



Ricerca di Sistema elettrico

*Progettazione e test di un sistema ibrido SC-accumulo per  
la ricarica rapida di un bus alle fermate*

**Progettazione e  
realizzazione del prototipo**

M. Pierini, A. Alessandrini, L. Berzi, L. Pugi, R. Barbieri, F. Cignini

## PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE DEL PROTOTIPO

Marco Pierini, Adriano Alessandrini, Lorenzo Berzi, Luca Pugi, Riccardo Barbieri, Fabio Cignini (Università degli Studi di Firenze)

Settembre 2018

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

Progetto D7: Mobilità elettrica sostenibile.

Obiettivo: a. Scenari di mobilità elettrica

Responsabile del Progetto: Maria Pia Valentini, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione tra ENEA e il dipartimento DICEA dell'Università di Firenze dal titolo: "Progettazione e test di un sistema ibrido sc-accumulo per la ricarica rapida di un bus alle fermate"

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Fernando Ortenzi

Responsabile scientifico per L'Università di Firenze: Prof. Adriano Alessandrini

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DEL VEICOLO ESISTENTE.....	7
2.1 CAPACITÀ DI TRASPORTO.....	7
2.2 PESI.....	7
2.3 MISURE DEL VEICOLO E SAGOMA.....	7
2.4 SISTEMA DI ILLUMINAZIONE.....	9
2.5 SISTEMI DI ACCUMULO, GENERAZIONE E TRAZIONE.....	9
3 REQUISITI TECNICI.....	10
3.1 REQUISITI ELETTRICI.....	10
3.2 REQUISITI MECCANICI.....	15
3.3 REQUISITI DEL SISTEMA DI CONTROLLO E DI GESTIONE.....	16
3.4 REQUISITI DETTAGLIATI DEL SISTEMA DI CONTROLLO E REGOLAZIONE AI FINI DELL'INTEGRAZIONE NEL VEICOLO.....	17
4 PROGETTAZIONE.....	18
5 LISTA DEI MATERIALI NECESSARI PER IL PROGETTO E CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE DELLA FASE DI PROGETTAZIONE.....	19
6 ATTIVITÀ MECCANICHE.....	20
7 ATTIVITÀ ELETTRICHE.....	22
8 PRINCIPI GENERALI DI DIMENSIONAMENTO.....	22
8.1 DEFINIZIONE DELL'ALGORITMO.....	22
8.2 OUTPUT DELL'ALGORITMO.....	26
9 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI.....	28
APPENDICE: CURRICULUM DEL GRUPPO DI LAVORO.....	31
10 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	32

## Sommario

Il report si configura all'interno del programma di ricerca di sistema elettrico 2017/2018 dell'ENEA con il progetto mobilità sostenibile.

L'obiettivo di questa attività è di progettare e realizzare un prototipo di minibus che possa disporre di un sistema di accumulo misto con batterie e supercapacitori per consentire la ricarica ultraveloce.

Il report raccoglie gli elaborati consegnati all'ENEA secondo le scadenze previste nell'Allegato Tecnico dell'Accordo di Collaborazione:

- Progettazione del prototipo, partendo dai requisiti del sistema da un punto di vista di resistenza meccanica, collegamenti elettrici, elettronica di gestione e sicurezza per gli operatori di gestione e per gli occupanti. A valle di questa progettazione viene descritto un layout generale degli impianti elettrici, nonché i supporti meccanici e la lista dei materiali necessari.
- Realizzazione del prototipo. Per ogni attività di realizzazione sono descritti gli aspetti critici e le soluzioni atte a ridurre gli impatti, nonché i test di funzionamento e i risultati preliminari.
- Generalizzazione dei principi di progettazione e realizzazione di un simulatore di linee di trasporto, basandosi sulle caratteristiche dei bus esistenti e di stazioni di ricarica per quelle linee. Per questa attività vengono utilizzati i dati raccolti durante il test delle tecnologie sviluppate nelle fasi precedenti del medesimo progetto nonché altri dati provenienti da progetti congiunti tra UNIFI ed ENEA all'interno di progetti di ricerca passati.

Inoltre l'Università di Firenze ha collaborato con ENEA alla stesura del report RDS/2017/238 che riporta le modalità di prova del sistema di accumulo misto realizzato ed i relativi risultati.

Scopo della ricerca era dimostrare che fosse possibile gestire supercondensatori e batterie in parallelo in modo che i primi potessero prendere le correnti di picco in accelerazione e frenatura e le seconde garantire la base per un lento decadimento che non ne causi un invecchiamento precoce.

A fianco di questo obiettivo primario se ne innesta un secondo altrettanto importante di rendere i supercondensatori di bordo indipendenti dal resto dell'accumulo per ricevere una ricarica ultrarapida per contatto con un banco di supercondensatori carichi.

Per realizzare tale sistema e prototiparlo si sono dapprima definite le specifiche tecniche del sistema di comune accordo con i committenti e con i ricercatori che hanno gestito la stazione di ricarica, quindi si sono effettuati gli acquisti per realizzare il prototipo, si sono testati i singoli pezzi singolarmente, poi il sistema intero a bassa tensione ed infine, al ciclatore, il prototipo integrato su un ciclo di marcia misurato sperimentalmente.

Il progetto si è concluso con successo.

Si è realizzato un nuovo cassone capace di alloggiare batterie, supercondensatori e elettronica di controllo nel vano batterie del bus.

Quindi si sono realizzati un prototipo dell'elettronica di gestione ed una prima release del software che gestisce il controllo dell'elettronica di potenza.

Il tutto è stato testato dapprima nei laboratori UNIFI a bassa tensione e poi in quelli ENEA sia per parti che assieme.

Il prototipo assolve alla funzione per cui è stato progettato tuttavia nel corso delle prove si sono anche evidenziate alcune debolezze alle quali si è ovviato successivamente.

Basandosi sull'esperienza raccolta durante le attività precedentemente descritte e in precedenti attività svolte per la RdS, sono stati generalizzati i principi di progettazione e ed è stato realizzato un simulatore di linee di trasporto, a partire dalle caratteristiche del servizio esistente e su quelle dei bus elettrici e delle relative stazioni di ricarica.

## 1 Introduzione

Il presente lavoro si inquadra nelle attività dell'Accordo di Programma per la ricerca di sistema elettrico dell'ENEA, il quale da tempo si occupa di gestire, organizzare ed incentivare la ricerca di base, la ricerca industriale e lo sviluppo sperimentale garantendo la massima diffusione dei risultati di tali attività a tutti i cittadini e utenti finali. Per l'anno 2017-18, parte della ricerca verte sulla razionalizzazione del consumo dell'energia elettrica per il trasporto pubblico condiviso, che adotta sempre diffusamente soluzioni a trazione elettrica e l'offerta di tecnologie atte a soddisfarla è variegata a tal punto da consentire di progettare e realizzare tutte o quasi le esigenze di trasporto.

L'ENEA ha commissionato all'Università di Firenze (UNIFI) il presente lavoro, riguardante la progettazione e successivamente la realizzazione di un sistema di accumulo energetico misto, a bordo di un veicolo facente le funzioni di prototipo. L'accumulo dovrà avvenire con un sistema a batterie e un sistema con supercapacitori (o supercondensatori o superacap).

Il veicolo sarà messo a disposizione da UniFI essendo già in possesso di due unità tipo minibus da 30 posti e 6 metri di lunghezza a trazione elettrica, tali autobus essendo di proprietà dell'Università di Firenze possono fungere da laboratorio per installare e testare nuove tecnologie, grazie al powertrain elettrico si richiede una quantità di modifiche molto inferiore ad un qualsiasi altro prototipo.

Il problema principale che si vuole affrontare con questa opportunità di ricerca è la ricarica rapida senza che si vada a ridurre la durata del sistema di accumulo; fino ad oggi in molti hanno tentato di aumentare la velocità della ricarica per sistemi a batteria, ma questo implicava l'accorciamento della aspettativa di vita delle stesse al punto da mettere in dubbio la convenienza economica.

Invece un pacco di accumulo misto supercapacitori-batterie che lasci ai supercapacitori la ricarica rapida e gli spunti ad elevata potenza e mantenga le batterie per i servizi e per le fasi di moto meno impegnative può garantire le prestazioni auspicate senza deteriorare le batterie.

In particolare si può preconizzare un servizio in cui il bus abbia poche batterie sufficienti a garantire l'energia per servizi e ausiliari nonché quella per le fasi di crociera da capolinea a capolinea. Batterie che si ricarichino a 2C in bassa tensione (fino a 43 kW) per alcuni minuti ad ogni capolinea.

Per le fasi di accelerazione e salita in erogazione e di discesa e frenatura in recupero, l'energia deve essere immagazzinata e la potenza fornita da un banco di supercapacitori. Tale banco verrà ricaricato in una o più fermate prestabilite per pochi minuti tramite ricarica per contatto con apposito connettore, o con altra infrastruttura esistente per la ricarica rapida.

Questo consentirà:

1. Autonomia illimitata ai bus elettrici con un'infrastruttura di ricarica molto meno invasiva dei filobus
2. Applicabilità dei bus elettrici su qualsiasi percorso, anche in presenza di salite e altre fasi energivore in quanto basterà ricaricare i supercapacitori prima dei tratti energivori
3. Estensione della vita del pacco batterie fino ad arrivare ai 5 anni di servizio con pacchi batteria piccoli che rappresenterebbero il breakeven finanziario sia sui bus elettrici convenzionali che su quelli a gasolio

Per quanto concerne la carica rapida a cui si fa riferimento, questa è oggetto di un'altra parte di ricerca sempre nel medesimo PAR, ha come titolo "Realizzazione di un prototipo di minibus elettrico con ricarica flash" ed afferisce al Progetto "Accumulo elettrico"; le due attività di ricerca sono complementari tra loro, scambiandosi requisiti e informazioni.

La parte che si sta trattando in questo report si occupa di progettare e realizzare il sistema di accumulo misto in grado di accogliere un determinato tipo di carica rapida con determinate caratteristiche, le quali devono essere recepite dalla seconda parte di ricerca che ha il compito di interfacciarsi con la prima e con l'infrastruttura di rete. Non mancheranno in questo deliverable riferimenti e stralci di informazioni all'altra ricerca.

Per realizzare tale sistema e prototiparlo si sono dapprima definite le specifiche tecniche del sistema di comune accordo con i committenti e con i ricercatori che hanno gestito la stazione di ricarica, quindi si sono effettuati gli acquisti per realizzare il prototipo e si sono testati i singoli pezzi singolarmente, poi il sistema intero a bassa tensione ed infine, al ciclatore il prototipo integrato su un ciclo di marcia misurato sperimentalmente.

Il progetto si è concluso con successo.

Si è realizzato un nuovo cassone capace di alloggiare batterie, supercondensatori e elettronica di controllo nel vano batterie del bus.

Quindi si sono realizzati un prototipo dell'elettronica di gestione ed una prima release del software che gestisce il controllo dell'elettronica di potenza.

Il tutto è stato testato dapprima nei laboratori UNIFI a bassa tensione e poi in quelli ENEA sia per parti che assieme.

Il prototipo assolve alla funzione per cui è stato progettato tuttavia nel corso delle prove si sono anche evidenziate alcune debolezze a cui si ovvierà al termine del progetto.

Basandosi sull'esperienza raccolta durante le attività precedentemente descritte e in precedenti attività svolte per la RdS, sono stati generalizzati i principi di progettazione e ed è stato realizzato un simulatore di linee di trasporto, a partire dalle caratteristiche del servizio esistente e su quelle dei bus elettrici e delle relative stazioni di ricarica.

Il presente report è articolato in otto capitoli oltre la presente introduzione, che contengono:

1. la descrizione del veicolo esistente in possesso dell'Università di Firenze;
2. i requisiti tecnici da rispettare nella progettazione e realizzazione del sistema di accumulo misto (meccanici, elettrici e di sicurezza)
3. la progettazione del sistema di accumulo corroborata da schemi e calcoli,
4. la lista dei materiali e le considerazioni generali per procedere alla realizzazione del prototipo
5. la realizzazione del cassone di alloggio del nuovo sistema di accumulo e della sua elettronica di gestione.
6. la realizzazione dell'elettronica di controllo, dell'assemblaggio del prototipo di sistema di accumulo misto e del suo test al banco
7. la descrizione dell'algoritmo di simulazione realizzato
8. le conclusioni del progetto

## 2 Descrizione del veicolo esistente

Tra i vari input alla progettazione del un sistema di accumulo vi è il mezzo che deve usarlo, ovvero le esigenze energetiche del powertrain, nonché gli ingombri per l'alloggiamento a bordo della strumentazione e del sistema d'accumulo stesso.

In questo capitolo si procede pertanto alla raccolta dei dati di targa del prototipo, rappresentato in Figura 1 , esso è già tra gli "assets" dell'Università di Firenze, ed ha consentito ni passato la realizzazione di varie sperimentazioni fungendo da "laboratorio mobile".



Figura 1 TECNOBUS Gulliver ESP 520

Nei paragrafi seguenti sono illustrati tutti i dati di targa del veicolo, gli ingombri e i dati elettrici del powertrain.

