibile per le attività di progetto (Tecnobus Gulliver) è visibile in Figura 1, in una posizione dedicata alla ricarica statica tramite pantografo. Il minibus è dotato di pantografo per l'aggancio al sistema di ricarica ed è caratterizzato da un vano batteria smontabile per una eventuale modifica all'alimentazione.

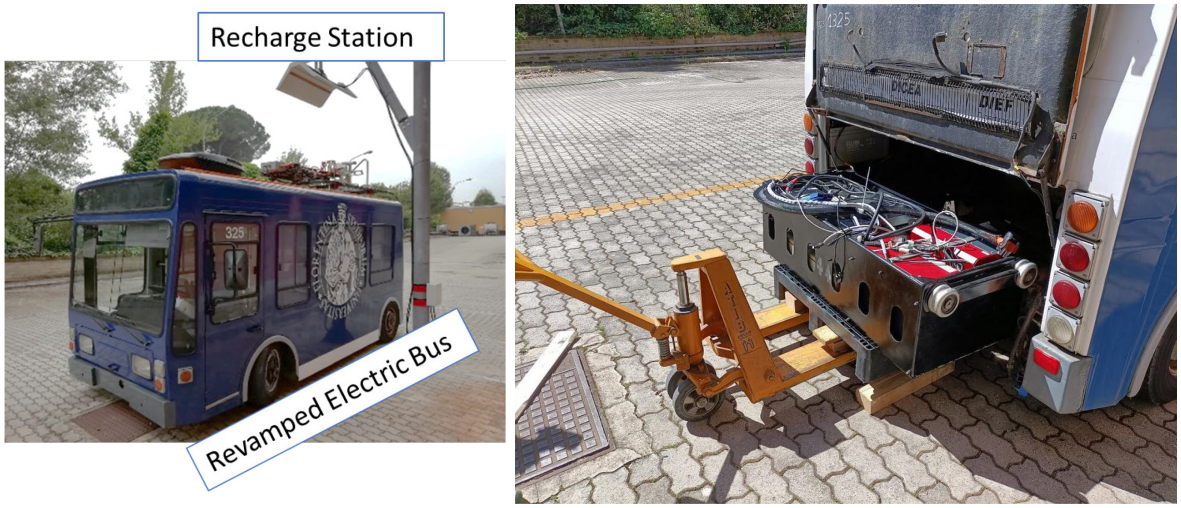

Figura 1. Uno dei minibus di progetto (sinistra), relativo vano batteria (destra).

Per gli scopi di progetto, si è progettata una architettura di ricarica secondo quanto visibile in Figura 2. In corrispondenza di una linea di ricarica, il veicolo di testa estende il pantografo collegandosi alla catenaria con voltaggio massimo ipotizzato di 1000 V, per adattarsi sia ad una linea di tipo sia ferroviario che tramviario (e che funge da positivo). Il negativo è invece rappresentato da un contatto strisciante sul veicolo di testa con la pavimentazione stradale. Convertitori DC-DC isolati su ambo i veicoli garantiscono l'isolamento della componente di trazione da quella di alimentazione, limitando gli effetti di eventuali cortocircuiti; in particolare, a causa delle sconnessioni stradali è prevedibile che il contatto strisciante non sia ideale, necessitando di prevedere una protezione per i sistemi elettrici coinvolti in caso di discontinuità della carica. Ulteriori convertitori DC-DC portano il voltaggio dai valori registrati ai capi dei pacchi batteria ai valori necessari alla trazione. Con tale configurazione si riesce a condividere la carica tra tutti i veicoli del convoglio.

