



Ricerca di Sistema elettrico

Valutazione del consumo energetico e dell'energia di ricarica di un minibus in esercizio su una linea di trasporto pubblico urbano

Fernando Orteni

Report RdS/PTR2019/021

VALUTAZIONE DEL CONSUMO ENERGETICO E DELL'ENERGIA DI RICARICA DI UN MINIBUS IN ESERCIZIO SU
UNA LINEA DI TRASPORTO PUBBLICO URBANO

Fernando Orteni (ENEA)

Dicembre 2019

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - I annualità

Obiettivo: Tecnologie

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

Work package: Mobilità

Linea di attività 2.29: *Valutazione del consumo energetico e dell'energia di ricarica di un minibus in esercizio su una linea di trasporto pubblico urbano*

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work package: Maria Pia Valentini, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	14
2.1 IL SIMULATORE.....	14
2.2 IL TECNOBUS GULLIVER.....	19
2.3 LA LINEA ATAC 117 DI ROMA.....	20
2.4 LINEA MODIFICATA PER RICARICA RAPIDA.....	24
2.4.1 <i>La batteria</i>	25
2.4.2 <i>Convertitori</i>	28
2.5 RICARICA SOLO AL CAPOLINEA.....	30
2.6 RICARICA AL CAPOLINEA E A UNA FERMATA.....	33
2.7 RICARICA AL CAPOLINEA E A 3 FERMATE.....	35
3 CONCLUSIONI.....	39
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	41

Sommario

La prima annualità dell'attività di ricerca di sistema elettrico relativa allo sviluppo di sistemi di accumulo innovativi per la ricarica rapida a terra e a bordo dei sistemi di trasporto pubblico ha come obiettivo la realizzazione di un report propedeutico alle attività successive del secondo e del terzo anno che consisteranno nella progettazione, realizzazione e sperimentazione dei nuovi sistemi di accumulo a bordo e di una stazione di ricarica rapida equipaggiata con un accumulo basato su volani.

La presente annualità ha come output i dati di ingresso per il dimensionamento del pacco batterie a bordo del bus e della stazione di ricarica con l'accumulo inerziale che verranno progettati e realizzati nella seconda annualità.

Si è quindi definito:

- un profilo di missione ed un autobus, ovvero la linea 117 dell'ATAC di Roma che viene effettuata con dei minibus TecnoBus Gulliver.
- le modifiche a tale corsa aggiungendo una stazione di ricarica al capolinea, con una potenza di 40 kW per circa 8 minuti, in grado di ricaricare completamente il bus dell'energia consumata lungo tutta la linea. Si sono testate anche altre configurazioni con 1 o 3 ricariche alla fermata per valutare i benefici in termini di riduzione della capacità della batteria a bordo del bus.
- Si è utilizzato un modello di simulazione di un veicolo/percorso/ricarica in modo da poter testare diverse possibili configurazioni di ricarica e di accumulo a bordo.
- Si è definito un nuovo sistema di accumulo ad alta potenza specifica per il minibus, testando diverse capacità che vanno dai 12 ai 4 kWh.

Definiti questi dati di ingresso, l'output delle simulazioni è il dimensionamento di massima della stazione di ricarica e del sistema di accumulo di bordo sulla base della architettura della linea (ricarica al capolinea oppure anche con ricariche alla fermata).

Fra le possibili soluzioni simulate, il sistema di accumulo di bordo più idoneo è quello con le seguenti caratteristiche:

- Potenza in ricarica massima: 40kW
- Tensione nominale 300V, Tensione massima <400 V, tensione minima >200 V
- Energia: 12 kWh
- Corrente massima in ricarica al capolinea: 3.35C
- Convertitore per la connessione tra il sistema di accumulo e il chopper con tensione a monte tra i 200 e i 400V e tensione a valle tra i 72 e i 90V

La stazione di ricarica, da realizzare nella seconda annualità del Piano Triennale della Ricerca, avrà i seguenti requisiti:

- Potenza in ricarica massima al capolinea: 40kW
- Tensione nominale 300V, Tensione massima <400 V, tensione minima >200 V
- Energia da ricaricare: 4.5-5 kWh
- Potenza massima richiesta alla rete: 21 kW (32 A)

1 Introduzione

La presente attività si inquadra all'interno di un insieme più vasto di attività il cui obiettivo è la progettazione e sperimentazione di tecnologie veicolari ed impiantistiche per permettere la ricarica rapida ed ultrarapida di tipo "opportunity" dei bus elettrici.

Tali tipologie di ricarica, ad alta potenza, hanno il vantaggio di una riduzione dell'accumulo a bordo dei mezzi con grandi vantaggi dal punto di vista del costo e della manutenzione degli stessi. Tuttavia, elevate potenze di ricarica comportano problematiche:

- dal punto di vista del gestore della rete elettrica, che deve gestire carichi molto elevati per tempi brevi ed intermittenti, oltre che l'impossibilità di erogare tali potenze dovute ad una rete elettrica non adeguata. Un accumulo a terra può ridurre la richiesta di potenza alla rete contribuendo alla ricarica rapida del bus e ricaricandosi successivamente a più bassa potenza.
- Per la modalità di ricarica; elevate potenze e tempi di ricarica contenuti impongono sistemi automatizzati che non richiedono la presenza di un operatore.
- Per l'accumulo di bordo. Per le alte potenze in gioco si rendono necessarie batterie a più alta potenza specifica rispetto a quelle commercialmente più diffuse, con un elevato numero di cicli vita alle alte correnti e con un sistema di raffreddamento accuratamente dimensionato.

Da diversi anni e in diversi PAR dei precedenti trienni di Ricerca di Sistema Elettrico, ENEA affronta tra l'altro i suddetti argomenti di ricerca e di seguito se ne riportano i più salienti.

Nel triennio 2012-2014 sono stati sviluppati dei moduli con celle al litio LFP (ferro fosfato) raffreddati in gradi di ricaricarsi a 3C [1]. tali moduli sono stati utilizzati su un Tecnobus Gulliver per una sperimentazione con una ricarica rapida effettuata tramite un braccio robotizzato.



Figura 1 moduli di batteria LFP con ricarica a 3C e ricarica automatizzata tramite braccio robotizzato.

Nel precedente triennio di attività per la Ricerca di Sistema elettrico è sviluppato da ENEA e co-beneficiari un sistema di ricarica flash con pantografo per bus elettrici applicato a un minibus con accumulo ibrido (batterie più supercondensatori) e dotato di un accumulo di terra basato su supercondensatori (Figura 2).

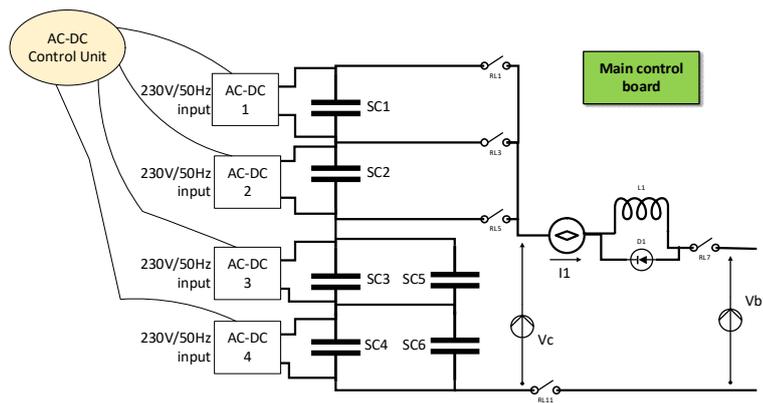


Figura 2 Attività di RSE del precedente triennio con lo sviluppo di una stazione di ricarica ultrarapida alla fermata per minibus

Il vantaggio di tale sistema era di avere delle stazioni di ricarica molto semplici e senza alcun convertitore di potenza, mentre l'autobus avevano i supercondensatori che fornivano energia per la trazione e le batterie al piombo per gli ausiliari.

Nel PAR2018 invece [5], nell'ottica di una riduzione dei costi dell'elettrificazione del trasporto pubblico, è stata effettuata una valutazione economica di diverse soluzioni tecnologiche di accumulo stazionario per le stazioni di ricarica rapida: i volani, le batterie al titanato di litio (LTO) e i supercondensatori (Figura 3).

Lo studio ha mostrato come i volani, che hanno il vantaggio di essere più affidabili rispetto alle altre due tecnologie, hanno dei vantaggi se applicati per ricariche al capolinea, mentre i supercondensatori, che hanno una potenza specifica più alta di tutti, sono quelli più idonei per ricariche ad elevatissima potenza alla fermata degli autobus.