### 2.1 Capacità di trasporto

- |                             |         |
|-----------------------------|---------|
| • Posti passeggero seduti   | 8+1H    |
| • Posti passeggero in piedi | 17      |
| • Posti Totali              | 25+1H+1 |

### 2.2 Pesi

- |   |      |
|---|------|
| • Massa a vuoto in ordine di marcia totale kg | 2770 |
| • Batterie al Pb-Acido (595 Ah)               | 1500 |
| • Massa a vuoto in ordine di marcia totale kg | 4270 |
| • Massa totale complessiva kg                 | 6045 |

### 2.3 Misure del veicolo e sagoma

Si riportano alcune informazioni di seguito (ulteriori dettagli in Figura 2 e Figura 3):

- |                  |       |
|------------------|-------|
| • Lunghezza mm   | 5 100 |
| • Larghezza mm   | 2 500 |
| • Altezza max mm | 2 100 |

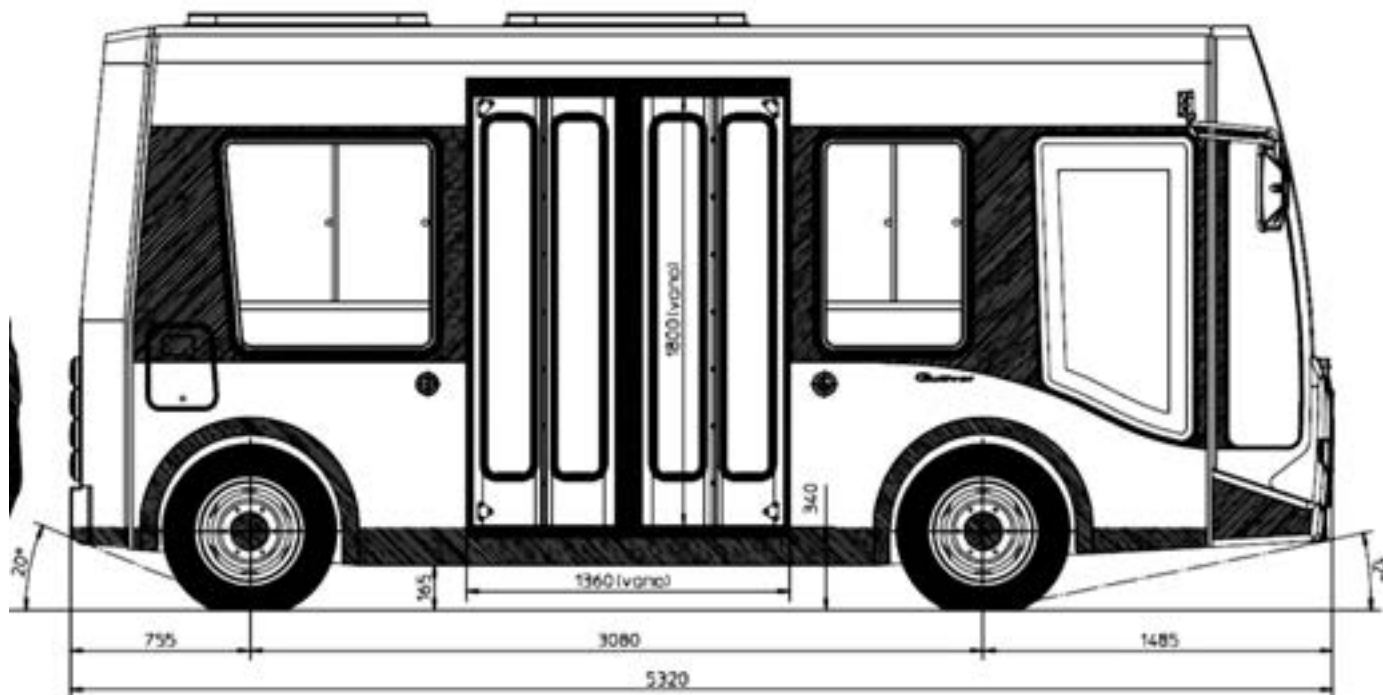


Figura 2 Ingombri del veicolo

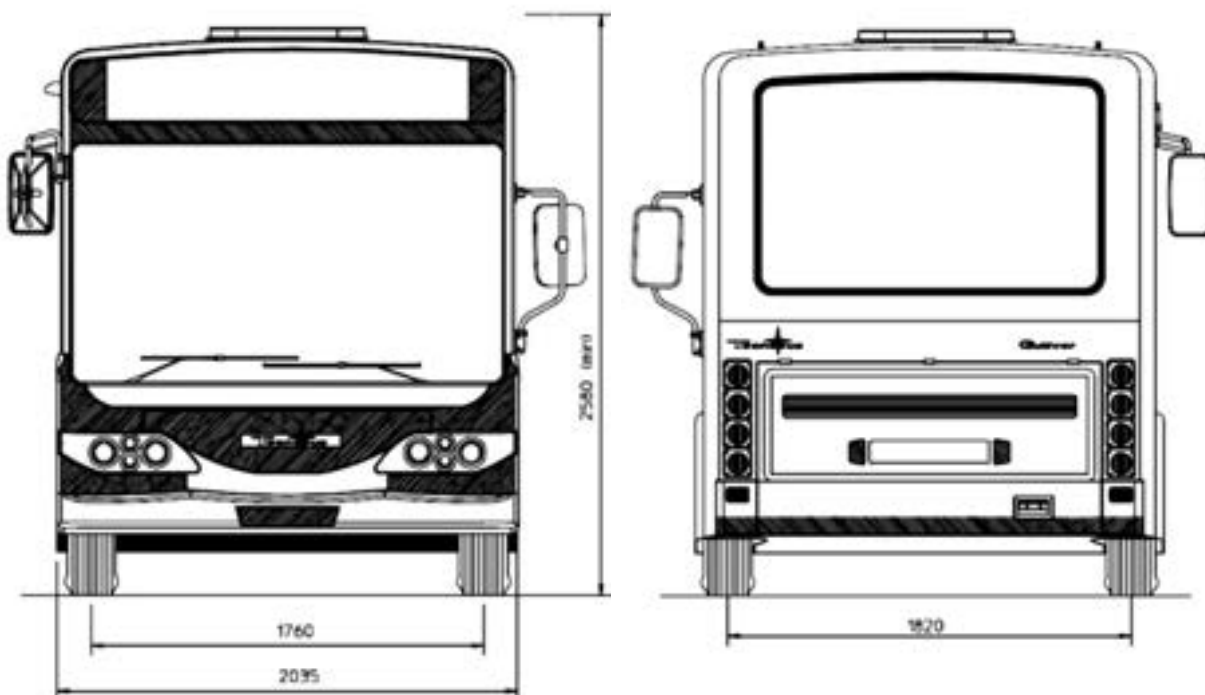


Figura 3 Sagoma limite

- Altezza Pavimento mm 340
- Altezza minima da terra (sotto sosp.) mm 157
- Passo mm 5 875
- Sbalzo Anteriore mm 2 700
- Sbalzo Posteriore mm 3 405
- Passo tra 1° asse e 2° asse mm 5 875
- Sbalzo anteriore mm 2 700

- Sbalzo posteriore mm 3 405
- Diametro minimo di volta tra due muri mm 19 141
- Diametro massimo di ingombro mm 22 180
- Angolo max sterzo 52°
- Altezza minima interna vano passeggeri (su ponte post.) mm 2 172
- Altezza massima interna vano passeggeri mm 2 318
- Altezza piano di calpestio 1° porta mm 340 (soglia 320)
- Larghezza corridoio interno passaruota 1°asse 910
- Pneumatici Anteriori e posteriori: 215/75 R16C

#### 2.4 Sistema di illuminazione

A incandescenza per le luci esterne, potenza 200 W complessiva.

A fluorescenza per le luci interne, potenza 200 W complessivi.

#### 2.5 Sistemi di accumulo, generazione e trazione

Il motore elettrico è in corrente continua (72 V – 110 V) con eccitazione serie, raffreddato ad aria.

Potenza massima 24.8 kW (picco a 1039 rpm), 21 kW nominali.

La coppia nominale è 235 Nm a 950 Nm.

Non vi era un sistema di generazione in quanto il bus era puramente elettrico.

Il Sistema di accumulo è costituito da 2 cassoni batterie da 36 V, 585 Ah dal peso di 750 kg. Ogni cassone, è composto a sua volta da 9 moduli di batterie da 12 V – 65 Ah ciascuno.



Figura 4 Un dettaglio delle batterie installate sul veicolo TECNOBUS durante la ricarica

### 3 Requisiti tecnici

In questo paragrafo sono stati raccolti tutti i requisiti tecnici di cui deve tener conto la progettazione, in particolare sono stati suddivisi in quattro macro categorie: meccanici, elettrici, sistema di controllo e di gestione, altri requisiti.

#### 3.1 Requisiti elettrici

Il sistema di trazione dell'autobus è costituito da un motore a corrente continua, alimentato tramite un chopper multiquadrante tensione impressa (tensione nominale di 72V) alimentato da batterie al piombo . Il sistema oggetto di precedenti attività sperimentali prevede assorbimenti di picco per brevi intervalli sino a 25kW in trazione. In realtà l'analisi dei consumi in trazione e frenatura evidenzia assorbimenti tipici in trazione non superiori ai 10-15kW (valori medi intorno ai 2-3kW su registrazioni di profili reali) e potenze rigenerate di picco di poco superiori ai 5kW.

Si mostra in Figura 5, Figura 6 e Figura 7 la fase di accelerazione e di frenata partendo da fermo, confrontando la velocità con: spazio percorso, energia scambiata e potenza erogata/assorbita dal motore elettrico.

Se in ognuna di queste figure appena citate si individuano tre spezzoni (Figura 8), riguardanti le fasi di:

1. accelerazione a massima potenza (0.5 m/s<sup>2</sup>)
2. accelerazione modulata sino al raggiungimento della massima velocità
3. decelerazione con frenata rigenerativa

Da notare che la fasi 1 e 2 sono contigue, mentre la fase 2 termina nel momento in cui il motore non eroga più potenza, corrispondente al momento in cui il guidatore non preme più il pedale dell'acceleratore, ma da qui la logia di funzionamento del bus non attiva automaticamente la frenata rigenerativa. Occorre infatti attivarla con una leggera pressione del pedale del freno, uno switch elettrico comunica alla centralina l'intenzione del guidatore di voler decelerare ed attiva la funzione rigenerativa secondo i parametri impostati. Allo stesso moto la frenata rigenerativa si interrompe al raggiungimento di una velocità minima di 5 km/h. Momento in cui termina anche la fase 3.

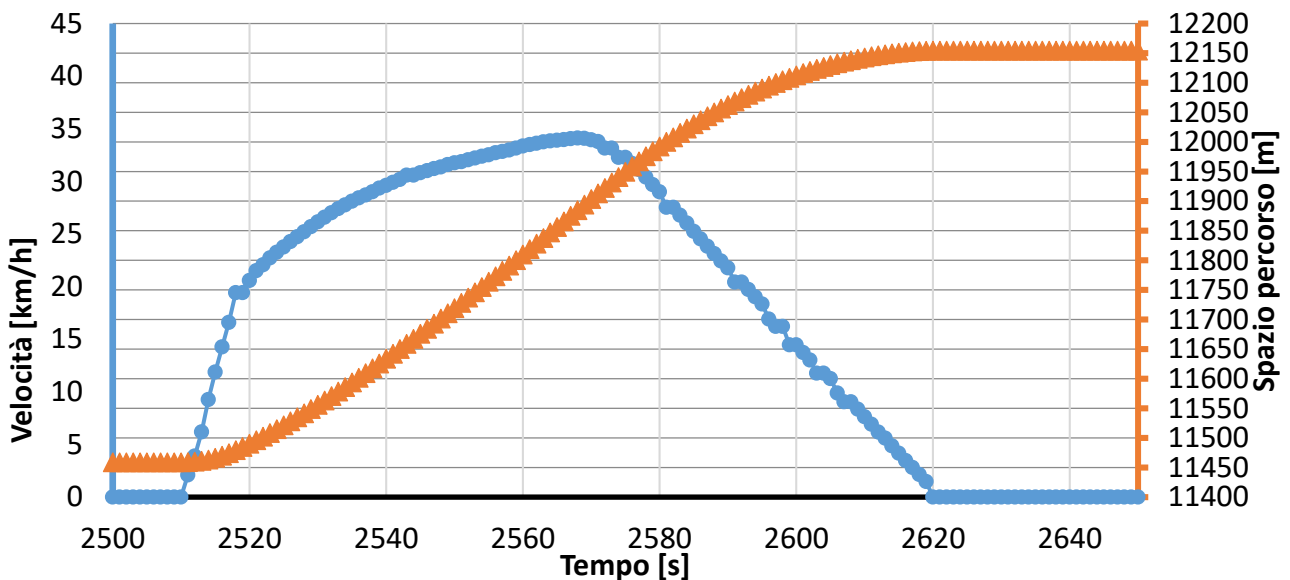


Figura 5 Accelerazione da fermo e frenata, velocità ed spazio percorso a confronto