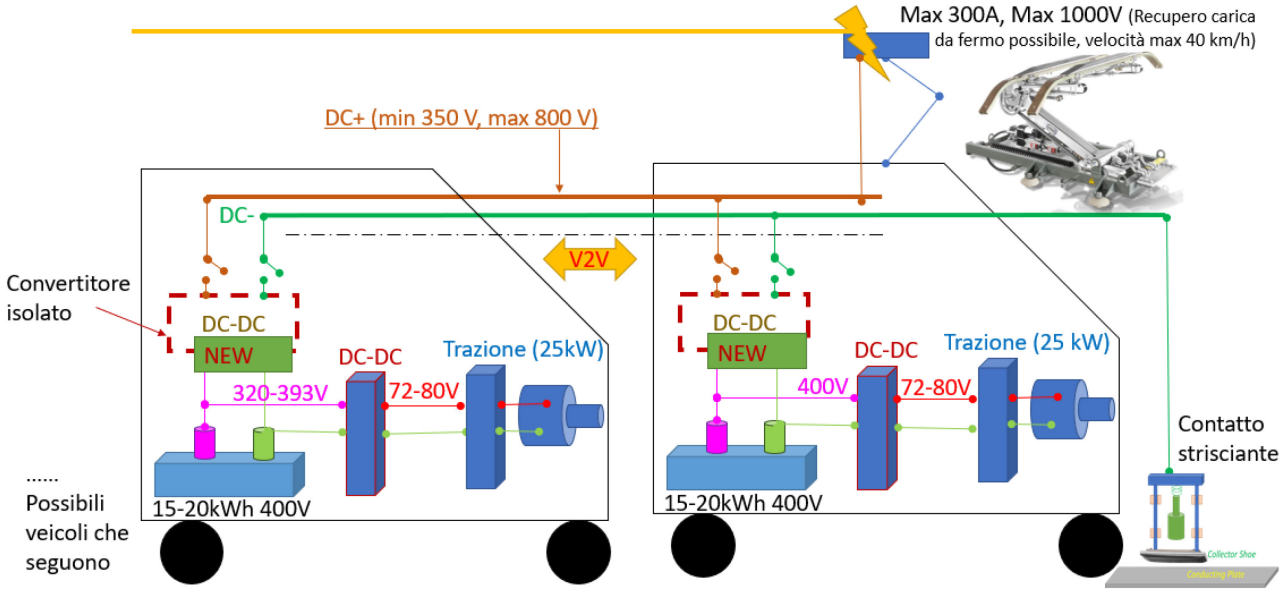

Figura 2. Schema dell'architettura di funzionamento per la ricarica in linea di mezzi in convoglio.

Un'alternativa allo schema proposto è rappresentata dall'architettura in Figura 3. In questo caso si ha un collegamento equipotenziale in bassa tensione tra veicoli, con ricarica diretta della batteria da stazione di ricarica a 400V (limitata in corrente) o comunque con stessa tensione della batteria. Per la catenaria alimentata in tensione non si esclude l'aggiunta di un convertitore a protezione della batteria a valle del pantografo.