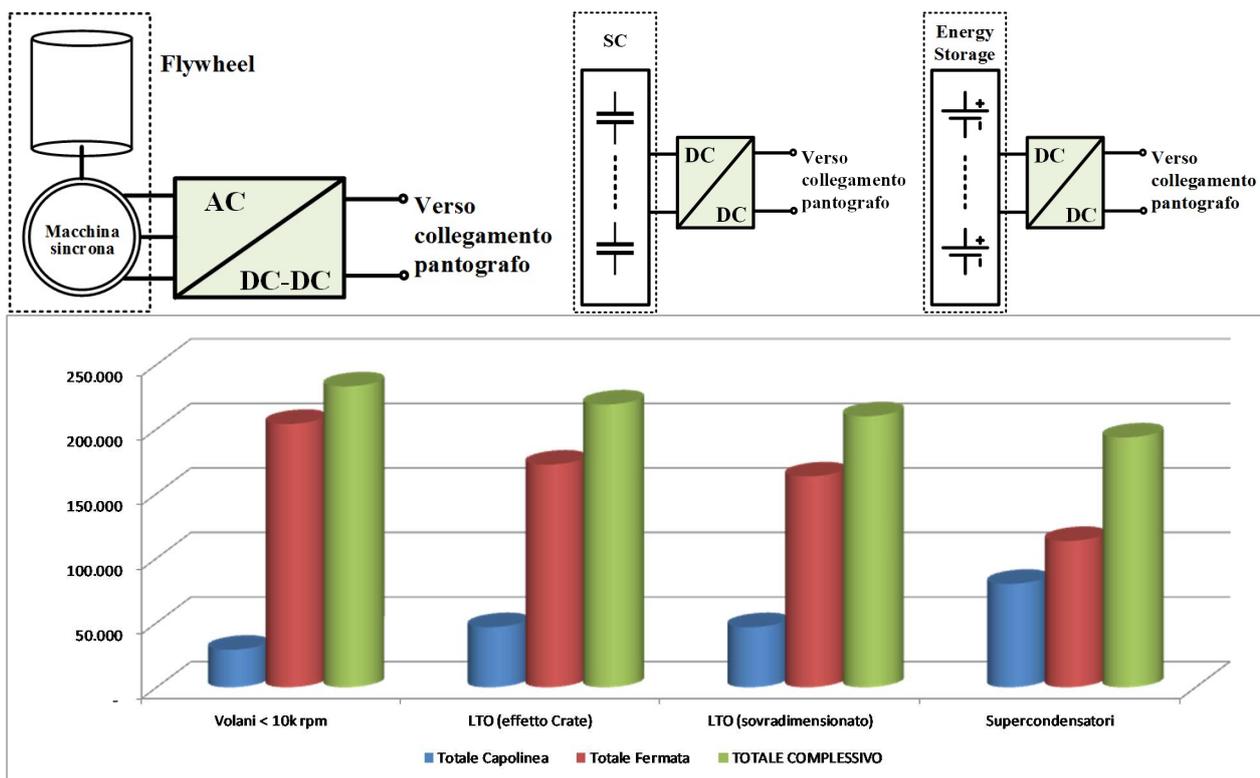


Figura 3 valutazione economica di 3 differenti tipologie di accumulo a terra: volani, batterie LTO e supercondensatori.

1.1 L'accumulo di terra con Volani

L'obiettivo della presente linea di attività è quello di sviluppare un sistema complessivo di ricarica/autobus/linea più efficiente rispetto a quanto sperimentato nelle precedenti studi dei trienni precedenti e a quanto esistente.

L'utilizzo di linee di trasporto con ricariche al capolinea e/o alla fermata, consentono una riduzione di un ordine di grandezza dell'energia a bordo dei mezzi rispetto alla configurazione con ricarica notturna al deposito: si può passare infatti da oltre 300 kWh fino a 30 kWh per una ricarica al capolinea oppure qualche kWh con un sistema con ricarica alla fermata su un bus da 12 m.

Le stazioni di ricarica, dovendo ricaricare una maggiore energia in tempi compatibili con la sosta al capolinea di un autobus, devono avere potenze sempre maggiori e richiedono sistemi di accumulo a terra come ausilio per non sovraccaricare la rete elettrica.

Le possibili opzioni per l'accumulo a terra sono:

- batterie; nel caso di una ricarica al capolinea hanno il vantaggio di un costo di acquisto economico, ma una vita che per questo tipo di applicazioni che può essere breve, dell'ordine di qualche anno; per ricariche alla fermata hanno il limite di una bassa potenza specifica che ne richiede un sovradimensionamento che ne aumenta il costo. Le batterie ad alta potenza specifica, come le LTO, hanno prestazioni e una vita molto maggiori, ma il costo è molto più alto, passando dai circa 300-400 €/kWh delle batterie al Litio a valori che arrivano anche a 2000 €/kWh per una batteria completa.
- I supercondensatori, sperimentati nel triennio precedente di Ricerca di Sistema Elettrico, hanno il vantaggio di una elevatissima potenza specifica e di una vita utile superiore ai 10 anni. Lo svantaggio è di una energia molto bassa, di circa 5 Wh/kg contro i 150 Wh/kg delle batterie al litio e un costo enormemente maggiore, che può variare tra i 15000 e i 35000 €/kWh (anche se fortemente influenzato da una richiesta di mercato di nicchia con una produzione limitata). La loro applicazione più idonea è la ricarica alla fermata dove viene trasferita tutta l'energia (dell'ordine di

qualche kWh) in 20 secondi con potenze dell'ordine delle centinaia di kW nel caso di un bus da 12 m anch'esso equipaggiato con supercondensatori. Nel precedente triennio di Ricerca di Sistema è stata effettuata una sperimentazione di un sistema di ricarica alla fermata con i supercondensatori e un particolare sistema di ricarica senza convertitori.

- I volani sono un sistema di accumulo meccanico con il vantaggio di avere una vita molto maggiore rispetto ai precedenti sistemi. Si tratta in sostanza di un corpo messo in rotazione e una macchina elettrica che gli fornisce o riceve energia da esso. Le sue prestazioni in termini di potenza sono intermedie fra le batterie e i supercondensatori e il costo si può aggirare sui 2000 €/kWh (comunicazione personale con la società Chakra), comparabile con la tecnologia delle celle LTO che hanno però una vita limitata in confronto ai volani. Lo svantaggio di un elevato non influisce in questo tipo di applicazioni in quanto non ci sono problemi di peso e di ingombro a terra in una stazione di ricarica.

In sostanza l'accumulo inerziale si presenta come una valida alternativa sia per la maturità della tecnologia, sia per la sua vita utile che è di gran lunga maggiore di un accumulatore elettrochimico.

Il costo di acquisto risulta essere maggiore delle batterie, ma la limitata diffusione di questa tecnologia non comporta una produzione seriale sufficientemente elevata e quindi il costo finale risente di questa problematica.

Attualmente i sistemi di accumulo inerziali vengono prevalentemente utilizzati come UPS, nel settore ferroviario per il recupero di energia in frenata dei treni o nel settore delle fonti rinnovabili come storage.

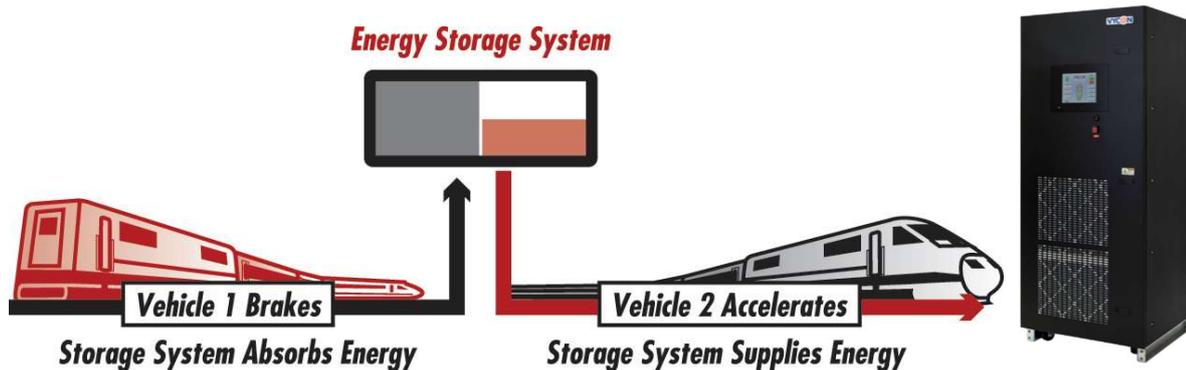


Figura 4 Esempio di un sistema di accumulo con volano della Vycon nel campo ferroviario (fonte <https://vyconenergy.com>).

La società Vycon produce sistemi di storage produce sistemi di accumulo per i suddetti settori e in particolare nel settore ferroviario mostra una applicazione che è proprio quella di recuperare l'energia del treno in decelerazione presso la stazione e di restituirla al treno che riparte, riducendo quindi l'impegno verso la rete elettrica che non è proprio trascurabile.