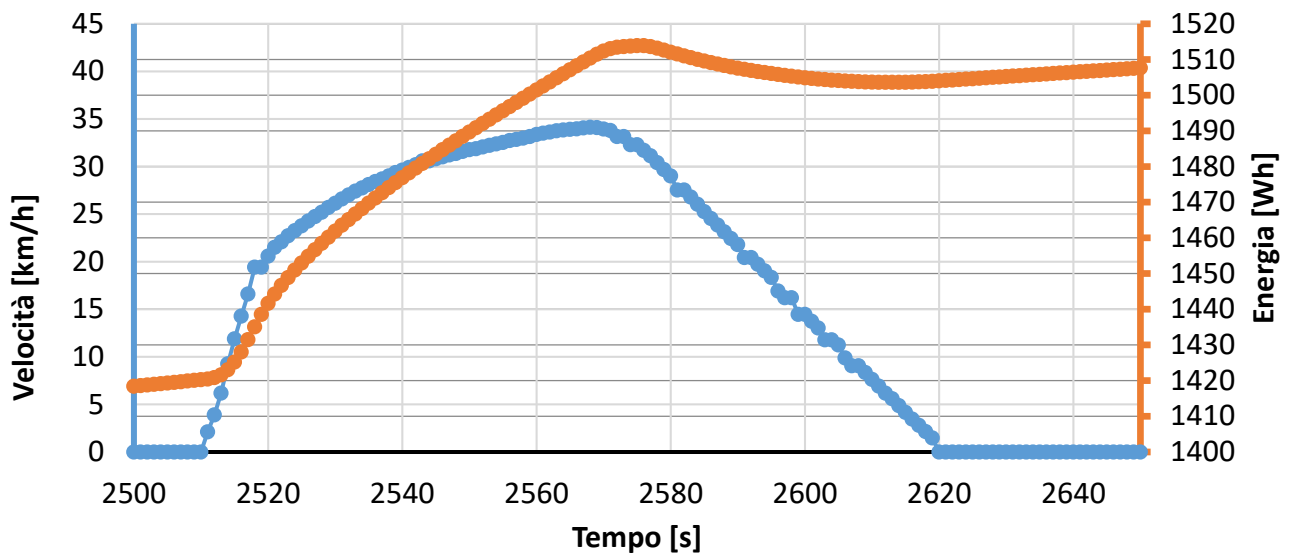


Figura 6 Accelerazione da fermo e frenata, velocità ed energia a confronto

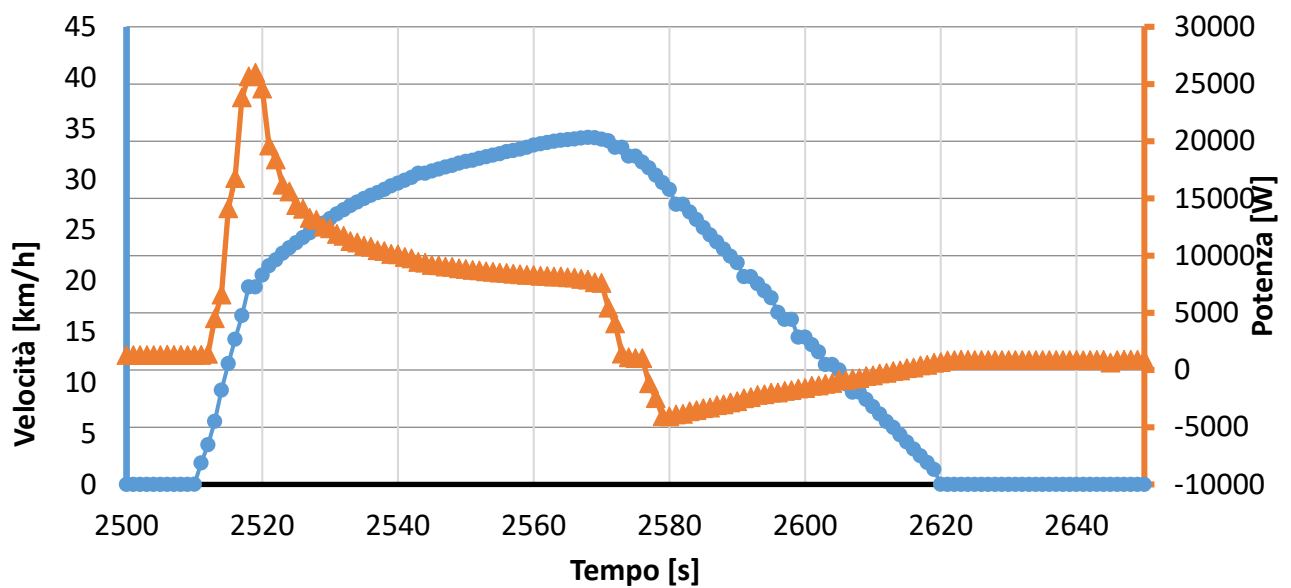


Figura 7 Accelerazione da fermo e frenata, velocità e potenza a confronto

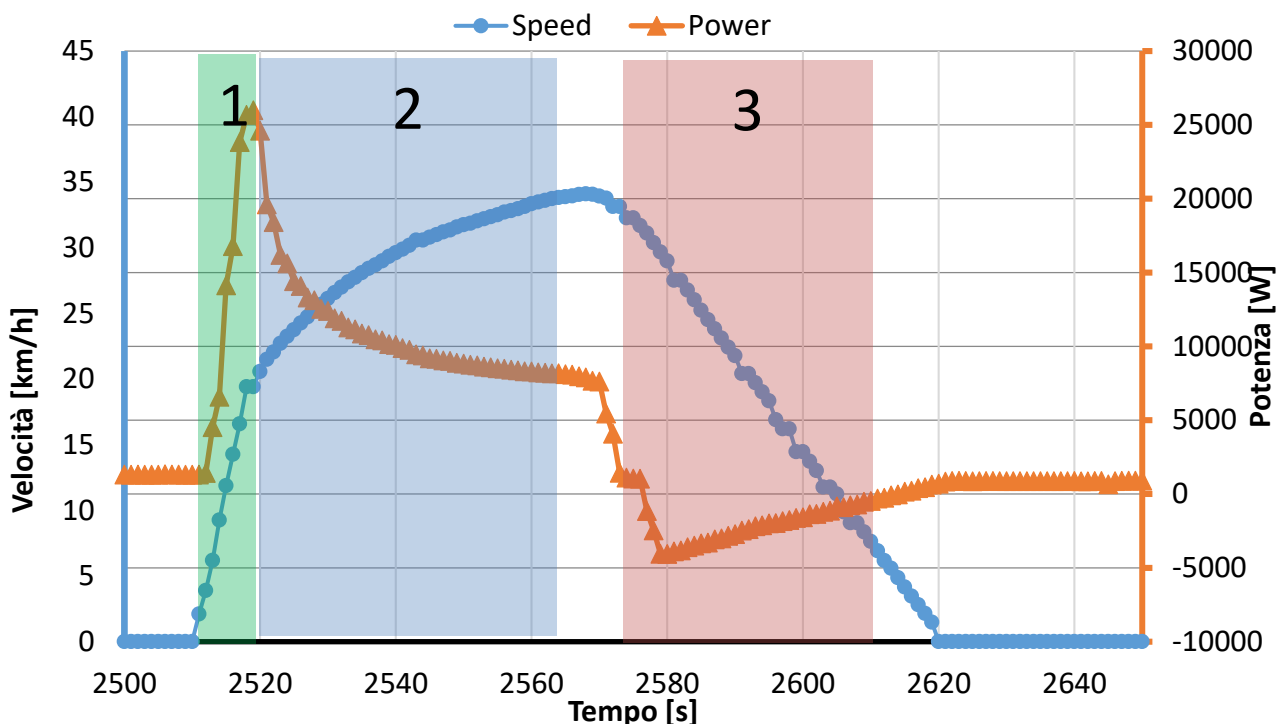


Figura 8 Suddivisione della prova in zone

In Tabella 1 sono mostrati i dati suddivisi per le zone individuate. Da notare che la durata della zona 3 è inferiore alla durata della frenata, la quale richiede 52 secondi e percorre 260 m.

Tabella 1 Riepilogo dati suddivisi per zone

Dato	Unità	Zona 1	Zona 2	Zona 3
Tempo	s	10	50	38
Spazio	m	26	410	211
Energia	Wh	20	72	10

La prova mostrata sin qui è il massimo ottenibili in condizioni di strada piana e massima accelerazione da fermo e utilizzo massimo della frenata rigenerativa, nell’uso quotidiano tali condizioni sono irreali, pertanto sulla base di prove già effettuate è stata misurata l’energia scambiata dal bus nelle fasi di accelerazione e frenata di un utilizzo urbano. Alle condizioni reali si devono aggiungere anche la dipendenza dalla pendenza del percorso stradale, dalle condizioni di traffico, dal carico di passeggeri a bordo del veicolo.

Si mostra in Figura 9 un estratto dell’andamento di velocità ed energia scambiata dal pacco batterie in un percorso misto, fatto su strade con pendenza variabile, ma purtroppo con carico di passeggeri minimo (veicolo con 200 kg a bordo oltre a guidatore) e considerando il fatto che il veicolo testato adottava un sistema di accumulo con batterie al litio, quindi con peso in esercizio ridotto rispetto alla versione originale con batterie al piombo di circa 1200 kg.

I risultati per il percorso analizzato sono: Energia recuperabile varia tra 8 e 30 kWh, Energia da spendere per accelerare il veicolo da fermo sino alla velocità massima per il “miniciclo” variabile tra 170 e 300 Wh.

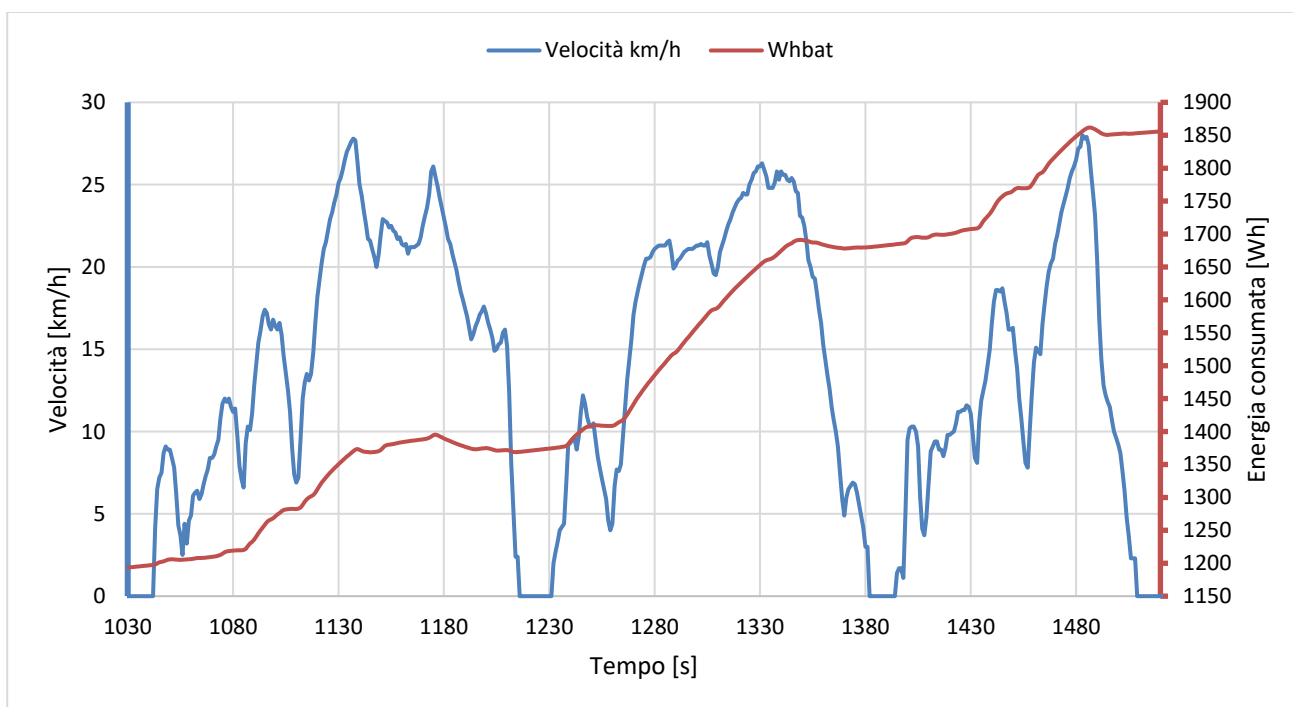


Figura 9 Confronto velocità ed energia in un percorso misto

Per tenere traccia della variabilità delle condizioni di esercizio è stata costruita una curva di consumo medio al variare della velocità media (Figura 10), usando questa volta i dati disponibili per il bus in versione originale con batterie al piombo, al quale però era stata disattivata la frenata rigenerativa. Questi dati contengono nella loro variabilità tutti i fattori reali di un servizio di trasporto passeggeri che non sono stati indagati nelle analisi precedenti.

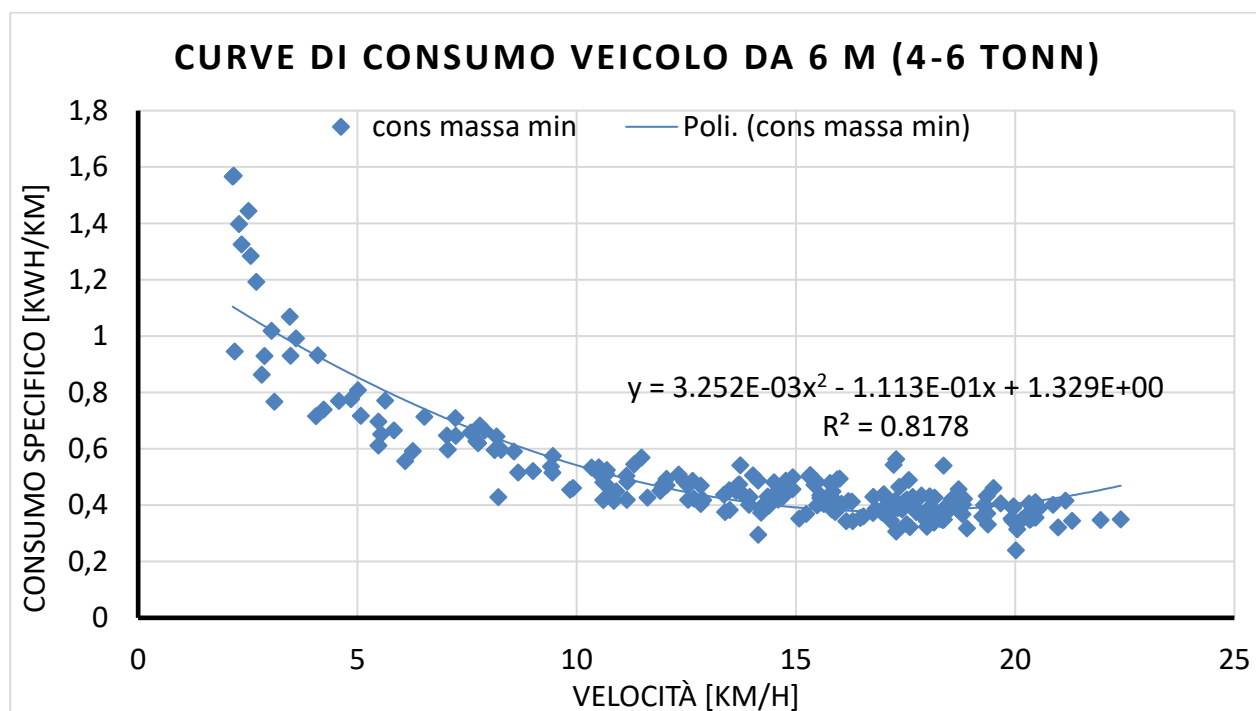


Figura 10 Curva consumo medio al variare della velocità

Il sistema proposto, visibile in Figura 11 prevede di utilizzare un sistema di super-condensatori atti a poter essere ricaricati con potenze significativamente uguali o comunque uguali a quelle utilizzate tra due fermate successive in modo da aumentare indefinitamente l'autonomia degli accumulatori al piombo installati sul veicolo.