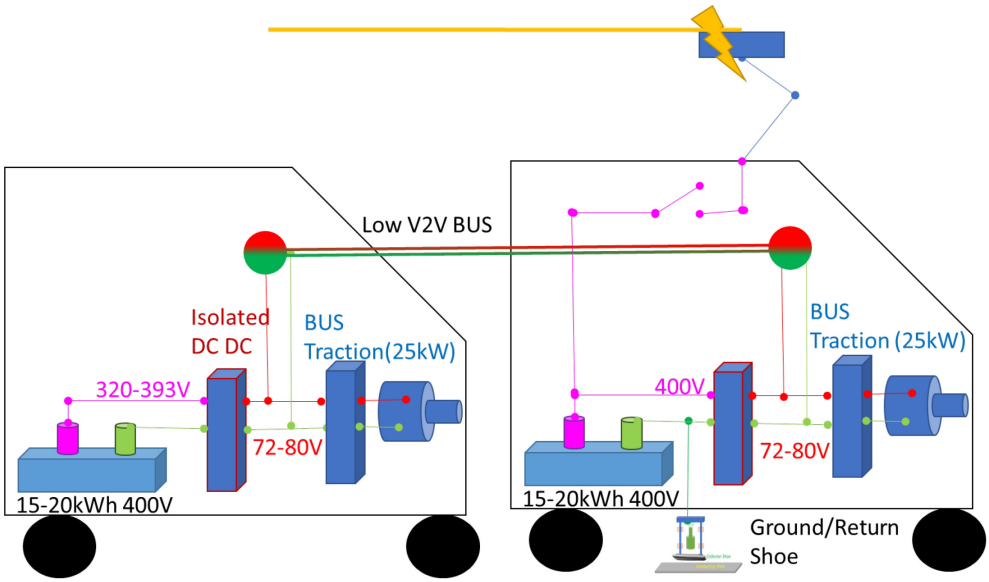

Figura 3. Schema alternativo dell'architettura di ricarica.

Indipendentemente dall'architettura selezionata, da un punto di vista della chiusura del circuito tramite contatto strisciante si prevede di impiegare un sistema ad assile elettro-attuato per il collegamento con un binario posto a terra e inglobato nella pavimentazione (sinistra in Figura 4). In presenza di una linea di ricarica, l'assile sarà fatto calare sulla rotaia per chiudere il circuito (destra in Figura 4) ed applicherà una forza sufficiente a mantenere il contatto (attualmente quantificabile in 30 kg). Tra linea e rotaia dovrà essere presente la differenza di potenziale desiderata (ad esempio 400 V).

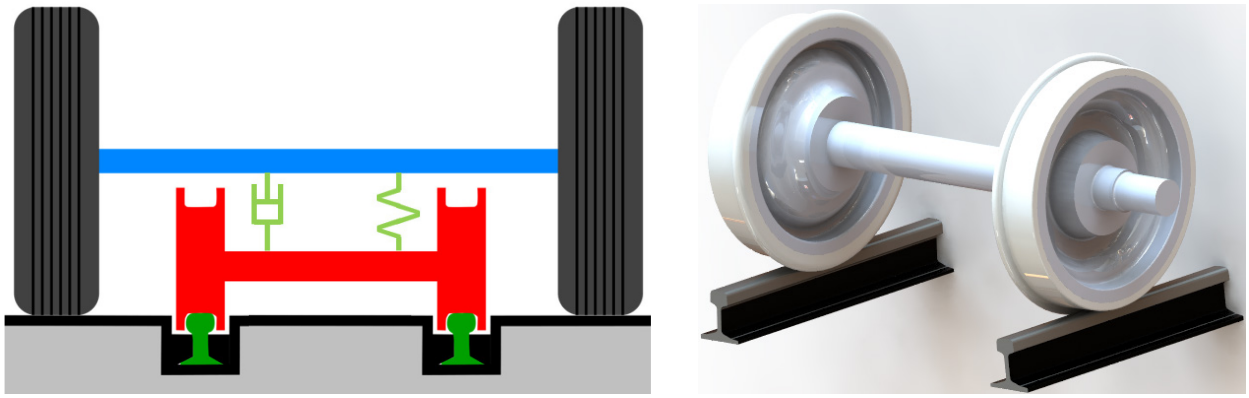

Figura 4. Schema di integrazione di un assile elettro-attuato per contatto di ricarica (sinistra), visualizzazione dimetrica di esempio di un assile in contatto col binario.

Al fine di aggiungere l'architettura obiettivo, sono necessarie diverse modifiche a quanto attualmente disponibile e attività da svolgere *ex novo*. In particolare, attualmente il veicolo di Figura 1 è alimentato da batterie al piombo poco capienti e inadatte a gestire ricariche ad alte correnti per la ricarica veloce (ad esempio 3C); ciò richiede il suo aggiornamento con un diverso tipo di alimentazione. Inoltre, la linea di ricarica non è attualmente disponibile, così come le varie componenti da inserirsi all'interno dei veicoli e il sistema di chiusura del circuito basato su contatto strisciante. Nel prosieguo si illustrano le soluzioni finora messe in atto per lo sviluppo del prototipo.