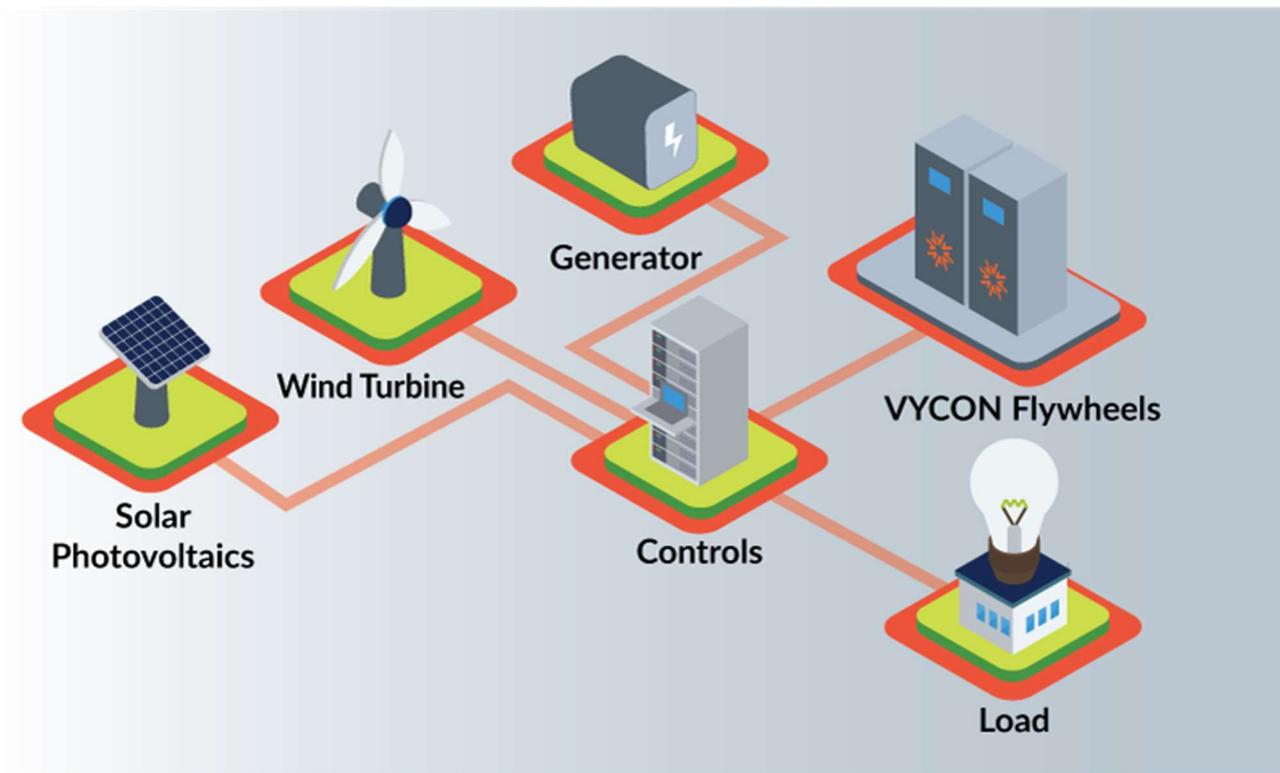


Figura 5 Esempio di un sistema di accumulo con volano della Vycon nel settore delle microgrid(fonte <https://vyconenergy.com>).

Un altro settore è quello delle fonti rinnovabili, dove il costo e la vita delle batterie costituisce un peso rilevante. Un sistema inerziale, pur con un costo maggiore, ha una vita utile molto maggiore.

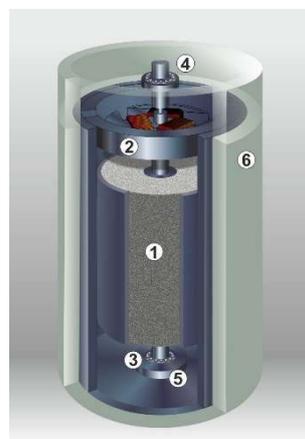


Figura 6 Sistema di accumulo inerziale Energiestro

Di particolare interesse è il sistema realizzato da Energiestro [6], una società francese che ha realizzato un accumulo con un volano a basso costo realizzato (si dichiara un costo di 1/10 rispetto a quelli esistenti) con un materiale pretensionato e compresso (brevettato).

Le taglie proposte sono da 10, 20,50, 100 e 1000 kWh di potenza, ma al momento della stesura del presente report la roadmap era quella di realizzare il primo prodotto prototipale nel 2021 da 10 kW con un prezzo indicativo del sistema completo di 50.000 €. La vita utile dichiarata è infinita

Una applicazione dei volani utilizzata per le stazioni di ricarica degli autoveicoli è stata realizzata dalla Skoda a Praga in collaborazione con la Startup ChakraTech.

La startup israeliana che collabora con la marca ceca ha brevettato il Kinetic Power Booster, che a Praga consentirà ricariche al doppio della velocità media della rete elettrica nazionale.

Questa società ha sviluppato il Kinetic Power Booster, un sistema per portare ricarica ad alta capacità anche in zone non coperte da una rete elettrica adeguata. Il sistema è in grado di assorbire i picchi di corrente della rete tradizionale, accelerando un volano interno e conservando l'energia sotto forma di energia cinetica.



Figura 7 il Kinetic Power Booster della Chakratech a Praga

La Chakratech dichiara inoltre che la vita dei volani può essere maggiore di 20 anni, mentre quella delle batterie al litio, all'incirca di 2-3, mentre quelle di tipo "Second life" è minore di un anno.

Storage Technology	Chakratec Kinetic Batteries	Second Life EV Batteries	Energy Storage Batteries (Li-ion)
Description	Flywheel with capability of continuous storage up to a few hours	Used EV Batteries	Li-ion Batteries used for stationary energy storage
Operation Life	+20 years	< 1 year	~ 2-3 years
Performs well in any environment	✓	✗	✗
Close to 100% Depth of Discharge	✓	✗	✗
Integrates with Renewable Energy	✓	✓	✓
Totally Green	✓	✗	✗

Figura 8 fonte Chakratech <https://www.chakratec.com/technology/>

La stessa società ha dichiarato che il costo per kWh di un accumulo con volani ha un costo di 2000 €/kWh per una vita di 100.000 cicli contro quello delle batterie al litio di circa 300/kWh e 2000 cicli, con un costo per ciclo di carica per kWh di 0.02 € contro i 0.15 delle batterie.

Altri produttori sono non meno importanti sono: Stornetics: (<https://stornetic.com/>) e la Riello (<https://www.riello-ups.it/products/1-gruppi-di-continuita/48-master-mps>).

Un sistema di terra per la ricarica al capolinea o alla fermata necessita di un accumulo a bordo in grado di accettare le elevate potenze di ricarica necessarie a trasferire l'energia necessaria fino alla successiva ricarica.

All'aumentare della potenza di ricarica aumenta lo stress per l'accumulo di bordo e cambia la tipologia di batteria da utilizzare. Per applicazioni con ricarica alla fermata nel precedente triennio di ricerca si è sviluppato un sistema di bordo con accumulo misto di batterie e supercondensatori, quest'ultimi utilizzati per la trazione e ricaricati alla fermata.

Nel presente triennio si vuole utilizzare un accumulo ad alta potenza con batterie al litio. Le batterie più indicate per questo tipo di applicazioni sono quelle al titanato di Litio, che oltre a fornire elevate correnti di carica e scarica, hanno anche una vita utile molto lunga, dell'ordine dei 20.000 cicli. Ci sono anche altre tecnologie che sono interessanti questo tipo di applicazioni come le Litio NMC alle nanotecnologie.

Le celle LTO in [Figura 9](#), prodotte dalla Toshiba, hanno la caratteristica di avere una tensione nominale più bassa (2.4V) rispetto alle classiche Litio-ione, ovvero di 3.7V, e quindi hanno anche una energia specifica proporzionalmente più bassa. Hanno però il grande vantaggio di avere correnti massime molto alte, soprattutto in carica, dove le altre chimiche generalmente non vanno oltre i 2C-3C.

Sono garantite per correnti massime di carica/scarica anche fino a 10 C, cosa questa che le rende molto appetibili per applicazioni Fast-Charge oppure trolley bus per il trasporto pubblico, con bassa energia a bordo e ricarica frequente, dove cominciano ad essere molto diffuse.

La stessa Toshiba produce anche un modulo da 20 Ah e 20V o 27V con questa tecnologia, mentre la Impact (<https://icpt.pl/en/>) produce una batteria completa di elettronica di controllo con tensioni di esercizio prossime a quelle in uso sui veicoli e mezzi pesanti. Le prestazioni però, all'aumentare del numero di celle, scendono e quindi con le stesse celle Toshiba si arriva a una corrente massima di carica e scarica di 4C.

Il raffreddamento poi diventa sempre più complesso e per garantire potenza massime elevate la ABB ha realizzato una batteria modulare che ha correnti massime di 8C come modulo ma 3C come batteria. Il sistema di raffreddamento è a liquido con chiller, sicuramente più sofisticato del classico raffreddamento ad aria, molto più diffuso nelle batterie commerciali. Tuttavia, il grande vantaggio di questa tecnologia rimane una lunga vita associata a queste grandi correnti, che le altre chimiche, come le NMC al momento non hanno.