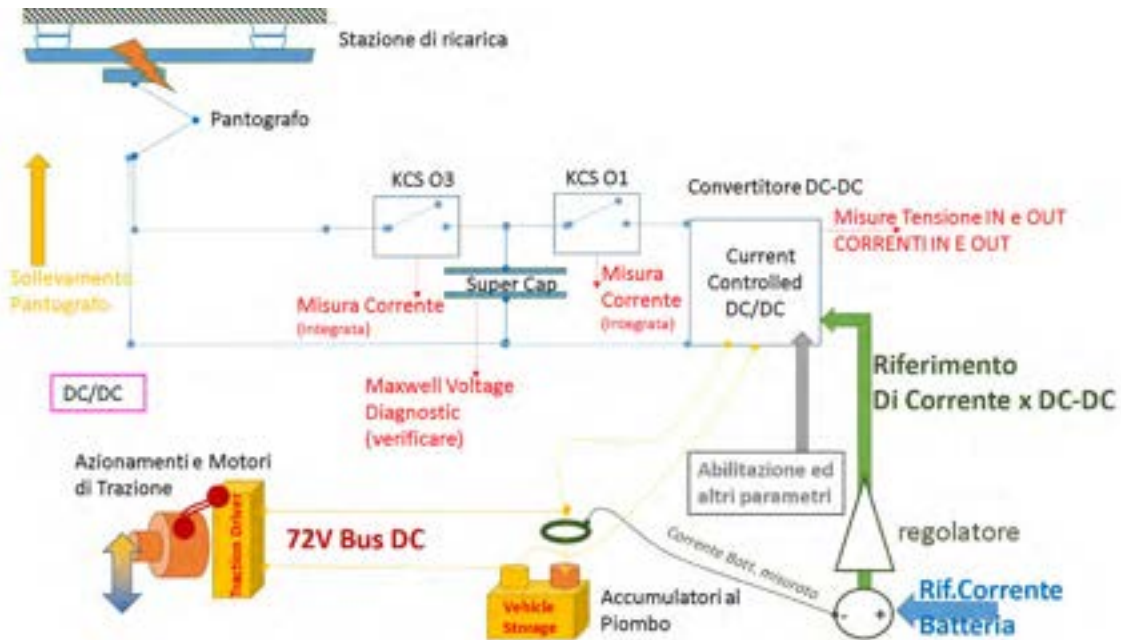


Figura 11 Schema di principio del sistema da realizzare

Integrando una potenza media assorbita di circa 2.5 kW per una durata di circa 160 secondi si ottiene una energia necessaria alla trazione di circa 400Wh.

Al netto dei rendimenti di conversione dei vari apparati (incogniti in sede di progettazione) che possono essere utilizzati per alimentare lo stadio a tensione impressa del chopper si può valutare come sufficiente un accumulo di energia tramite super-condensatori di taglia poco superiore ai 400Wh.

Si prevede per l'accumulo tramite tre moduli di super-condensatori in serie ciascuno con una potenza nominale dichiarata di 140Wh per un totale di circa 420Wh.

I supercondensatori potranno esser ricaricati tramite una ricarica flash diretta effettuata tramite pantografo che è capace di portarli fino ad una tensione nominale di circa 375-400V.

Per alimentare lo stadio a tensione del sistema di trazione è necessario un convertitore bi-direzionale capace di funzionare da abbassatore in fase di trazione e da elevatore in fase di frenatura a recupero.

Si riporta in Tabella 2 un calcolo preliminare delle correnti transitanti nell'ipotesi di escludere dal computo l'eventuale contributo degli accumulatori al piombo in ipotesi di rendimento unitario (tutta l'energia viene trasferita dai supercondensatori al motore e viceversa). Tale calcolo preliminare guida le successive fasi di progettazione del sistema.

Tabella 2 Correnti da gestire sui vari stadi dell'apparato

	Potenza traz. Media (2.5kW)	Picco Reale In trazione (15kW)	Picco Teor. in trazione [30kW]	Frenatura Rig. Max (5kW)
Corrente Supercap*	5-10 [A]	30-60[A]	60-120[A]	10-20[A]
Corrente Bus DC**	35[A]	210[A]	420[A]	70[A]

\*La tensione del supercap è variabile per cui il valore delle correnti dipende da tensione condensatore, per il calcolo delle correnti è sensate usare un fattore di correzione di circa 2

\*\* Si assume la tensione di BUS DC è supposta pari a 72V

### 3.2 Requisiti meccanici

Per la trasformazione del veicolo sono state individuate due aree che necessitano di un adeguamento mediante l'installazione di nuove parti specifiche: l'alloggiamento delle batterie nel vano posteriore e il supporto del pantografo sul tetto (il quale sarà illustrato nel Deliverable relativo [1]).

Nella parte posteriore è necessario ridisegnare gli alloggiamenti delle batterie, che al momento sono costituito da due cassoni separati, scorrevoli, concepiti per la sostituzione rapida attraverso un sistema di movimentazione a forche.

Tuttavia, la presenza delle lamiere di separazione tra i due cassoni limita fortemente la possibilità di installare le 3 previste unità di supercondensatori i cui ingombri sono rilevanti, come indicato nella Figura 12; l'ingombro necessario se l'elemento è disposto longitudinalmente al senso di marcia è pari a circa un metro e può essere compatibile con il vano batterie del veicolo eliminando la divisione tra i due semi-alloggiamenti.

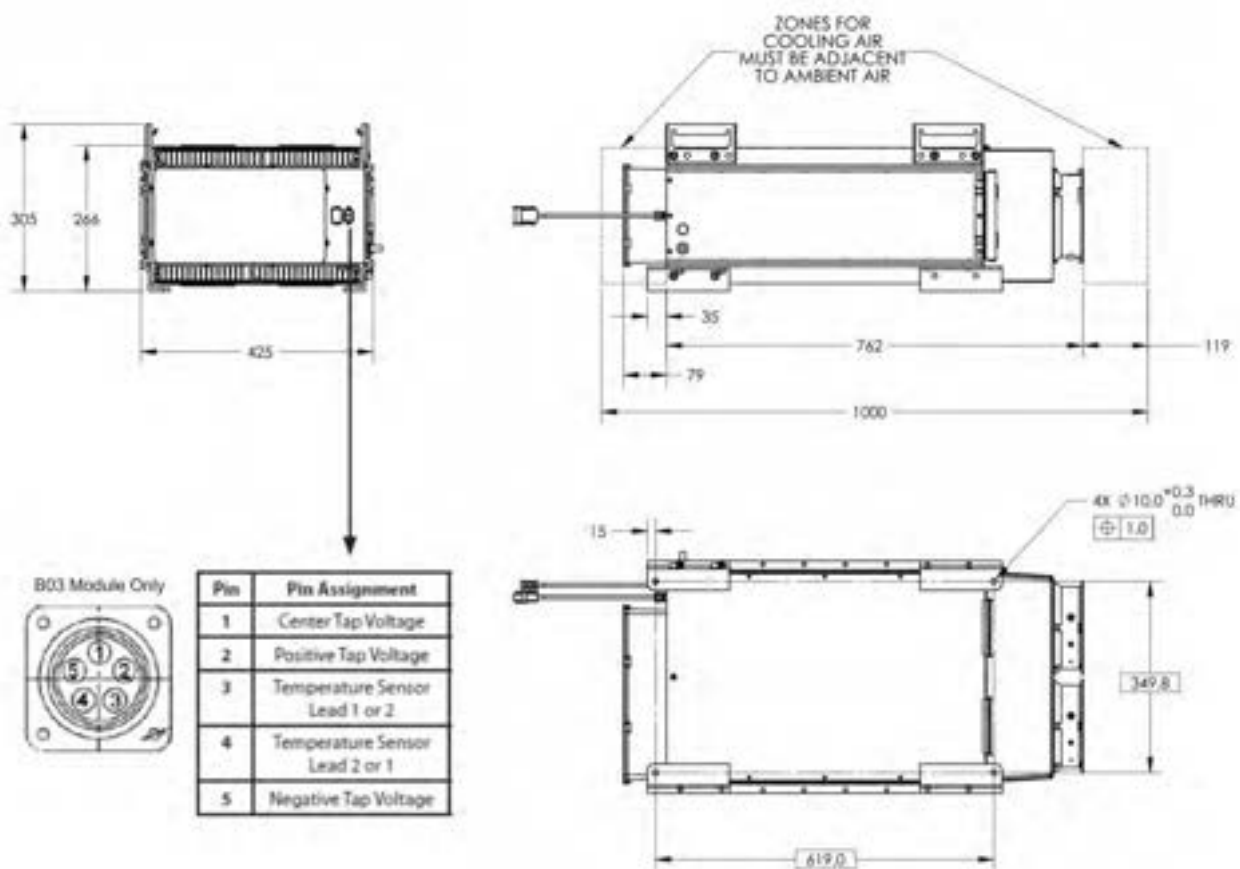


Figura 12 – Unità supercondensatori Maxwell (estratto dalla documentazione scaricabile da [www.maxwell.com](http://www.maxwell.com)).

Pertanto, l'alloggiamento verrà ridisegnato avendo come requisiti:

- possibilità di ospitare tutti i componenti del nuovo powertrain
  - 3 elementi supercondensatori da 125 V
  - Convertitori DC/DC 400V-175V, preliminarmente individuati nei convertitori “TAME”, i cui ingombri sono in via di definizione
  - Alloggiamento di tutti gli elementi costituenti il sistema di controllo e movimentazione del pantografo alimentati in bassa tensione (24V)
    - Sono esposti nel paragrafo 3.3 e comprendono scatole di distribuzione, relè, alimentatori, fusibili, contattori

- Capacità di ospitare gli elementi accumulatori analoghi a quelli standard (batterie al piombo, 72V nominali), riducendone però la capacità fino ad ottenere un valore pari a circa il 40% di quello originario
- compatibilità completa con il vano esistente in modo da evitare, per quanto possibile, qualsiasi alterazione del telaio per mantenerne l'integrità strutturale
  - In particolare non deve essere previsto alcun collegamento saldato al telaio esistente
- Mantenimento della possibilità di estrarre la cassa di contenimento delle batterie e degli altri organi senza modificare radicalmente la procedura (es. senza la necessità di sollevare l'intero veicolo, senza la necessità di intervenire sul sistema sospensivo posteriore)
- Contenimento della massa complessiva a un valore minore o uguale a quello del veicolo originario.

### 3.3 *Requisiti del sistema di controllo e di gestione*

Le funzioni di controllo propriamente dette e quelle di acquisizione dati vengono svolte su piattaforme sostanzialmente indipendenti. Per quanto riguarda la acquisizione dei dati si prevede che questa possa avvenire utilizzando un hardware dedicato (PC industriale o similare) con elevata capacità di accumulo dei dati (possibilità di registrare in un singolo file l'equivalente di una intera giornata di servizio) senza interferire in nessun modo con l'esecuzione di processi "vitali" per il controllo e la sicurezza del sistema svolti su altri componenti dedicati.

Per quanto riguarda invece le funzionalità di controllo e sicurezza propriamente dette si prevede la loro implementazione su dispositivi dedicati che garantiscano la esecuzione in tempo reale e la relativa robustezza/sicurezza del sistema rispetto alla condizione di failure (non corretto comportamento di almeno un componente utilizzato).

Per quanto riguarda le funzioni da realizzare si fa riferimento allo schema semplificato di Figura 11.

In particolare, si devono realizzare le seguenti le funzioni di controllo da realizzare:

- Controllo Semi-automatico della sequenza di sollevamento ed abbassamento del pantografo: si prevede una attivazione manuale del sollevamento ed abbassamento del pantografo eventualmente vincolata al corretto stato dei sistemi collegati. In particolare il sollevamento del pantografo è vincolato alla chiusura dei contatti elettrici che lo collegano ai supercondensatori ed all'apertura dei contatti che a loro volta li isolano rispetto ai convertitori DC-DC a valle. La sequenza di abbassamento è condizionata dall'isolamento del pantografo dai condensatori e quindi dal successivo ripristino del loro collegamento con i convertitori DC-DC a valle degli stessi;  
Si ritiene di poter realizzare questa funzionalità con logica a relè o similare magari controllata da PLC o microcontrollore;
- Controllo in corrente dei convertitori DC-DC: si prevede di poter controllare in corrente il convertitore DC-DC in modo da poter regolare con facilità il flusso di potenza bidirezionale tra supercondensatori ed i vari sistemi collegati al bus DC a 72V. Si ritiene che tale funzionalità debba essere implementata a basso livello a bordo dello stesso convertitore DC-DC.
- Regolazione del flusso di potenza agli accumulatori al piombo: si ritiene di poter ridurre il controllo dei flussi di potenza del sistema ad un banale controllo delle correnti di carica e scarica della batteria. Imponendo che queste debbano avere un valore noto (eventualmente variabile in funzione dello stato del veicolo), produrrà attraverso un anello di regolazione in retro-azione un riferimento di corrente per il convertitore DC-DC atto a mantenere il riferimento desiderato.

In questo modo le richieste di potenza degli altri apparati collegati saranno automaticamente compensate dal convertitore DC-DC che di fatto sarà regolato in modo da reiettare l'azione degli altri sistemi collegati come disturbi dell'anello di regolazione. Il corretto funzionamento di questo anello di regolazione è fondamentale per tutto il sistema di trazione. A tale scopo si suggerisce di realizzare tramite micro-processori e sensori di corrente dedicati, adottando configurazioni ridondanti che

possano garantire un relativo livello di sicurezza rispetto alla failure di uno dei componenti l'anello di regolazione.