7.2 Sviluppo del prototipo

Stante l'impossibilità di acquisire il materiale nelle modalità e con le tempistiche preventivate in fase di domanda, si è provveduto a selezionare fornitori e materiali per lo sviluppo della componente di accumulo sulla base dei requisiti tecnici per l'applicazione. La selezione dei fornitori e delle soluzioni tecniche offerte permette di specificare gli ingombri dei singoli elementi di gestione del flusso di carica, necessari ai fini del dimensionamento del vano che li raccoglie, considerando anche la ricarica in movimento e la possibilità di condividerla con ulteriori mezzi che seguono. Il modello CAD 3D del vano sviluppato nel corso del progetto è visibile in Figura 5. Il cassone sarà alloggiato nella sezione posteriore del minibus di testa del convoglio.

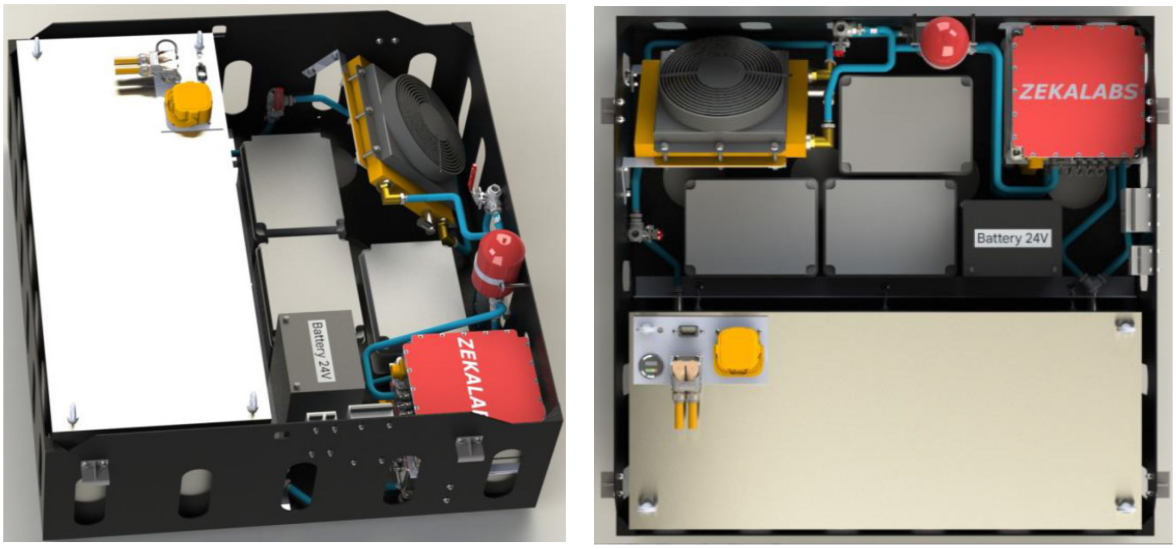

Figura 5. Vista dimetrica (sinistra) e superiore (destra) del vano mobile in cui alloggiano i dispositivi di gestione del flusso di carica.

Per garantire una ricarica rapida dei veicoli, si è selezionata una batteria ricaricabile agli ioni di litio della ditta XBW, con tensione nominale di 355 V, energia e capacità nominali rispettivamente di 17 kWh e 57 Ah, una disponibilità di protocollo di comunicazione CAN BUS per acquisizione dati di uso istantanei (oltre ad un BMS integrato). La vista complessiva del pacco batteria con relative dimensioni è riportata in Figura 6. Il pacco batteria possiede alcuni ingressi di un circuito di refrigerazione che lo predispongono ad un raffreddamento a liquido, il cui impiego è previsto nel corso del progetto per la riduzione delle temperature di lavoro.