Il costo di tali batterie si aggira attorno ai 2000 €/kWh, considerevolmente più alto rispetto alle classiche NMC che possono costare meno di 300 €/kWh, prezzo che quindi le rende utilizzabili solo per applicazioni con ricarica rapida.

Nominal capacity	10Ah
Nominal voltage	2.4V
Output Power	1800W* (SOC:50%, 10s, 25°C)
Input Power	1500W* (SOC:50%, 10s, 25°C)
Dimensions	Approx. W116 × D22 × H106 mm
Weight	Approx. 510g

- * This value is calculated from the internal resistance.
- ※ Specifications shown herein are not guaranteed values and are subject to change without notice. Performance depends on usage conditions.
- ※ The package design presented on the web is for catalogue purpose, so the design of the actual battery will be different.
- ※ 10Ah cell uses part of technology achievement made by Japan's New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) subsidized projects.



Name	20Ah 2P12S module	20Ah 2P9S module
Model	AM01202CCA05A	AM00902CCA04A
Cell configuration	2 in Parallel × 12 in Series (24 pcs of 20Ah cells)	2 in Parallel × 9 in Series (18 pcs of 20Ah cells)
Nominal capacity	40Ah	
Nominal voltage	27.6V	20.7V
Voltage range	18.0 to 32.4V	13.5 to 24.3V
Ambient temperature	-30 to 55°C	
Ambient humidity	95%RH or less (No condensation)	
Maximum charge/discharge current	120A (charge/discharge), 300A (charge/discharge, 10s), (Not over 55°C at module temperature, at 25°C ambient)	
Dimensions	W190 × D360 × H125 mm	W165 × D360 × H125 mm
Weight	Approx. 14kg	Approx. 11kg
Major built-in functions	Cell voltage monitoring, module temperature monitoring, cell balancing*, communication unit (CAN) * A function to balance the voltage among the cells connected in series	



20Ah 2P12S module



20Ah 2P9S module

[Click here to view peripheral battery system components.](#) 

Figura 9 Caratteristiche di una cella LTO della Toshiba <https://www.scib.jp/en/product/cell.htm>, [12]



PARAMETERS								
Operating conditions			Battery Pack (single container) Configurations					
	144S2P	288S1P	Voltage					
Discharge Current	200 A	100 A	Cells conf.	Min.	Nom.	Max.	Capacity	Energy
Max Discharge Current (10s)	400 A	200 A	144S2P	288 V	331 V	389 V	46 Ah	15.2 kWh
Discharge Temp. Range	-30°C to 45°C		288S1P	576 V	662 V	778 V	23 Ah	
Charge Current	200 A	100 A	String configurations					
Max Charge Current (10s)	400 A	200 A		BP 1	BP 2	Voltage	Capacity	Energy
Charge Temp. Range	-30°C to 45°C		Single container	144S2P	-	331 V	46 Ah	15.2 kWh
Protection class	IP 65		288S1P	-	662 V	23 Ah	15.2 kWh	
Thermal Management System	Liquid		2 Containers in series	144S2P	144S2P	662 V	46 Ah	30.5 kWh
Homologation	UN ECE R10.05 UN ECE R100.02		Parallel connection of strings ← more kWh					

288S1P available from Q4 2018

Figura 10 Modulo batteria con celle Toshiba della Impact

BORDLINE® Module 2.54kWh, 55kVdc

Technical Data

Cell technology	LTO
Configuration	24s2p
Nominal Capacity	2.54 kWh
Nominal Voltage	55.2 Vdc
Peak C-Rate (CH & DCH)	8C for 30s
RMS C-Rate (CH & DCH)	3...4C RMS
Cooling	Liquid cooled
Weight	33 kg
Dimensions (LxWxH)	417 x 466 x 128 in mm

Layout

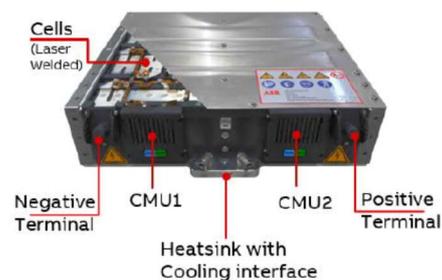


Figure 1 Modulo ABB con Celle al Titanato di litio

Il presente piano triennale parte da quest'ultimo studio e ha l'obiettivo di fare una sperimentazione in scala reale su un minibus di un sistema di ricarica rapida basato su volani per una linea di trasporto elettrificata con un mezzo equipaggiato con batterie ad alta potenza specifica compatibile con le potenze di ricarica in gioco.

L'attività del presente anno è propedeutica al dimensionamento del sistema, che sarà affrontato nelle successive Linea di Attività: sarà fissato un profilo di missione tipico di minibus elettrici operanti su linee di trasporto pubblico urbano, per le quali sussista la possibilità di ricaricare l'accumulo di bordo, in tutto o in parte, al capolinea e a determinate fermate.

Per tale profilo di missione sarà simulato l'andamento del consumo energetico del veicolo, per un dato valore di carico di progetto; come veicolo di riferimento sarà assunto un Tecnobus Gulliver, in dotazione all'ENEA, di cui sono note le caratteristiche e le performance.

Per la simulazione del consumo energetico sarà utilizzato un modello sviluppato da ENEA, opportunamente adattato al caso di studio e calibrato su valori di misura di consumo energetico, acquisiti in precedenti campagne o nel corso della stessa attività.

I risultati della presente attività sono i valori di ingresso per il dimensionamento dei sistemi di bordo e di terra di un sistema innovativo di ricarica rapida ed ultrarapida di bus elettrici, a partire dall'identificazione di una linea di trasporto pubblico rappresentativa di un esercizio mediante minibus elettrici con possibilità di ricarica al capolinea e alle fermate. I valori forniti in output sono:

- I consumi energetici di un minibus operante sulla linea presa in considerazione
- La stima dell'energia di ricarica al capolinea e alle fermate nei tempi usuali di sosta e di fermata, in funzione del valore della potenza di ricarica fissato all'interno dei limiti imposti dalle tecnologie di accumulo e di impianto adatte alla ricarica di tipo veloce ed ultraveloce
- La stima dei valori di energia a bordo nel corso dell'esercizio in funzione delle strategie di ricarica

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

In questa sezione si riporta uno studio per il calcolo del consumo energetico di un minibus elettrico e il dimensionamento preliminare dello stesso per un sistema di ricarica rapida al capolinea equipaggiato con volani. I dati di input necessari per il presente studio sono:

- Un autobus; il mezzo scelto è il Tecnobus Gulliver, a disposizione per la presente sperimentazione (di proprietà dell'università di Firenze, co-beneficiari per la presente linea di attività) e tutt'ora in funzione a Roma su due linee, la 117 e la 119
- Una linea di trasporto pubblico per acquisire le tabelle di viaggio, i cicli di marcia e il numero di passeggeri presenti lungo tutta la linea. Per il presente studio si fa riferimento alla linea 117, dove sono stati acquisiti tutti i dati necessari per le simulazioni.
- Un modello di simulazione per il calcolo del consumo energetico del bus sulla linea, per la stima del SOC in modo da poter dimensionare sia il sistema di accumulo a bordo che il sistema di ricarica a terra con il suo storage.

Come risultato delle simulazioni si avrà:

- la nuova architettura di bordo con il dimensionamento del pacco batterie ad alta potenza in grado di poter eseguire la sua missione e di ricaricarsi ad alta potenza al capolinea e/o ad un certo numero di fermate;
- l'energia minima e i tempi di ricarica necessari per il dimensionamento della stazione di ricarica con storage basato su volani.

Questi due punti sono quelli necessari per la prosecuzione del progetto in quanto saranno i dati di input per la seconda annualità del Triennio con cui l'università di Roma3 progetterà la stazione di ricarica e ENEA e l'università di Firenze progetteranno il sistema di accumulo a bordo e la nuova architettura del powertrain che sarà compatibile con la stazione di ricarica.

2.1 il simulatore

il calcolo del consumo istantaneo del minibus e dell'energia necessaria nonché di tutti gli altri parametri come l'efficienza, lo stato di carica dell'accumulo sul ciclo di marcia misurato e sulla linea modificata con la ricarica al capolinea e/o fermata viene effettuato tramite un modello di simulazione.

Tale modello, di tipo fenomenologico, è stato più volte utilizzato nei diversi progetti, nel progetto HIZEV [8], dove è stato utilizzato per la progettazione ed il dimensionamento di un pacco batterie di un veicolo ibrido ed elettrico [9] a partire dai dati del ciclo di marcia e dalle caratteristiche del veicolo. In altre attività è stato utilizzato per il calcolo, su cicli di marcia prefissati, dei vantaggi ottenibili dal recupero dell'energia dei gas di scarico con turbine [10].