- Protezione e gestione di utenze a 24V/bassa tensione: per il corretto funzionamento dei vari apparati realizzati è necessaria la disponibilità di una alimentazione di servizio a 24V, si prevede sistema di sezionatori e relay per la corretta gestione di queste ulteriori alimentazioni in bassa tensione.

### 3.4 *Requisiti dettagliati del sistema di controllo e regolazione ai fini dell'integrazione nel veicolo*

Considerando la necessità di installare l'impianto su un veicolo esistente, sono proposti per l'apparato di controllo una serie di requisiti aggiuntivi di funzionamento che mirano a semplificare l'integrazione e a garantire la massima sicurezza operativa durante le fasi di utilizzo, compatibilmente quindi con i vincoli imposti dalla necessità di effettuare "retrofit" piuttosto che di concepire i sistemi veicolo ex-novo.

Inoltre sebbene il pantografo sia oggetto di un'altra parte di progetto e vi sia apposita reportistica, si è ritenuto opportuno considerare i requisiti di progettazione del sistema di controllo insieme a quelli utilizzati per il controllo e la misurazione del sistema di accumulo, in modo da considerare tutte le funzioni in una progettazione integrata (di minor costo).

Per quanto riguarda quindi il sottosistema di controllo dell'impianto di potenza gli obiettivi sono:

- Non interferire con le comunicazioni dati esistenti sul veicolo in modo da poter causare, in via ipotetica, modalità di guasto tali da provocare l'arresto del veicolo
  - Ciò significa che le comunicazioni dovranno avvenire, se su linea CAN-BUS, su una linea dedicata e separata da quella eventualmente esistente sul veicolo; altrimenti, se fosse necessario affacciarsi sulla stessa linea, prevedendo componenti dotati di opportuno isolamento galvanico
- Permettere all'impianto di salvaguardare le funzionalità di base del veicolo, in modo tale che l'eventuale failure di uno dei sottosistemi legati al controllo del pantografo e dei convertitori di potenza non implichi l'arresto del veicolo. A tal fine:
  - L'alimentazione dell'intero sottosistema sarà fornita da uno o più convertitori DCDC collegati alle batterie con un conduttore aggiuntivo, protetto da cortocircuito, che non interferisca con i carichi esistenti. Gli impianti a 12V e 24V del veicolo rimangono quindi in configurazione standard
  - L'interfaccia utente per il controllo del pantografo (es. joystick, spie, interruttori di emergenza) verranno posti su un pannello aggiuntivo, senza connettersi direttamente con i conduttori degli impianti esistenti sul veicolo
- Garantire robustezza del sistema privilegiando in qualsiasi caso azioni che evitino il rischio di danneggiamento delle parti soggette ad alta tensione
  - Sebbene le specifiche dell'infrastruttura di ricarica a terra preveda che l'alimentazione verso i supercondensatori sia abilitata solo al termine di una breve procedura di diagnostica, anche il sollevamento del pantografo sarà abilitato al termine di una auto-diagnostica da eseguire prima di ogni sollevamento
  - La diagnostica di bordo prevede il rilievo delle tensioni ai condensatori e l'entità delle correnti sia sulla sezione ad alta tensione (compresa tra 150-380V per i supercondensatori) sia sulla parte a tensione più bassa (tensione nominale 80V delle batterie al piombo); entrambe i valori saranno ottenuti in modo simultaneo da più sorgenti, e in caso di discrepanza tra i rilievi sarà prevista l'inibizione o il blocco totale delle cariche/scariche. In prima analisi le sorgenti dati da utilizzare prevedono:
    - Da linea CAN-BUS: stato della linea ad alta tensione come letto dai convertitori di potenza DCDC e come fornito dai moduli supercondensatori MAXWELL
    - Da sensori analogici: interfacciamento con più sensori di corrente, disposti all'interno dei ruttori di tipo KCS e altri aggiunti appositamente. I sensori usati

- saranno del tipo ad effetto HALL (privi di contatto diretto con i conduttori ad alta tensione). In forma preliminare i sensori saranno di tipo LEM con uscita in tensione.
- privilegiare intelligenze distribuite collocate in prossimità dell'utilizzatore aventi le funzioni di:
    - rilevare i segnali analogici ed effettuare un primo condizionamento del segnale prima di inviarlo via CAN-BUS
    - leggere segnali di consenso/inibizione (es. heartbeat) da linea CAN-BUS ed interpretarli correttamente
    - comparare i dati provenienti da altre parti del sistema ed avere la capacità di lanciare segnali di consenso/inibizione a loro volta in caso di anomalie presunte
    - avere un costo basso, in modo da favorire l'installazione di più sistemi (in forma anche ridondante) riducendo il rischio di modalità di guasto non rilevabili che abbiano conseguenze distruttive.

Ai fini della sicurezza di esercizio, si prevede l'installazione di pulsante di emergenza per l'immediato spegnimento e la messa in sicurezza dei principali apparati di bordo qualora gli utenti riscontrino condizioni di funzionamento anomale.

Al momento dell'installazione del pantografo, che in prima analisi non permette per le caratteristiche costruttive funzioni di "abbassamento rapido" per gravità, sarà valutata la possibilità di emulare un abbassamento rapido mediante implementazione di un opportuno codice di controllo all'interno di un ulteriore microcontrollore dedicato. L'eventuale modalità di abbassamento potrà essere legata ad uno o più segnali di emergenza forniti dall'utente del veicolo (es. legandolo al pulsante di emergenza principale o ad un pulsante di emergenza differenziato per questo scopo).

Nella selezione dei componenti sarà data priorità a quelli aventi caratteristiche "automotive"; tuttavia, dovendo garantire funzionalità tipicamente non standard, si prevede come inevitabile il ricorso a componenti di tipo per impianti diversi/generici e il ricorso anche a sistemi di prototipazione. Ad ogni modo si stabilisce come gerarchia delle necessità i seguenti parametri, ordinati da quello prioritario a quello secondario:

- sicurezza dell'utente rispetto al rischio elettrico
- rispetto specifiche in termini di funzionalità
- qualità della protezione da polvere/umidità ed uso in ambienti gravosi
- resistenza alle vibrazioni secondo standard automotive

Altre norme, quali ad esempio il rispetto delle norme relative all'omologazione ed alle emissioni elettromagnetiche per i veicoli (es. Reg. 10), avranno invece priorità secondaria in quanto giudicate non indispensabili per la fase attuale di dimostrazione in forma prototipale.

## 4 Progettazione

Il sistema precedentemente descritto avrà come priorità di inibire nel modo più assoluto l'invio di correnti eccessive all'accumulatore al piombo, che potenzialmente potrebbero danneggiarlo.

A tale scopo, la lettura delle correnti in transito dal DC-BUS verso l'accumulatore sarà letta da due coppie di sensore/microcontrollore, e solo in caso di perfetta omogeneità della lettura sarà abilitata l'erogazione di potenza dai supercondensatori verso il DC-BUS. La lettura ridondante è tesa a minimizzare il rischio che il danneggiamento degli organi di misura (possibile a seguito di degrado nel tempo e vibrazioni tipiche di sistemi gravosi quali gli impianti veicolari) possa provocare l'errata erogazione di potenza.

Similmente, il sollevamento del pantografo, che fornisce segnali analogici tramite una terna di switch elettromeccanici, sarà comunque soggetto al controllo in tempo reale da parte di un microcontrollore dedicato in grado di condividere i dati con altri utilizzatori sul veicolo.

In conclusione, gli organi principali disposti nel sottosistema dedicato al pantografo ed ai supercondensatori di potenza prevede la disposizione indicata in Figura 13. In riferimento a quest'ultima gli organi indicati sono:

- A. Microcontrollori a basso costo disposti in più punti della linea, in prossimità degli utilizzatori, e integrati nella rete di comunicazione

- B. Ruttori per alte correnti e tensioni comprendenti sensori integrati (es. tipo KCS), in grado di sezionare il pantografo rispetto ai supercondensatori, e i supercondensatori rispetto al resto del veicolo
- C. Ruttori per basse correnti e tensioni, sistemi ausiliari (preliminarmente individuati del tipo a 24V)
- D. Sistemi di controllo per l'utente (Joystick, spie, bottoni etc.)
- E. Convertitori di potenza in tensione continua DC/DC, posti tra la linea a 150-380V e quella a 80V (es. TAME converters)
- F. Conduttori e sistemi di protezione per il sistema ausiliario a 24V, alimentato dalla linea a 80V
- G. Convertitori in tensione continua DC/DC posti tra la linea a 80V e quelli a 24V
- H. Sensori di corrente di tipo HALL, disposti in prossimità dell'accumulatore al piombo per rilevare la corrente effettiva in modo ridondante
- I. Pulsanti di emergenza per l'utente
- J. Ruttore per il sezionamento del sistema a 24V rispetto al sistema a 80V.

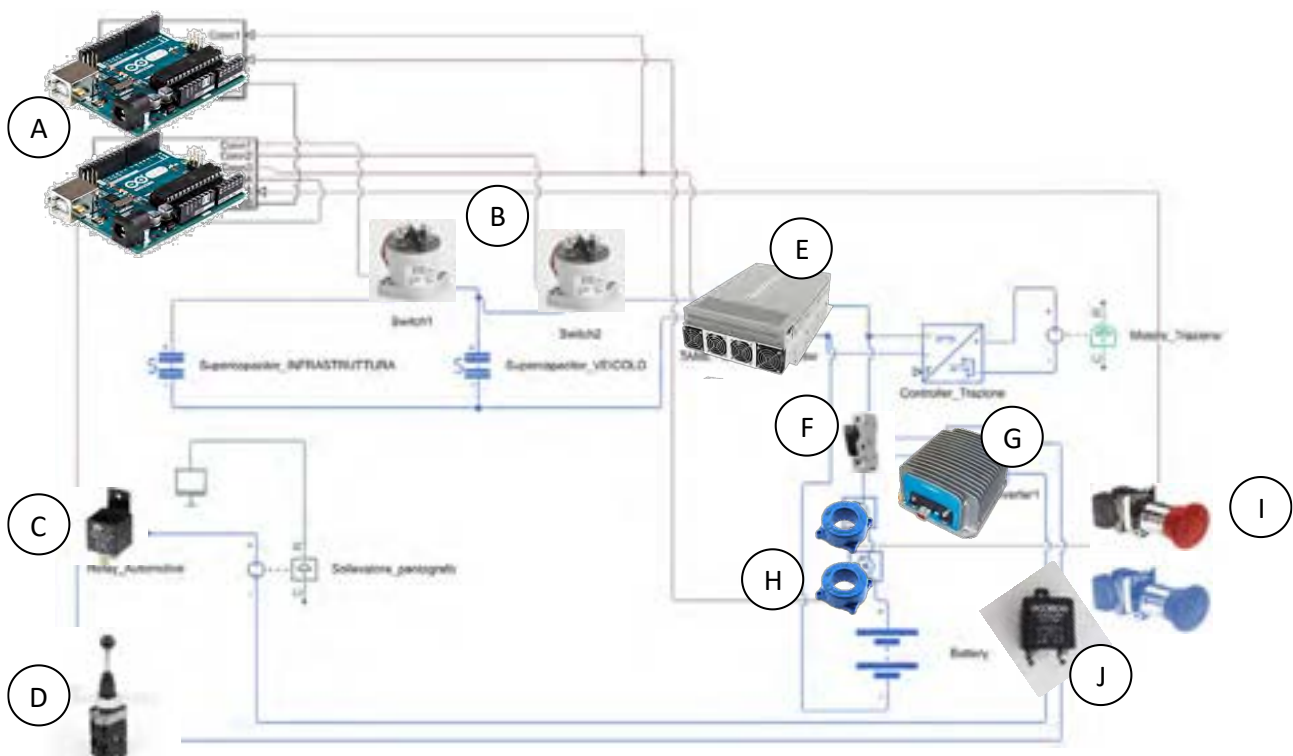


Figura 13 Organi principali previsti per l'implementazione del sistema pantografo-supercondensatori nel veicolo elettrico.

## 5 Lista dei materiali necessari per il progetto e considerazioni conclusive della fase di progettazione

I materiali necessari sono sinteticamente indicati qui di seguito, mentre una lista dettagliata è disponibile nell'allegato 1.

- Convertitori DC/DC di potenza –400V / 80V ; 5000W; 2 esemplari
- Convertitore DC/DC per sistemi ausiliari – 80V/24V
- Convertitori DC/DC per varie gamme di tensione (24V/5 e 12V)
- Teleruttori con sensori di corrente integrati fino a 600 A (misure in tensione 0-5 V)
- Microcontrollori e loro accessori
  - Arduino "UNO"
  - Arduino "MEGA"
  - Scheda comunicazioni CAN-BUS

- Scheda acquisizione analogica ad alta precisione -12 bit o superiore
- Scatola per distribuzione – segnali e piccole potenze di azionamento
  - Barre DIN
  - Spie luminose
  - Fusibili in taglie da 1 a 20°
  - Relè (vari formati in funzione delle correnti)
  - Morsettiere

Nella fase di progettazione preliminare sono state esaminate le caratteristiche principali del veicolo, dei componenti da installare e degli adeguamenti meccanici da svolgere per permettere l'installazione del pantografo e dei nuovi elementi di potenza. La progettazione preliminare è stata svolta con criteri di modularità, riproducibilità, economia, nel rispetto delle prestazioni del veicolo nel suo complesso.

Nella selezione dei sistemi di potenza si sono privilegiate le soluzioni che permettono di non intervenire sul sistema esistente, limitando l'intervento all'aggiunta di un collegamento di potenza con la sezione a 72V delle batterie.

Particolare attenzione verrà prestata al sistema di controllo, che dovrà essere fail-safe rispetto ai rischi di funzionamento individuati in questa fase e pertanto sarà costruito in maniera ridondante.

Gli ingombri del nuovo powertrain in prima analisi risultano compatibili con lo spazio esistente nel vano compreso tra le ruote posteriori, anche se risulta necessaria una realizzazione ex-novo della cassa di contenimento degli organi.