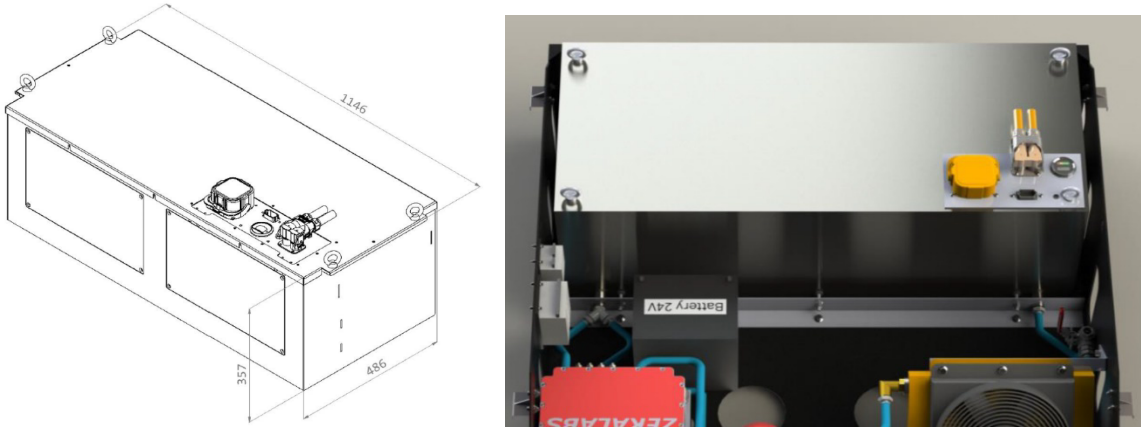

Figura 6. Vista complessiva e relativi ingombri del pacco batteria.

I convertitori isolati DC-DC selezionati corrispondono al modello LB-1112-18 DC-DC Tinoprime della ditta Zekalabs, operanti su un lato (A) con un voltaggio fino a 450 Vcc e dell'altro (B) con un voltaggio fino a 75 Vcc. Le correnti per il lato A e per il lato B sono rispettivamente di 32 A e 300 A (potenza massima di 13 kW). Il convertitore DC-DC in questione è caratterizzato da isolamento galvanico e un'interfaccia CAN BUS per l'acquisizione dati. Il convertitore è visibile in Figura 7, sia in vista singola che accoppiato con gli ulteriori elementi del vano batteria.

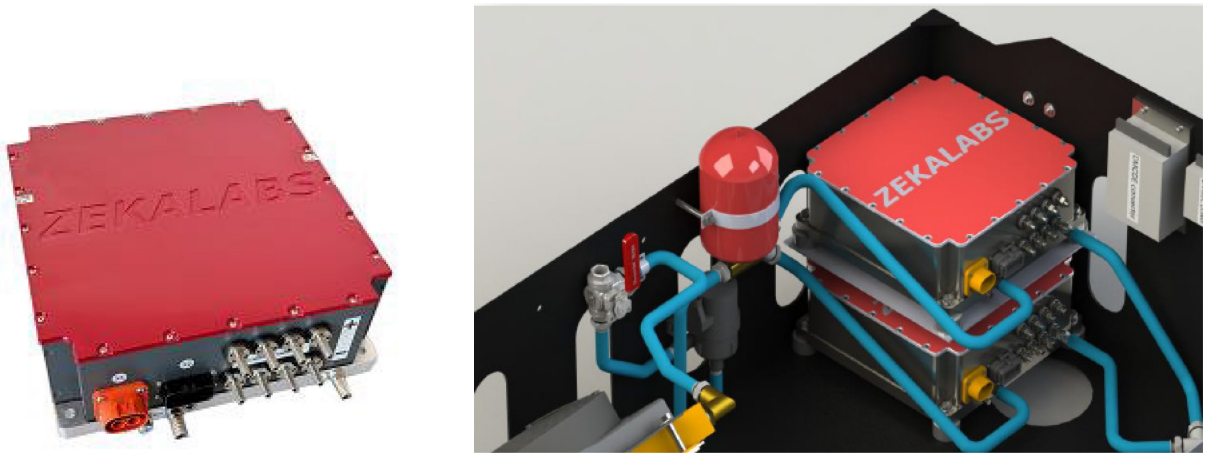

Figura 7. Convertitore DC-DC (ditta Zekalabs) selezionato per l'applicazione (sinistra), relativa integrazione nel vano batteria (destra).