Il modello di simulazione, per un veicolo elettrico, utilizza come dati di ingresso:

- il profilo temporale di velocità e di pendenza del bus
- il profilo temporale del peso del carico trasportato, ossia i passeggeri
- i dati caratteristici del veicolo, come il peso, gli pneumatici, la sezione frontale e il coefficiente C_x di penetrazione aerodinamica oltre che il consumo degli ausiliari;
- i dati dell'azionamento come la coppia massima e minima (in funzione del numero di giri) , il rendimento (funzione della coppia e del numero di giri) , ed il rendimento di trasmissione;
- i dati del sistema di accumulo, come le tensioni, correnti massime e minime, resistenze interne, stato di carica ecc.
- potenza di ricarica al capolinea, funzione anche del SOC a bordo.

I dati di output sono:

- potenza istantanea, alle ruote, a monte dell'azionamento e a monte della batteria;
- il consumo energetico istantaneo;
- i rendimenti dei vari componenti;
- l'energia consumata del ciclo e quella necessaria da ricaricare al capolinea;
- l'andamento dello stato di carica lungo tutto il percorso.

I dati di output sono quelli necessari poi al dimensionamento del nuovo sistema di accumulo di bordo, e della stazione di ricarica, entrambe oggetto di progettazione e sperimentazione nel presente triennio di ricerca.

la potenza istantanea alle ruote richiesta al powertrain può essere espressa nella seguente forma [11]:

$$P_w = \left(m_c \cdot a + m \cdot g \cdot f \cdot \cos(\alpha) + \frac{1}{2} C_x \cdot A \cdot V^2 + m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \right) \cdot V$$

Equazione 1

Ed è la somma delle perdite per attrito degli pneumatici, della resistenza aerodinamica e della pendenza, tutte calcolabili dal ciclo di marcia e dalle caratteristiche dell'autobus.

Il termine relativo alle perdite di attrito degli pneumatici utilizza un coefficiente f che è calcolabile tramite una relazione empirica che è funzione della velocità (Equazione 2):

$$f = f_0 + f_1 \cdot V^2$$

Equazione 2

La potenza erogata e recuperata dall'azionamento è calcolabile dall' $P_w = \left(m_c \cdot a + m \cdot g \cdot f \cdot \cos(\alpha) + \frac{1}{2} C_x \cdot A \cdot V^2 + m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \right) \cdot V$

Equazione 1 tenendo conto del rendimento della trasmissione e dell'efficienza dell'azionamento stesso.

Per la simulazione della batteria, si utilizza un modello di circuito elettrico equivalente formato da un generatore di forza elettromotrice, una resistenza in serie e una serie di circuiti "RC" anch'essi in serie.

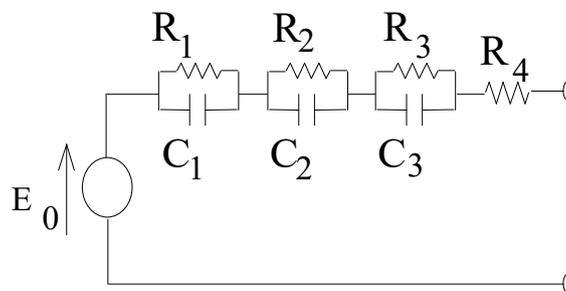


Figura 11 Schema elettrico equivalente di una batteria

Tale modello viene calibrato utilizzando dati sperimentali ottenibili con una batteria testata con un ciclatore con opportune prove per il calcolo della tensione a vuoto, delle resistenze interne di ogni ramo del circuito e della costante RC (che ha la dimensione di un tempo).

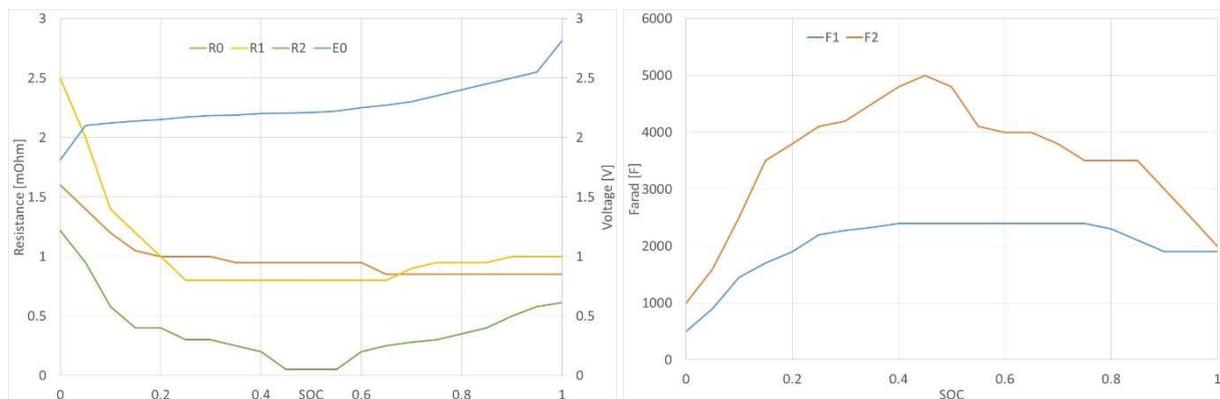


Figura 12 Curve di Tensione a vuoto, di resistenza interna e di capacità per una cella al titanato di litio [12]

Tali valori sono in funzione del SOC e caricati dal simulatore in forma tabellare; i dati relativi a una cella LTO sono riportanti in Figura 12 e Figura 15.

In Figura 13 invece si riporta uno screenshot del modello di simulazione durante l’esecuzione di un ciclo di marca con il veicolo selezionato; i dati mostrati sono relativi ai valori integrati, mentre quelli istantanei vengono salvati in un opportuno file con estensione “.csv” compatibile con qualunque foglio di calcolo come Microsoft Excel. I dati aggregati che vengono prodotti sono:

- di tipo cinematico, come la velocità media, la distanza percorsa;
- il consumo energetico per km, alle ruote, al motore e in batteria;
- l’energia ricaricata al capolinea, disponibile ed effettivamente ricaricata. Una batteria non accetta una potenza o corrente costante per tutta la durata della ricarica, ma il suo profilo di carica è del tipo “CC-CV” ovvero una prima fase a corrente costante alle potenze più elevate (all’inizio della ricarica) e successivamente, quando la tensione è arrivata al suo valore massimo, a Tensione costante, con una riduzione sempre maggiore del valore della corrente.
- Rendimento del motore e dell’intero veicolo, insieme ai valori in kWh del consumo del motore, batteria ecc.
- Tutti i valori relativi al sistema di accumulo, come Ah kWh erogati, potenza media e anche la potenza perduta sulle resistenze interne della batteria. Quest’ultimo parametro risulta di interesse per la stima del degrado delle batterie: ad un maggiore valore di energia perduta si associa una maggiore produzione di calore e un maggiore invecchiamento.