## 6 Attività meccaniche

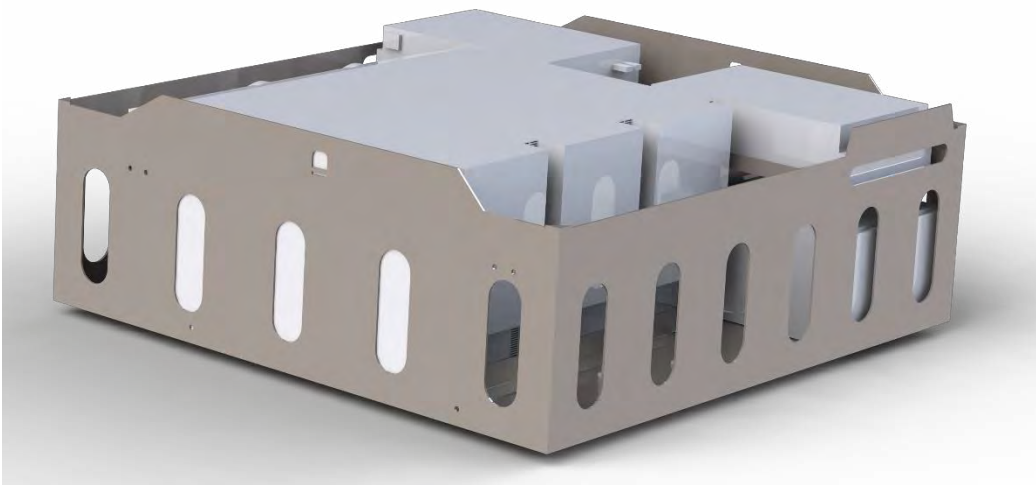
Le attività di tipo meccanico riguardano le seguenti parti:

1. Test funzionamento dell'autobus esistente
2. Realizzazione e assemblaggio del sistema di accumulo misto attraverso la costruzione di un nuovo cassone, al posto dei due vecchi porta-batterie al piombo, per alloggiare tutto il sistema nel vano batterie

La prima micro attività mirava ad accendere l'autobus e testare le principali funzioni di marcia, i dispositivi di sicurezza di bordo (es. servofreno, servosterzo, interruttori generali e funghi d'emergenza), nonché il sistema pneumatico che gestisce le sospensioni e l'apertura della portiera passeggeri.

Il sistema di accumulo ibrido e tutti i sistemi di controllo e comando sono alloggiati a bordo del bus nell'apposito vano batterie, pertanto è stato progettato un cassone personalizzato (Figura 14).

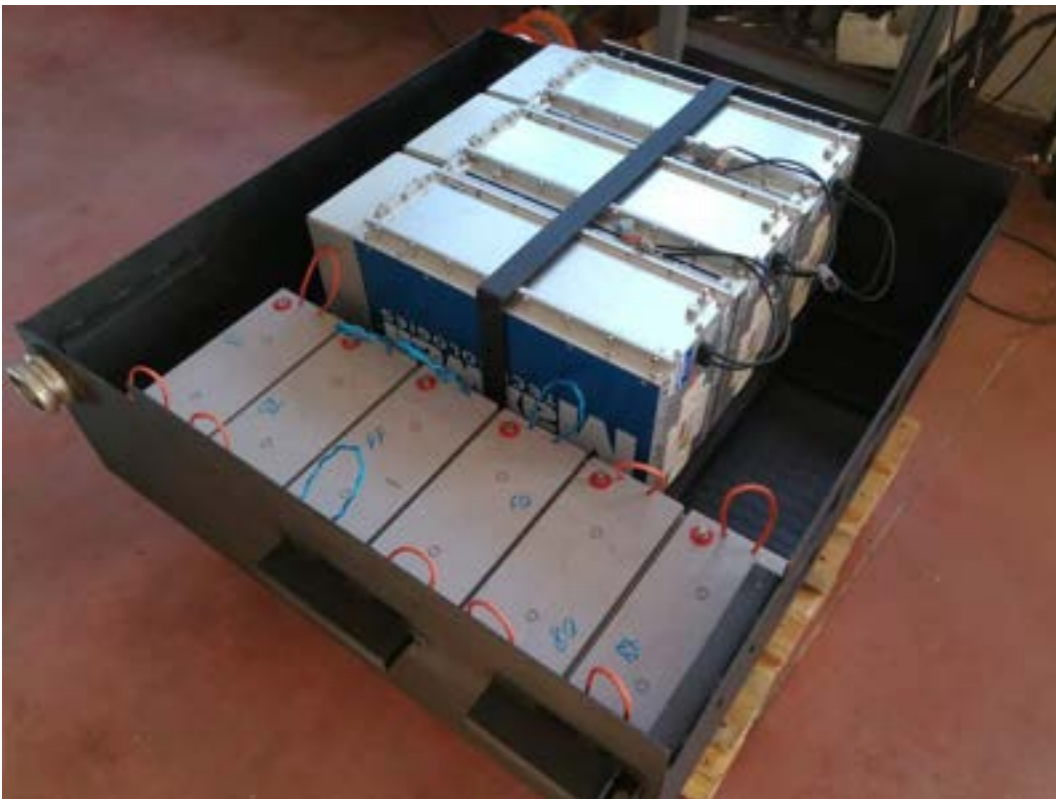
Quindi tale cassone è stato dimensionato in base alle dimensioni e peso degli organi installati, rispettando gli ingombri e ancoraggi dell'alloggiamento sul bus.



**Figura 14** Rendering del cassone personalizzato

Tutte le attività meccaniche sono state completate come previsto dal progetto nei tempi stabiliti.

In Figura 15 si riporta il cassone smontato e Figura 16 nell'apposito vano del bus.



**Figura 15** il cassone realizzato con alloggiare batterie e supercapacitori



Figura 16 il cassone installato a bordo del bus laboratorio

## 7 Attività elettriche

Le attività di tipo elettrico riguardano le seguenti parti:

- Accensione e comunicazione DC-DC
- Accensione e comunicazione supercap
- Collegamenti di potenza tra i dispositivi componenti il sistema di accumulo (supercap, batterie, teleruttori, DCDC)
- Sistema di controllo elettronico con Arduino

Gli Azionamenti DC-DC Tame sono protetti da condizioni di lavoro potenzialmente pericolose da una serie di protezioni load sensing che verificano direttamente tensioni e correnti di lavoro sui due lati dei convertitori e quindi indirettamente (corrispondente misura derivata da tensioni e correnti) limitazioni di potenza su stadi di ingresso ed uscita dell'azionamento.

I sistemi meccanici ed elettrici realizzati sono stati sottoposti a test come descritto nel Report RdS/2017/238, risultato di una attività congiunta UNIFI ed ENEA.

Nel successivo paragrafo si riporta invece la descrizione di un modello di dimensionamento del sistema di accumulo misto a partire dalle caratteristiche del servizio e delle stazioni di ricarica in commercio.

## 8 Principi generali di dimensionamento

Questa parte del progetto contiene il dimensionamento delle infrastrutture di ricarica data una linea di trasporto. Il paragrafo è strutturato in due parti: definizione dell'algoritmo e output.

### 8.1 Definizione dell'algoritmo

Dati di input per questa fase sono una determinata linea di trasporto, sotto forma di profilo di velocità e orografia del territorio (altitudine), ad esempio in Figura 17 è riportato un estratto della linea di Bologna.

Tali dati possono essere acquisiti tramite GPS o altri strumenti.

Possono avere risoluzione di 1 Hz o superiori.

Sono necessari inoltre i dati dell'autobus che si andrà ad usare, almeno sotto forma di dimensioni e tipo.

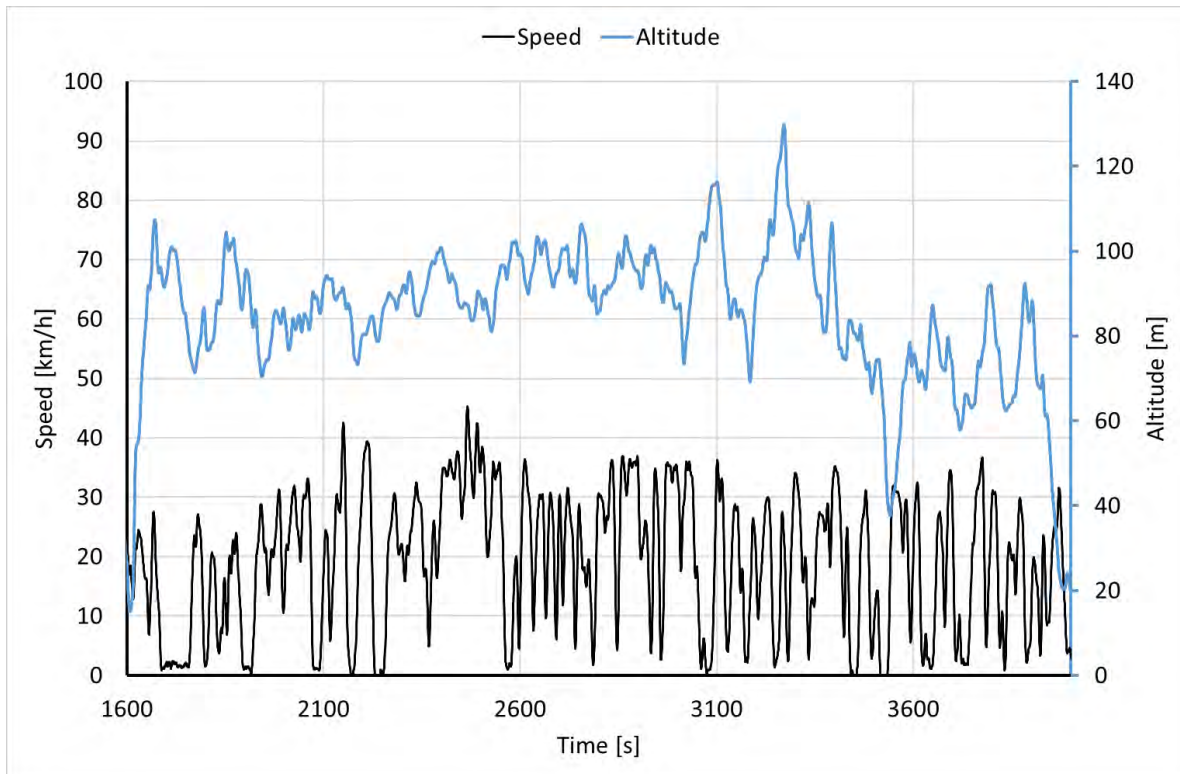


Figura 17 Estratto della linea di trasporto 13 a Bologna

Per ogni tipologia di autobus sono tabellati i coefficienti delle resistenze all'avanzamento, quindi per ogni dato campionato della linea da esaminare sono stati calcolati i seguenti valori:

- La potenza necessaria per il moto (calcolata per i valori di massa minima e massima in esercizio di marcia ottenuta come somma delle potenze resistenti all'avanzamento (si riportano di seguito le equazioni utilizzate, per maggiori dettagli vedere [2]):

- Inerzia;

$$P_{In} = m \cdot a \cdot V$$

- Rotolamento;

$$P_{Rot} = m \cdot g \cdot (f_0 + k \cdot V^2) \cdot V$$

- Aerodinamica.

$$P_{Aero} = \left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_x \cdot V^2 \right) \cdot V$$

- L'assorbimento dei servizi (costante e pari al valor medio misurato);

I simboli delle formule indicano:

- m=massa del veicolo
- a=accelerazione (negativa se in decelerazione)
- V=velocità del veicolo
- g=accelerazione gravitazionale
- f<sub>0</sub>=coefficiente di resistenza al rotolamento degli pneumatici
- k=secondo coefficiente di resistenza al rotolamento degli pneumatici
- ρ=densità dell'aria (1.23 kg/m<sup>3</sup>)
- C<sub>x</sub>=coefficiente di penetrazione aerodinamica

Va aggiunta solamente la componente relativa al superamento della pendenza, ma che partendo dai dati acquisiti dal GPS non può essere attendibile in quanto affetti da troppi errori di acquisizione, per cui occorre una fonte di dati più precisa al fine di stabilire questa spesa energetica.

Se si vuole tener conto del dislivello da superare basandosi sui soli dati del GPS, si può considerare il caso mostrato in Figura 18, come si vede il dato è fortemente affetto da errori, ma esso mostra un evidente tendenza ad aumentare.

In prima approssimazione si potrebbe tener conto della conversione di energia cinetica in energia potenziale, nel qual caso per raggiungere la quota di 96 metri partendo dalla quota di 40 m.

La formula per tener conto di questa spesa è la seguente:

$$E_p = m \cdot g \cdot h$$

Dove h è il dislivello in metri, g l'accelerazione gravitazionale, l'energia in questo caso è misurata in Joule, per cui per passare a Wh si deve dividere per 3600. Ad esempio il bus 18 metri della linea in questione ha una massa massima di 29 tonnellate, e l'energia che compete questo dislivello è 14,2 MJ ovvero circa 3900 Wh, per cui il consumo dell'intera linea deve essere aumentato almeno di questa componente.