Per il dimensionamento del sistema di raffreddamento richiesto si sono svolti alcuni test su minibus con vecchia alimentazione. Si è notato come la potenza elettrica media in uscita dalla batteria in un ciclo guida tipico sia pari a 8 kW, con terzo quartile della distribuzione temporale corrispondente a circa 12 kW. Utilizzando cautelativamente quest'ultimo dato e ipotizzando perdite del 5% in effetto termico con la batteria XBW che si installerà, si necessita di dissipare 600 W di potenza termica tramite sistema di raffreddamento durante la marcia. Se poi si desidera ricaricare le batterie a C-rate pari a 3 (in 20 minuti), le correnti di ricarica dovranno essere intorno a 170 A con potenze sviluppate superiori a 50 kW. In tal caso, si necessiterà di

dissipare 2500 W termici in carica. Si è quindi scelto un radiatore RAL 30/22P della ditta Ira Engineering (sinistra in Figura 8) in grado di dissipare fino a 5225 W. Una pompa Davies EBP40 provvede alla circolazione del liquido refrigerante (centro in Figura 8). Il fluido passa prima nel circuito interno alla scocca della batteria, dopodiché è previsto il passaggio in un raccordo per collegare i DC-DC in parallelo. I due convertitori sono collegati ad un vaso d'espansione, dal quale il fluido caldo arriva in aspirazione alla pompa e viene poi forzato a circolare nel radiatore per il raffreddamento. Lo schema di circolazione è visibile a destra in Figura 8.

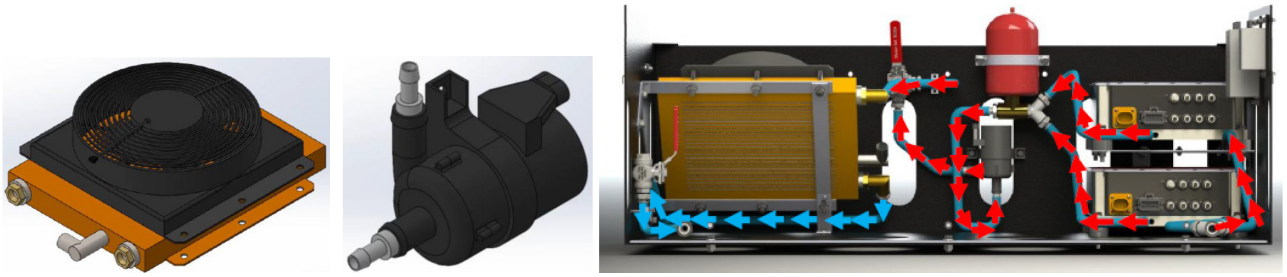

Figura 8. Radiatore selezionato (sinistra), pompa selezionata (centro), complessivo del sistema di raffreddamento previsto per il sistema di ricarica e condivisione della carica (destra)

Attualmente, lo stato di avanzamento di questa attività può essere considerato pari al 50%, richiedendo il recupero del materiale per procedere col montaggio dell'assieme ed il relativo collaudo. Il materiale verrà acquistato per mezzo del budget dedicato alla LA 3.8, in cui è stato previsto l'acquisto del convertitore DC-DC per autobus (20 k€), la batteria del minibus (40 k€) e un pantografo per la ricarica in movimento (20 k€). Quest'ultimo sarà acquistabile dalla ditta Schunk GmbH.