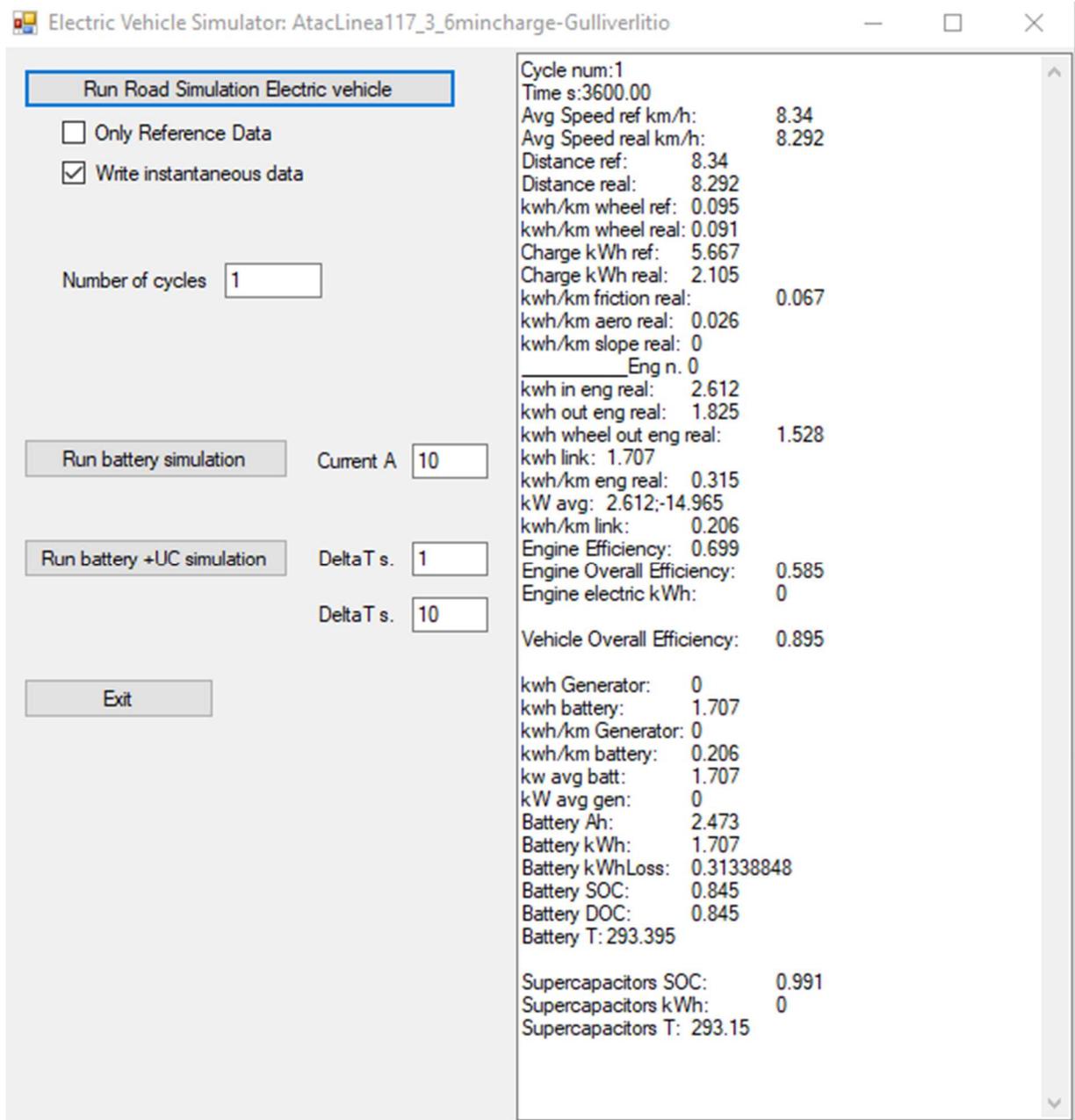


Figura 13 Screenshot del modello di simulazione durante l'esecuzione del ciclo relativo alla linea 117 con il Tecnobus Gulliver

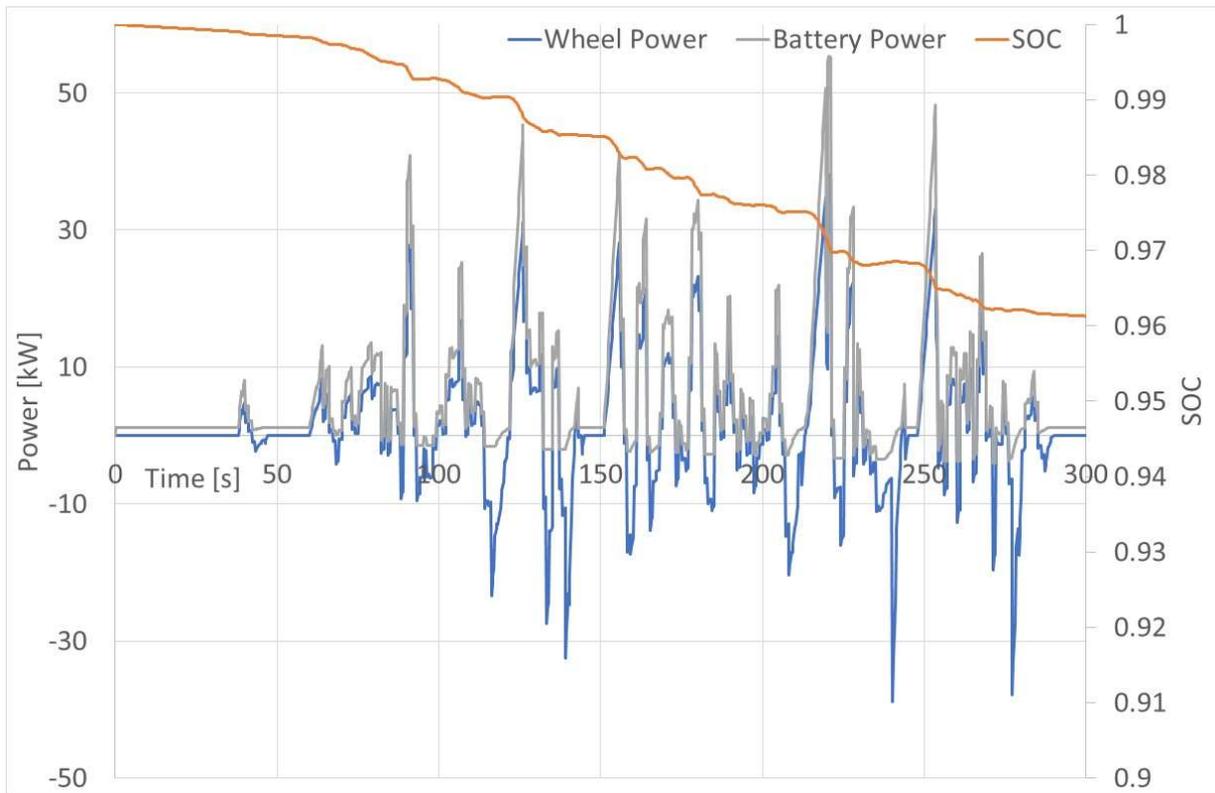


Figura 14 Andamento temporale della potenza alle ruote, in batteria e del SOC del Minibus sulla linea 117

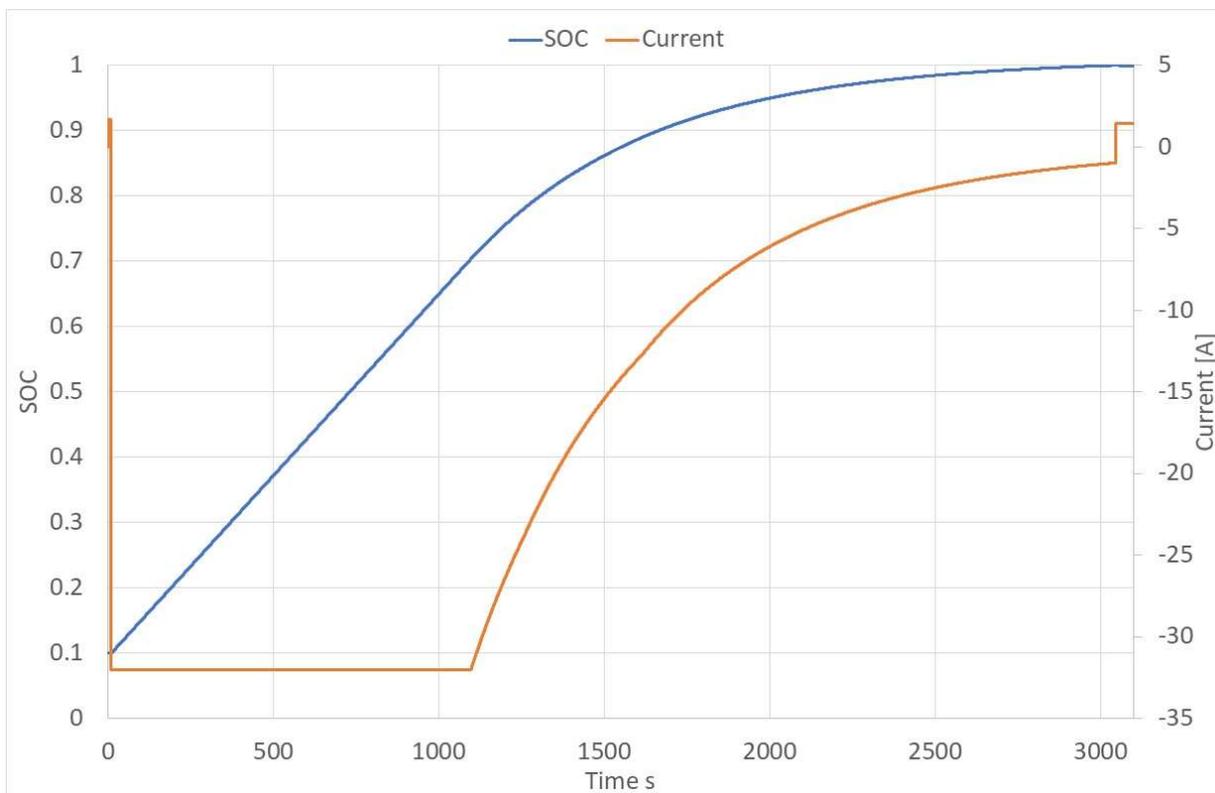


Figura 15 Simulazione della ricarica di una cella litio NMC (corrente costante-tensione costante)

Per quanto riguarda i dati istantanei, in Figura 14 dove si riportano i valori di potenza istantanea e di SOC durante un ciclo. Il primo valore di potenza è quello relativo alla batteria e il secondo è quello che arriva effettivamente alle ruote e viceversa; l'efficienza dell'azionamento e della trasmissione portano delle

perdite che sono funzione della coppia e del numero di giri del motore; al contrario, durante il recupero in frenata non tutta l'energia arriva in batteria, ma i rendimenti e l'effettiva corrente che può entrare in batteria durante la carica giocano un ruolo non trascurabile. Bisogna poi aggiungere la potenza necessaria al funzionamento degli ausiliari del mezzo, che è presente nel valore di potenza della batteria.