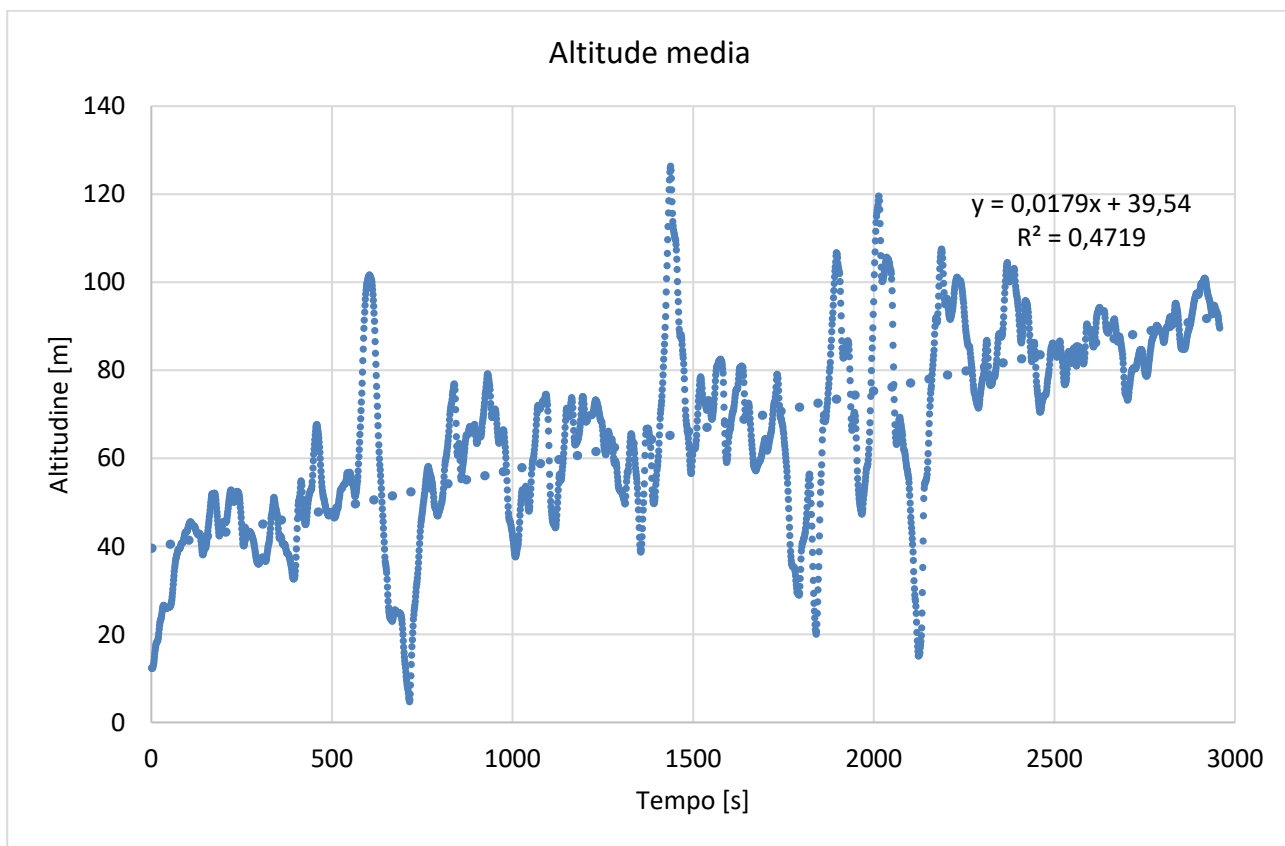


Figura 18 Altitudine misurata dal GPS

Nel caso in cui il veicolo si trovi nella condizione opposta si potrebbe considerare un rendimento di conversione di questa energia, per cui si può immaginare che una parte dell'energia potenziale possa essere recuperata, a fronte di un minor consumo per avanzare, in prima approssimazione si può ipotizzare una riduzione di consumi del 40% del valore dell'energia potenziale disponibile.

Oppure in via cautelativa considerare che tutta l'energia potenziale accumulata venga dissipata a causa delle numerose fermate per realizzare il servizio di trasporto.

Tali assunzioni possono essere impostati a fronte di analisi tecniche e rilevazioni sul territorio.

Questi calcoli consentono all'algorithmo di determinare il fabbisogno energetico per soddisfare la linea di trasporto.

In Tabella 3 sono riportati i parametri per calcolare le resistenze al moto, in

Tabella 4 vi sono quelli relativi alla linea di trasporto, mentre in

Tabella 5 i dati del sistema di accumulo utili per stimare il fabbisogno energetico.

**Tabella 3 Alcuni parametri di calcolo**

Simbolo	Parametri generali veicolo		Udm	Valore consigliato
<b>alfa</b>	Pendenza fissa percorso	0%		
<b>m_vuoto</b>	Massa a vuoto	3500	kg	bus 18m 160000, bus 10m 3500
<b>Cx</b>	Coefficiente di penetrazione aerodinamica	0.80		bus 0.6/0.8, auto 0.2/0.4
<b>A</b>	Area frontale	9.20	m <sup>2</sup>	
<b>f0</b>	1°coefficiente attrito	0.015		bus 0.015
<b>k</b>	2°coefficiente attrito	0.0000778	s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	bus $6 \cdot 10^{(-6)} \cdot 3.6 \cdot 3.6$
<b>eta</b>	Rendimento medio motore elettrico e trasmissione	0.80		
<b>Aux</b>	Assorbimento ausiliari	1300	W	bus 18m 17000 W, bus 12m 6000 W, bus 6m 1300 W
<b>P_rig_max</b>	Massima potenza in ricarica rigenerativa	5000	W	bus 18m 50000 W, bus 10m 15000 W, bus 5m 6000 W
<b>P_rig_min</b>	Minima potenza in ricarica rigenerativa	1500	W	di solito per problemi di inversione dell'elettronica si ferma la frenata rigenerativa quando la velocità è inferiore a 5km/h, e potenze dell'ordine dei 5000 W per bus grandi, di 1500 W dei bus piccoli
<b>Dec_max</b>	Massima decelerazione in frenata	-2	m/s <sup>2</sup>	In auto con cinture di sicurezza 5, in bus 1.5/2 nei casi reali ma dovrebbe essere max 1
<b>Acc_max</b>	Massima accelerazione	1.5	m/s <sup>2</sup>	In auto con cinture di sicurezza -5, in bus -1.5/2 nei casi reali ma dovrebbe essere max -2
<b>Pot_max</b>	Potenza massima motore	25000	W	bus 18m 230000 W, bus 12 m 150000, bus 6m 25000 W
<b>m_med</b>	Massa media	4250	Kg	
<b>m_max</b>	Massa massima a pieno carico	5000	Kg	bus 18m 290000, bus 12m 19000, bus 6m 5000
	Dislivello massimo da superare	50	M	

**Tabella 4 Parametri trasportistici**

Numero di corse giornaliere del veicolo	12	corse
km percorsi fuori linea	18	km

**Tabella 5 Parametri del sistema di accumulo**

Capacità interna supercapacitore	63	F
Numero elementi in serie	3	
Numero elementi in parallelo	1	
Tensione nominale max singolo capacitore	125	V
Tensione nominale min singolo capacitore	62.5	V
Tensione nominale max totale	375	V
Tensione nominale min totale	187.5	V
Capacità accumulo totale	21	F
Energia capacitori	308	Wh

### Output dell'algoritmo

In output all'algoritmo di simulazione c'è il fabbisogno energetico per completare il percorso di input impostato, ed in base a questo fabbisogno varie alternative di sistema di accumulo e sistema di ricarica dedicato.

In Tabella 6 sono indicati i risultati della simulazione, sotto forma di consumo energetico per seguire l'intera linea di trasporto, nonché un consumo medio.

In Tabella 7 è mostrato il dimensionamento delle stazioni di ricarica intermedia sotto forma di numero di stazioni e energia caricata, nonché distanza massima tra le stazioni di ricarica.

Per confronto è stata riportata in Tabella 8 il dimensionamento di un sistema di accumulo con carica fast a 3C e ricarica notturna.

**Tabella 6 Risultati di consumo energetico della linea**

Fabbisogno energetico della linea a VUOTO	kWh	4.1
Fabbisogno energetico della linea a MEDIO carico	kWh	4.5
Fabbisogno energetico della linea a PIENO carico	kWh	4.8
Distanza percorsa nella linea di trasporto	km	10
Consumo a km medio nel caso di PIENO carico	kWh/km	0.480
Fabbisogno giornaliero massimo	kWh	139

**Tabella 7 Tempo di ricarica e numero di stazioni intermedie**

Tempo di ricarica stazione con interna al percorso	minuti	0.5
Numero di stazioni di ricarica intermedie di linea		21
Energia ricaricata all'interno del percorso	kWh	6.5
Distanza massima tra le stazioni	km	0.600

**Tabella 8 Risultati di paragone per una ricarica notturna**

Numero di stazioni di ricarica		1
Quantità di energia stoccate a bordo nelle batterie per raggiungere la stazione successiva	kWh	174
Taglia potenza di stazione	kW	50.0
Tempo di ricarica con Stazione	minuti	208

Ad esempio, la linea indicata in Figura 17, per compiere una corsa di andata (9 km) con un minibus da 30 posti, necessita di 4.1 kWh se fatti a vuoto (senza alcun passeggero) e 5 kWh se fatti a pieno carico.

Le soluzioni possibili per soddisfare questa linea di trasporto potrebbero essere:

1. linea aerea elettrificata
2. ricarica notturna
3. ricarica opportunistica al capolinea
4. ricarica opportunistica alla fermata

Per quanto riguarda la soluzione 1, la linea aerea richiede una valutazione degli impatti urbanistici e valutare quanta parte del percorso può essere utilizzata, quindi dimensionare l'energia accumulata a bordo per soddisfare la richiesta di energia al di fuori di essa, nonché una valutazione tecnico socio-economica e finanziaria dal punto di visto trasportistico.

Per la soluzione 2, il sistema di accumulo deve consentire di compiere 12 corse al giorno, come quelle proposte, deve avere dimensioni dell'ordine di 80 kWh, che oltre a costare di più di un sistema di tipo flash ridurrebbe il carico pagante e il volume disponibile a bordo.

La ricarica di un sistema di accumulo da 80 kWh potrebbe esser fatta in circa 8 ore con una stazione a 10 kW, o quasi 1.5 h con una stazione a 50 kW di tipo Chademo.

Se invece la ricarica può esser fatta al capolinea (soluzione 3), si deve dotare ogni capolinea di una potenza variabile alla velocità richiesta energetica per la linea (es. la linea proposta ha un fabbisogno di 5 kWh e una stazione da 3C deve avere almeno 15 kWh di potenza installata per ogni bus in ricarica), ammettendo che la tecnologia del sistema di accumulo sopporti la carica a 3C e quindi di durata media di 20 minuti.

Nel caso della ricarica flash (punto 4) invece si tratta di ricarica opportunistica con energia da trasferire fissata ad un valore massimo.

Il prototipo realizzato in questo progetto prevede un accumulo con supercapacitori in serie, per una capacità complessiva equivalente di 21 Farad, una tensione di lavoro da 375 V a 187.5 V, quindi l'energia utilizzabile sia per la marcia sia che deve essere ricaricata alle fermate è di 310 Wh.

Tale energia può essere trasferita da una stazione di ricarica in tempi dell'ordine dei 20 secondi, per cui non vi è aggravio di tempo sul percorso. E la ricarica avviene durante le soste per la salita e discesa dei passeggeri.

Il software realizzato su un foglio di lavoro Excel consente di calcolare il consumo energetico di un autobus su una linea di trasporto data.

Per cui dato il sistema di accumulo del tipo flash fornisce la distanza massima tra le stazioni di ricarica per realizzare la ricarica opportunistica alle fermate.

Ad esempio in Figura 19 è mostrato un estratto della simulazione sotto forma di grafico di velocità e di potenza richiesta.

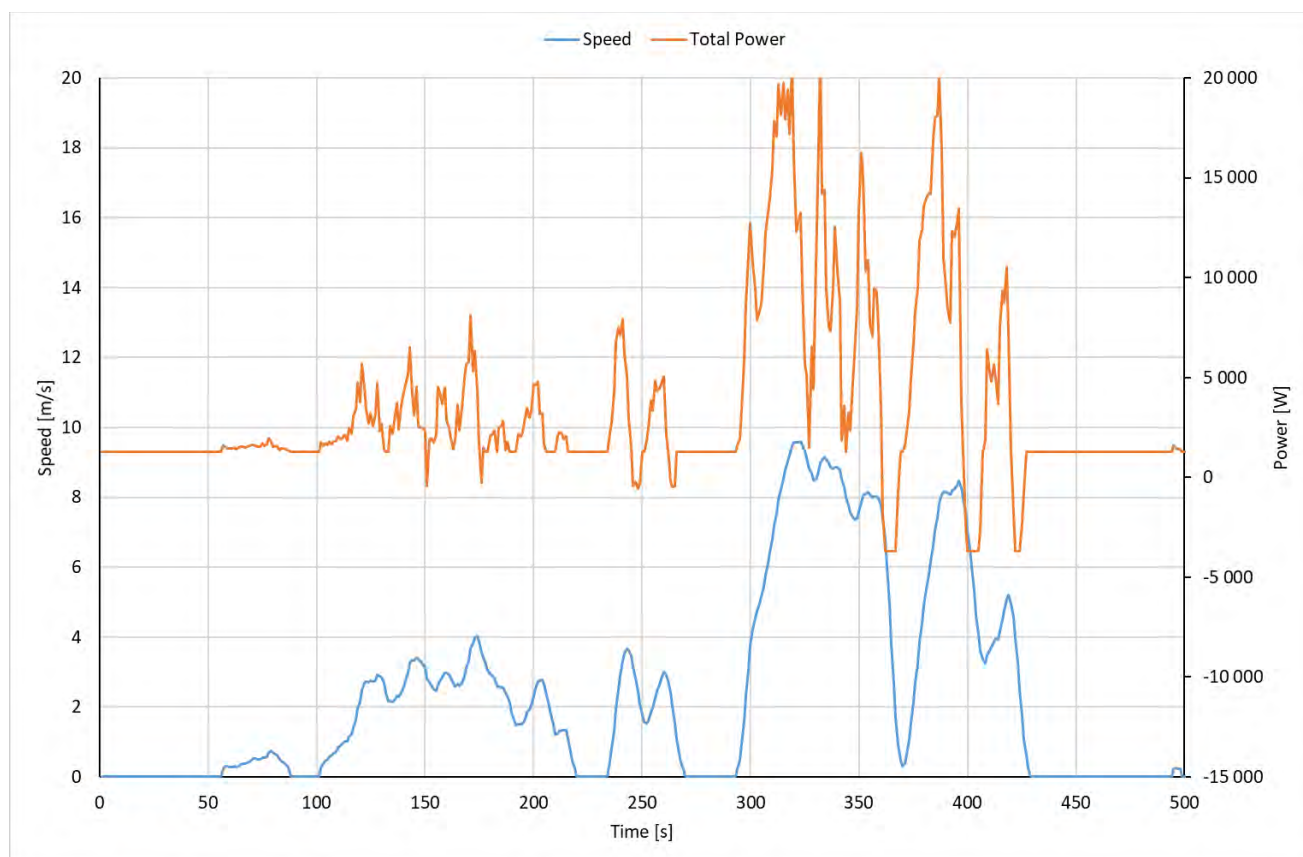


Figura 19 Andamento della velocità e della potenza richiesta al moto

## 9 Conclusioni e sviluppi futuri

Il progetto, articolato in tre fasi principali, ha consentito di progettare, realizzare e testare un sistema di accumulo fortemente innovativo che consentirà di usufruire della trazione elettrica in molteplici situazioni che ad oggi sono sempre state difficili da realizzare per l'elevato costo o per la scarsa autonomia dei sistemi di accumulo.