Il budget dedicato alla LA 3.9 permetterà inoltre l'acquisto della catenaria per la ricarica in marcia del singolo veicolo e dei veicoli in convoglio (LA 3.10). In particolare, si sono interpellate le tre ditte Bonomi Spa, Elen Srl, Elettri-fer Srl. Per lo sviluppo di una linea di 120 m, l'ultima ditta non ha fornito preventivi mentre la prima ha avanzato una richiesta di 935 k€; la miglior offerta è pervenuta dalla ditta Elen Srl, che per 155 k€ propone i seguenti servizi:

- Progetto e Realizzazione di un tratto di linea elettrica comprensivo di 3 campate
- Fornitura pali a categorico ferroviario di tipo LSU 14 o LSU 16
- Fornitura kit di Tirafondi per pali LSU
- Realizzazione Plinti di fondazione per pali LSU in calcestruzzo armato secondo standard RFI
- Fornitura in opera dei conduttori di contatto – fune, filo e pendini
- Fornitura in opera dei sistemi di isolamento a categorico ferroviario
- Fornitura in opera delle mensole, tiranterie e bracci di poligonazione
- Fornitura in opera degli accessori di ormeggio e regolazione della Ldc
- Fornitura in opera di un sezionatore da palo per l'alimentazione della linea elettrificata
- Realizzazione polifera per passaggio cavi da quadro di alimentazione (non compreso nella fornitura) al sezionatore di linea per una lunghezza massima di 100 mt
- Realizzazione di una rotaia inglobata in manto bituminoso su cordolo in Cls tipo "transhlor" o "glt"

7.3 Testing del prototipo

L'acquisto delle componenti necessarie allo svolgimento delle attività di progetto è ancora in corso. Il prototipo è in fase di produzione nelle sue varie componenti e non è stata ancora svolta una fase di testing dello stesso.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Nella LA non erano previste consulenze.

9 Pubblicazioni scientifiche

Dalle attività della LA sono scaturite le seguenti pubblicazioni scientifiche su rivista internazionale in peer-review e partecipazione ai convegni:

1. Faro A., Lidozzi A., Ortenzi F., Di Benedetto M., Solero L., Kinetic Energy Storage based Advanced Charging Station with Reduced Grid Impact, (2023) 2023 AEIT International Conference on Electrical and Electronic Technologies for Automotive, AEIT AUTOMOTIVE 2023,
2. Alessandrini A., Ortenzi F., Berzi L., Gulino M.-S., Cignini F., Pugi L., An Innovative Convoying and Power Management System for Public Transportation, (2023) IEEE Vehicular Technology Conference, 2023-June, DOI: 10.1109/VTC2023-Spring57618.2023.10200691
3. Pugi L., Alessandrini A., Berzi L., Nassini G., Ortenzi F., Cignini F., Simulation of an Innovative Moving Recharge System for Public Transportation Systems, (2023) EUROCON 2023 - 20th International Conference on Smart Technologies, Proceedings, pp. 647 - 652, DOI: 10.1109/EUROCON56442.2023.10199038
4. Alessandrini A., Berzi L., Cignini F., Favilli T., Niccolai A., Ortenzi F., Pugi L., Prototyping and Preliminary Testing of a Revamped Electric Bus with a Fast Recharge System, (2023) Lecture Notes in Electrical Engineering, 1036 LNEE, pp. 326 - 332, DOI: 10.1007/978-3-031-30333-3_44
5. Alessandrini A., Berzi L., Favilli T., Staffa D., Genovese A., Pugi L., Cignini F., Ortenzi F., Design, Simulation and Testing of a Fast Recharge System for Public Transportation System, (2022) MELECON 2022 - IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, Proceedings, pp. 318 - 323, DOI: 10.1109/MELECON53508.2022.9843089

Si stanno inoltre organizzando due special session su mobilità sostenibile. La prima presso ISIEA 2024 in concomitanza con un evento di disseminazione del progetto ACCCELBAT (https://isiea.events.unibz.it/), la seconda presso IEEE EEEIC 2024 nell'ambito di uno special session/event, previsto a Roma per i primi di giugno 2024 nell'ambito di attività di valorizzazione del PNRR, MOST, Spoke 4.