In Figura 15 invece, si riporta il valore di corrente di cella e del suo stato di carica durante una ricarica rapida. Si tratta di una cella NMC (Nickel-Manganese-Cobalto) Si nota come la fase a massima corrente cominci dall'inizio della ricarica e finisca quando il SOC arrivi attorno a 0.7, dove si raggiunge anche la tensione massima. Da quel punto in poi la corrente scenderà per mantenere un valore di tensione costante; in questa fase la potenza scende in maniera iperbolica. Il passaggio dalla fase a corrente costante a quella a tensione costante dipende molto dalle resistenze interne della batteria, che innalzano la tensione durante la ricarica; batterie con bassa resistenza interna, come ad esempio quelle al titanato di litio, mostrano un comportamento diverso portando la fase a corrente costante fino a SOC molto alti e lasciando solo una piccola parte con la modulazione in corrente.

2.2 Il Tecnobus Gulliver

Il bus oggetto delle sperimentazioni relative alla ricarica rapida è un minibus elettrico prodotto dalla Tecnobus, una azienda di Frosinone che produce tali mezzi ormai da decenni. In Tabella 1 si riportano alcuni dati del bus necessari anche per le simulazioni.

Nella versione originale (quella a disposizione della presente sperimentazione) è dotato di un sistema di accumulo con batterie al piombo con 585 Ah e 72V per una energia a bordo di circa 42 kWh per una autonomia di circa 80 km. Il peso del sistema di accumulo, per un valore di circa 33.5 Wh/kg è di circa 1250 kg.

Variable	Symbol	Value	Units
Vehicle mass	m	4285	kg
Rolling resistance coefficient	μ_{rr}	0.035	-
Gravity acceleration	g	9.81	m/s ²
Air density @ 20°C	ρ	1.223	kg.m ⁻³
Aerodynamic drag coefficient	C_D	0.7	-
Vehicle front area	A_f	5.693	m ²
Wheels radius	r	0.365	m
Gearbox transmission ratio	G_{gb}	4.37	-
Gearbox transmission efficiency	η_{gb}	90	%

Tabella 1 Specifiche del Tecnobus Gulliver della linea 117

Nell'ultima versione l'accumulo non è più al piombo ma di tipo "Zebra" con batterie ad alta temperatura NANICL (Nickel Sodio Chloride) [4], molto più leggera passando quindi da 1250 kg a 302 kg per 35 kWh, come riportato in Tabella 2.

SO NICK		Information datasheet battery type		Z40
				Z40-85-418
	Unit			
Capacity	Ah			418
Rated Energy	kWh			35,6
Open Circuit voltage 0 - 15% DOD	V			85
Max. voltage (regen braking)	V			102
Min. voltage (30 sec. peak power)	V			57
Cell Type / nr. of cells				ML3X / 363
Weight with BMI	kg			302
Specific energy with BMI	Wh/kg			119
Energy density without BMI	Wh/l			210
Ambient temperature	°C			-40 to +50
Thermal loss at 270°C (internal t)	W			< 150
Cooling				no
Heating time	h			24 h at 230 VAC
Periphery				BMI
System design recommendation:				
- MIN DISCHARGING TIME: 120 MIN.				
- MAX. DEPTH OF DISCHARGE: 80%				

Tabella 2 Specifiche del sistema di accumulo del Tecnobus Gulliver U530 [4]

Questo accumulo si presume essere a bordo del bus di cui si è misurato il ciclo di marcia, dopo il bando lanciato dall'amministrazione di Roma per il revamping dei 60 bus a disposizione dell'ATAC [5].

Nelle simulazioni quindi si è tenuto in considerazione un peso inferiore rispetto a quello riportato in Tabella 1 e pari a 3500 kg, avendo fatto delle misuri qui nella sede Casaccia con lo stesso bus equipaggiato con un accumulo agli ioni di Litio Ferro fosfato [7].

Il Gulliver ha un azionamento in grado di fornire 24 kW di potenza massima (235 Nm a 950 Rpm) ed una velocità massima di circa 35 km/h. la tensione dell'azionamento è di 72 V, tipica di applicazioni industriali come i carrelli elevatori, con una possibilità di avere una tensione di esercizio fino a 100 V. il peso massimo è di 6300 kg e il numero massimo di passeggeri è di 31 con 8 posti a sedere.

2.3 La linea ATAC 117 di Roma

Dopo il bando dell'amministrazione comunale di Roma per il revamping dei minibus elettrici della Tecnobus [5] dall'estate del 2019 sono entrati in servizio sulle linee 117 e 119 di Roma.

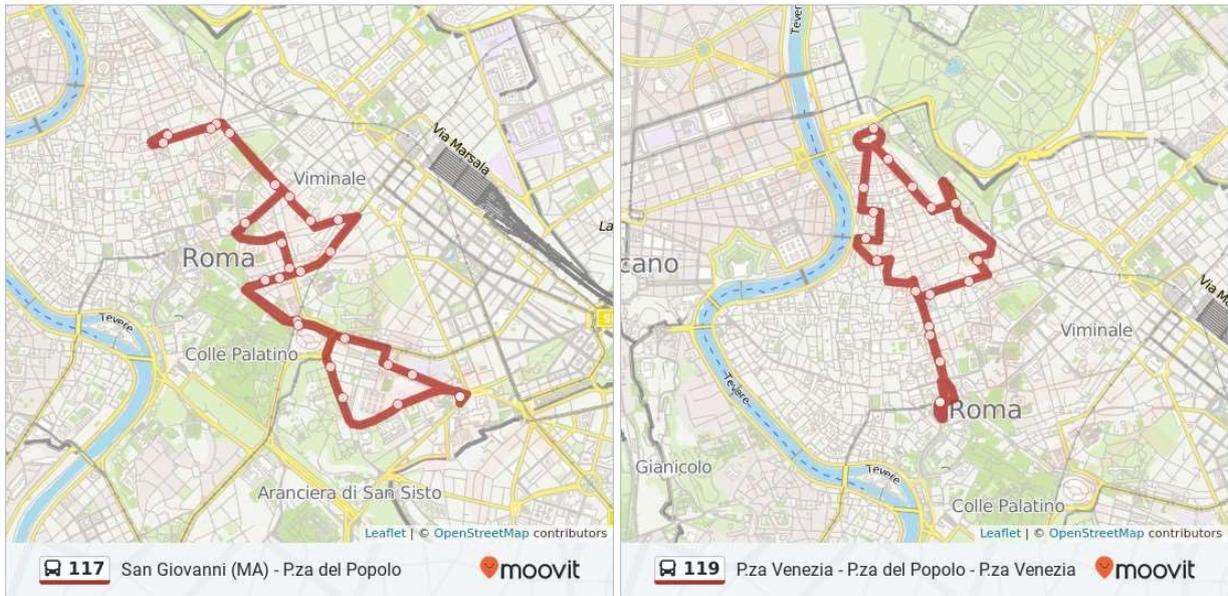


Figura 16 Tabella di viaggio e percorso della linea ATAC 117 (a sx) e 119 (a dx) di Roma

Entrambe le linee, che viaggiano nel centro di Roma vengono effettuate con il minibus Tecnobus Gulliver riportato in Figura 17.

La linea presa in considerazione per la presente sperimentazione è la linea 117, linea che parte da San Giovanni in Laterano, verso piazza San Silvestro e ritorno. La linea è attiva lunedì, giovedì, venerdì e sabato dalle 7.15 alle 20.15 e ci sono 25 fermate; essendo tutti percorsi nel centro di Roma le velocità sono molto basse e quindi perfettamente compatibili con il Tecnobus Gulliver che ha una velocità massima nominale di 35 km/h.



07:20 RIM TRASTEVERE
117 LB
07:42 S.G. LATERANO
117
07:45 S.G. LATERANO
08:13 PZA S.SILVESTRO
08:39 S.G. LATERANO
08:45 S.G. LATERANO
09:13 PZA S.SILVESTRO
09:39 S.G. LATERANO
09:45 S.G. LATERANO
10:13 PZA S.SILVESTRO
10:39 S.G. LATERANO
10:45 S.G. LATERANO
11:13 PZA S.SILVESTRO
11:39 S.G. LATERANO
11:45 S.G. LATERANO
12:13 PZA S.SILVESTRO
12:39 S.G. LATERANO
12:45 S.G. LATERANO
13:13 PZA S.SILVESTRO
13:39 S.G. LATERANO
13:57 RIM TRASTEVERE

Figura 17 il Tecnobus Gulliver di ATAC della linea 117 (a sx) e la tabella di viaggio della linea 117.

Ogni bus parte all’inizio del servizio dal deposito a Trastevere, percorre 6 volte il percorso per poi ritornare al deposito. il bus, parte ogni ora da san Giovanni in Laterano, ha un tempo di percorrenza stimato di 54 minuti e sosta al capolinea per 6 minuti per un percorso di circa 8 km. Per effettuare tale linea servono 8 bus: 4 nelle prime 6 ore e altri 4 nelle successive. Nelle acquisizioni fatte però il tempo di marcia è molto

minore effettuando un giro in meno di 45 minuti, sostando così 15 minuti al capolinea; questo consente anche un tempo di ricarica al capolinea, nella versione modificata che si vuole studiare, che può essere maggiore rispetto a 6 minuti.