La forte connotazione innovativa è riconducibile a due principali aspetti:

- ristretti tempi di ricarica,
- minima complicazione d'impianto quindi costi di costruzione e gestione.

Il tempo di ricarica, se paragonato con un sistema di carica rapida in commercio, dell'ordine di qualche minuto (o decine di minuti), non è sempre scalabile in base alle dimensioni dell'autobus.

In questo progetto l'accumulo di bordo è stato drasticamente ridotto grazie al sistema di stoccaggio dell'energia, il quale consente di ricaricare in meno di 60 secondi l'energia necessaria a compiere un tratto di linea di trasporto (dell'ordine del kilometro), tale energia è sufficiente per raggiungere la fermata successiva.

La complicazione di impianto è connessa alla quantità di dispositivi di controllo, come inverter e convertitori statici, tipici dei veicoli a trazione elettrica, i quali consentono di convertire e gestire l'energia in sicurezza attraverso i vari dispositivi. Purtroppo tali convertitori sono molto delicati e costosi, soprattutto quando le potenze in gioco sono elevate (come nel caso degli autobus da trasporto pubblico).

Il sistema qui proposto non ha alcun dispositivo di controllo durante la fase di ricarica, bensì prevede la connessione tra due sistemi elettrici statici (uno nella stazione e nell'autobus), perfettamente dimensionati ed in grado di scambiarsi elevate potenze ed energie in tutta sicurezza in pochissimo tempo.

Per realizzare tale sistema e prototiparlo si sono dapprima definite le specifiche tecniche del sistema di comune accordo con i committenti e con i ricercatori che hanno gestito la stazione di ricarica quindi si sono effettuati gli acquisti per realizzare il prototipo e quindi si sono testati i singoli pezzi singolarmente, poi il sistema intero a bassa tensione ed infine il prototipo integrato al ciclatore su un ciclo di marcia misurato sperimentalmente.

Il prototipo assolve alla funzione per cui è stato progettato tuttavia nel corso delle prove si sono anche evidenziate alcune debolezze a cui si ovvierà al termine del progetto.

1. Il DC-DC non è protetto da gradienti di tensione inversa (ovvero se LOW diventa più alto di HIGH), di conseguenza nella fase in cui i condensatori trasferiscono energia alle batterie i tre condensatori in serie devono avere almeno 72 V di tensione per impedire che le correnti si invertano attraverso il convertitore.

Per ovviare a questo inconveniente è stata prevista una funzione di precarica in cui le capacità interne dei supercondensatori vengono messe in tensione correttamente prima di consentire l'inversione della corrente. Questo tuttavia comporta un piccolo ritardo (un secondo) nella fase di inversione ritardo che sarà ulteriormente minimizzato velocizzando la procedura software di inversione. Il ritardo genera un ritardo nell'inizio della ricarica in fase di frenatura che tuttavia non pone problemi per due motivi; il primo è che il bus ha comunque i freni meccanici che garantiscono la massima decelerazione in fase di emergenza ed il secondo è che bus di più grande taglia, i cui freni sono azionati ad aria compressa, hanno ritardi ben superiori (fino a 2,5 secondi) che sono anche funzionali ad evitare Jerk eccessivi a bordo che causino cadute dei passeggeri in piedi. In ogni caso la riprogrammazione del controllo minimizzerà tale ritardo consentendo di recuperare con i supercondensatori anche brevi ed improvvise frenate.

2. Per limitare le correnti di scarica tra la stazione ed i supercapacitori di bordo (per scelta progettuale del committente e per motivi di sicurezza dei prototipi) si è deciso che nella fase di travaso diretto tra supercondensatori di bordo e della stazione la tensione minima del sistema di bordo deve essere a 200V. Il convertitore DC/DC che collega batterie e supercondensatori pertanto deve funzionare da BOOST per caricare a circa 200 V i tre condensatori in serie.

Questa problematica è stata affrontata consentendo ai DC/DC di essere invertiti e realizzando le necessarie modifiche ai circuiti di precarica. Tuttavia permane un piccolo ritardo (per i motivi enunciati prima) che, per quanto minimo, ritarda il sollevamento del pantografo fino ad avere i supercondensatori di bordo alla giusta tensione

3. I condensatori interni dei DC/DC non hanno una protezione in corrente in caso di "Inrush"; il costruttore dichiara circa 10 A per modulo; per cui prima di accendere il DC-DC e tentare di caricare le batterie a bassa tensione bisogna inserire una precarica del DC-DC con resistenze in serie.

Anche questa modifica dell'elettronica di gestione è stata realizzata.

4. Tutte le necessarie modifiche hanno portato a complicare oltre il progetto iniziale collegamenti e parti dell'elettronica che gestisce l'elettronica di potenza; si è realizzato pertanto un pannello sperimentale (presentato in varie figure di questo rapporto) che ha assolto magnificamente alle sue due funzioni: consentire di testare l'elettronica di gestione e verificare il corretto funzionamento; effettuare le prove contrattuali da banco. Se il fatto che tutti i collegamenti siano staccabili e riattaccabili con facilità, le dimensioni notevoli e i supporti di legno versatili, ha assolto magnificamente agli obiettivi delle fasi di sviluppo e test al banco, la fase di test su strada del prototipo integrato (che sebbene non prevista dai contratti è fondamentale per l'Università di Firenze per mostrare la funzionalità dei propri bus laboratorio) richiede la realizzazione di un pannello elettrico integrato e realizzato come prototipo industriale.

Tale oggetto è già stato commissionato e sarà disponibile a gennaio per l'integrazione sul bus e la dimostrazione su strada.

L'analisi dei costi non è stata condotta in quanto è oggetto di sviluppi futuri al presente progetto.

A fianco delle attività di progettazione e sviluppo tecnologico sono state effettuate attività di modellazione e sviluppo algoritmico per consentire di dimensionare dal punto di vista energetico una linea di trasporto pubblico esistente, oppure di simulare virtualmente una linea da realizzare con un sistema di accumulo misto tipo quello dimensionato in questo progetto.

Input all'algoritmo sono pertanto alcuni parametri fondamentali come: il volume di passeggeri, la taglia degli autobus e soprattutto la linea di trasporto.

Output all'algoritmo sono il numero di stazioni di ricarica e la loro posizione rispetto al percorso.

Tale strumento è stato predisposto su un calcolatore semplificato al fine di una prima taratura, ma potrà essere oggetto di studio e sviluppo nel caso si voglia costruire un software di simulazione apposito da usare per gli scopi di dimensionamento preliminare.

## Appendice: curriculum del gruppo di lavoro

### **Prof. Marco Pierini**

Si è laureato in Ingegneria Meccanica nel 1991 ed ha ottenuto il dottorato in progetto e costruzione di macchine nel 1995. Nel 1994 ha trascorso un periodo di formazione presso Brüel Acoustics, Holte, Denmark all'interno del progetto EU Human Capital and Mobility "MONICA" (Methods on noise identification control activities).

Nel 1995 ha lavorato presso il Centro Ricerche FIAT (CRF), Torino, dove è stato coinvolto in un progetto relativo alla ottimizzazione vibroacustica nel settore automobilistico. Successivamente, sempre nello stesso anno, ha trascorso un periodo di formazione presso il Mechanics and Nuclear Engineering Department of the University of Manchester, U.K. dove ha continuato la sua attività nel settore NVH all'interno del progetto EU Human Capital and Mobility "MONICA" project.

Nel 1996 è entrato a far parte del Department of Mechanical Engineering della Katholieke Universiteit Leuven, Belgio, all'interno del progetto EU Brite Euram Project VAMP project (Vibro-Acoustic Modelling and Prediction of Transportation Vehicles).

Rientrato a Firenze ha prima ricoperto il ruolo di ricercatore a tempo indeterminato (1998-2002) e poi di professore associato (2002). Dal 2018 è professore ordinario.

### **Ing. Lorenzo Berzi**

Ricercatore a tempo determinato di tipo A presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIEF) dell'Università degli Studi di Firenze e docente del corso di "Costruzione di veicoli elettrici ed ibridi". Ha conseguito la laurea in ingegneria Meccanica nel 2008 e nel 2014 il Dottorato di Ricerca, con uno studio focalizzato sulla modellazione e simulazione dei veicoli elettrici e sul trattamento dati ai fini della creazione di cicli di guida naturalistici. Ha partecipato a progetti di ricerca sia a carattere locale (finanziati dai programmi di ricerca della Regione Toscana) che a carattere internazionale (programmi europei FP7 e H2020). Ulteriori interessi sono relativi non solo alle costruzioni di macchine nel suo complesso ma, in particolare, allo studio delle implicazioni ambientali legate alla progettazione dei prodotti, con particolare riferimento al fine-vita di prodotti complessi ed al trattamento dei materiali per il riuso, il riciclo ed il recupero.

### **Ing. Luca Pugi**

Ricercatore a tempo determinato di tipo B presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIEF) dell'Università degli Studi di Firenze e docente dei corsi di Meccatronica e Trazione Stradale e Ferroviaria .

È ingegnere meccanico (laureato nel 1999 a Firenze) e dottore di ricerca in meccanica applicata (titolo conseguito nel 2003 a Bologna). I principali interessi di ricerca riguardano la meccatronica, la dinamica dei veicoli, la modellazione di reti e sistemi dinamici con particolare riferimento ad aspetti di modellazione Real Time. Co-autore di tre brevetti ha partecipato a numerosi progetti di ricerca ottenendo numerosi ed importanti riconoscimenti accademico scientifici. È autore di circa 150 pubblicazioni indicizzate su scopus che documentano la molteplicità delle collaborazioni scientifiche ed industriali sinora svolte.

È inoltre autore e co-autore di almeno tre libri attualmente utilizzati come materiale didattico ufficiale della facoltà di ingegneria di Firenze che godono anche di un buon ritorno editoriale.

### **Ing. Riccardo Barbieri**

Assegnista di ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIEF) dell'Università degli studi di Firenze, consegue la laurea in Ingegneria Gestionale nel 2009. Nel 2013 conclude il percorso di dottorato di ricerca con una tesi sullo sviluppo di modelli di implementazione di sistemi di ricarica per veicoli elettrici, con un caso studio focalizzato sull'analisi di fattibilità dell'implementazione di ricarica wireless nella città di Firenze. Ha partecipato a progetti europei (FP7 e H2020) riguardanti l'implementazione di sistemi di mobilità sostenibile e ricarica wireless come UNPLUGGED e riguardanti strategie di empowerment per gli operatori di processi produttivi come Facts4Workers. Ulteriori interessi sono nel campo della gestione aziendale e della diffusione del sistema di qualità SixSigma per i processi industriali.

**Prof. Adriano Alessandrini**

Professore associato presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICEA) dell'Università degli Studi di Firenze e docente di Tecnica ed Economia dei Trasporti dal 2015.

È ingegnere meccanico e dottore di ricerca in Energia. È stato ricercatore al CTL fino al 2015 e attualmente ricopre la carica di professore associato all'Università di Firenze con il corso di Pianificazione dei sistemi di trasporto. La sua ricerca verte principalmente sull'impatto ambientale di veicoli e guidatori e sui sistemi di trasporto automatizzati. Adriano ha condotto e partecipato a più di 20 progetti di ricerca sin dalla sua laurea (1998) ed attualmente è il coordinatore del più grande progetto Europeo sui sistemi di trasporto stradali automatizzati: CityMobil2. Dal 2003 ha coordinato team di ricerca i quali hanno implementato numerosi sistemi ed applicazioni per il monitoraggio delle flotte con: Honda, Pigliacelli, AVIS, Roma Car Sharing, Octo Telematics, ENEA, Comune de L'Aquila, ARVAL.

**Ing. Fabio Cignini**

Assegnista di ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICEA) dell'Università degli Studi di Firenze e docente di Tecnica ed Economia dei Trasporti dal 2017.

È ingegnere meccanico dal 2013. Dal 2014 al 2017 è stato assegnista di ricerca al Centro di ricerca per il Trasporto e la Logistica (CTL). Fabio ha lavorato ed è tutto impegnato principalmente sui sistemi di trasporto innovativi, tecnologie ICT, ed impatto ambientale dei veicoli ibridi. Recentemente lavora al progetto Life for Silver Coast, un progetto che ambisce a rivoluzionare la mobilità tradizionale nel comune del Monte Argentario, in passato ha collaborato in un progetto per le Smart-Cities, con lo sviluppo di un sistema di trasporto a chiamata nel comune de L'Aquila in collaborazione con l'ENEA, e in altri progetti di ricerca che utilizzavano sistemi di trazione elettrica dotati di ricarica rapida con l'ENEA.

## 10 Riferimenti bibliografici

[1] M. P. G. P. S. C. F. S. F. Ortenzi, «Sperimentazione in scala ridotta di un sistema di ricarica ibrido per travaso di supercondensatori per TPL,» ENEA, Roma, 2018.

[2] M. L. Genta G., The automotive chassis. Vol.1, Torino: Springer, 2009.