Per la misura del ciclo di marcia, da utilizzare nelle simulazioni, è stata fatta una campagna di acquisizioni a bordo di un minibus in esercizio utilizzando uno smartphone e una app per sistema operativo Android (Ultra GPS Logger, Figura 18) per l'acquisizione dei parametri di sotto riportati:

- tempo;
- velocità;
- altitudine (per la misura della pendenza)
- latitudine e longitudine per la stima della posizione)
- numero satelliti e precisione della misura, necessari per la stima dell'affidabilità del dato.

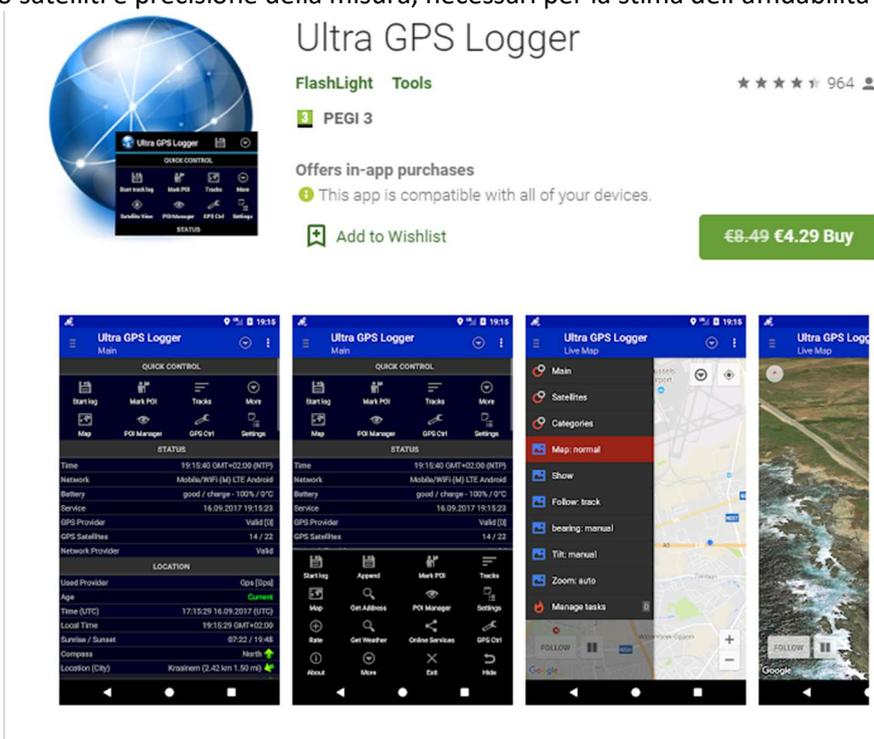


Figura 18 Screenshots dell'app UltraGPS Logger per smartphone Android utilizzata per le acquisizioni.

Altri parametri, come il numero dei passeggeri, sono stati misurati manualmente ed è stata fatta una stima media degli stessi attorno agli 8 passeggeri. Sono stati misurati 3 giri (9.45, 10.45, 11.45) della tabella di viaggio in Figura 17.

Un profilo di velocità acquisito lungo tutta la linea è riportato in Figura 19

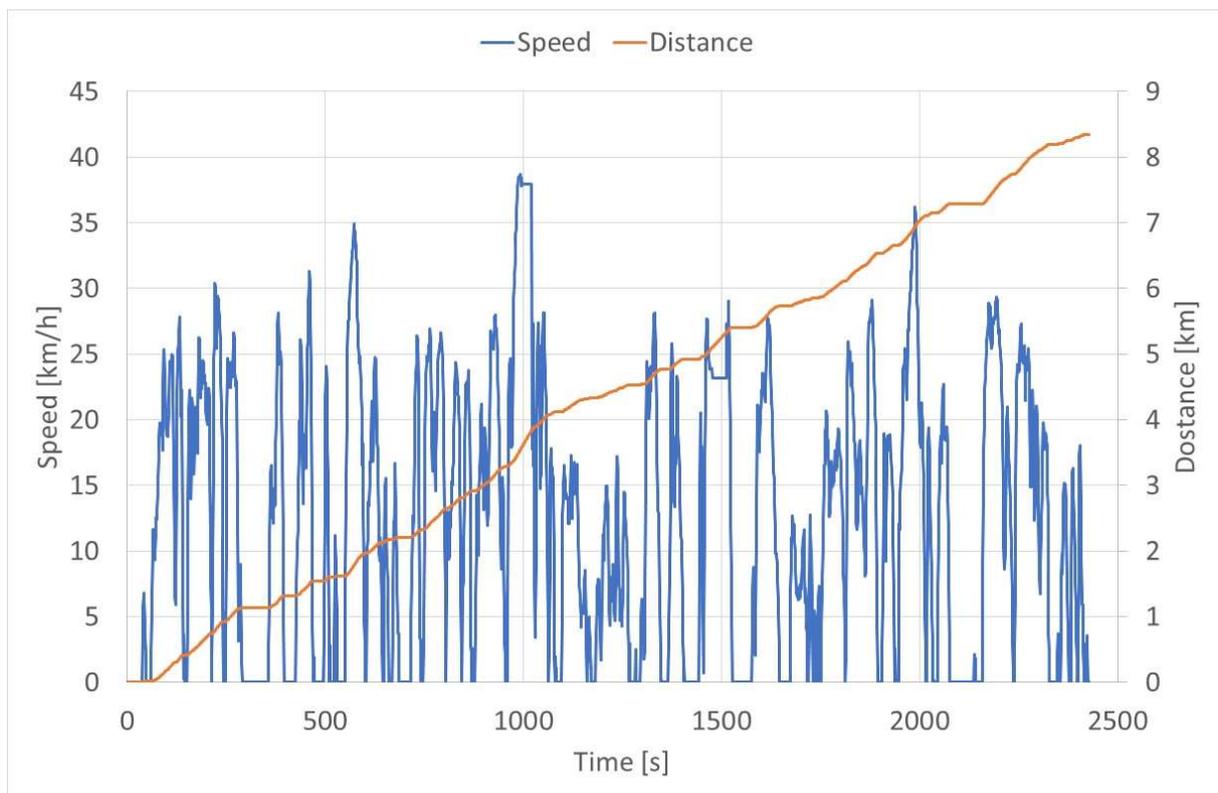


Figura 19 Profilo di velocità del Tecnobus Gulliver sulla linea ATAC 117 di Roma

Il riepilogo dei dati cinematici della linea 117 invece è in Tabella 3.

Tabella 3 Riepilogo dei dati cinematici delle acquisizioni della linea 117

	giro 1	giro 2	giro 3
Durata min	44.67	42.27	40.47
dist media	7.727749	8.044289	8.339533
v media	11.64645	11.41484	12.45837

Il percorso è di circa 8 km con un tempo di percorrenza medio di 42 minuti e una velocità media attorno ai 12 km/h; questi sono i valori tipici del minibus in questione che ha una velocità massima di circa 35 km/h e che si presta prevalentemente a percorrere ambienti urbani come i centri storici, con molte fermate e intersezioni semaforiche e incroci.

I valori di consumo energetico e tutti i rimanenti parametri elettrici vanno calcolati tramite modello di simulazione: la linea verrà simulata per tutto il profilo di missione tenendo conto anche della sosta al capolinea, dove comunque il bus è acceso e ha un consumo energetico dovuto agli ausiliari.

In Tabella 4 si riportano i risultati dell'intera linea (giro 3) con tutti i parametri elettrici necessari per il confronto con il bus con il nuovo accumulo e la nuova stazione di ricarica. La reale energia utilizzata alle ruote del minibus è di circa 1.81 kWh, mentre quella in ingresso, ovvero l'energia da fornire dal sistema di accumulo per la trazione è di 2.6 kWh a cui poi va aggiunto l'apporto degli ausiliari. L'energia consumata in batteria per ogni giro è di 3.8 kWh, che corrisponde proprio all'energia da ricaricare nella configurazione del bus con la ricarica al capolinea oggetto del triennio di ricerca.

Il rendimento dell'azionamento elettrico, composto da un motore a corrente continua e da un chopper, di derivazione industriale, è di circa 0.7, mentre il rendimento del veicolo, tenendo conto di tutto l'azionamento degli ausiliari del 58%. Il pacco batteria del Tecnobus è di circa 35.6 kWh e deve essere in grado di svolgere tutta la missione giornaliera del bus, ovvero 6 giri più il trasferimento da e per il deposito: lo stato di carica al termine del primo giro è di 0.919 quindi per ogni giro l'8% dell'energia in batteria viene consumata e al termine della giornata lo stato di carica sarà all'incirca del 50%.

Tabella 4 Risultati della simulazione del Tecnobus Gulliver sulla linea 117 (giro n.3)

Parameter	Value
Time s	3600
Avg Speed km/h	8.337
Distance km	8.337
kwh/km wheel	0.09
kwh in engine	2.779
kwh out engine	1.968
kwh wheel out engine	1.664
kwh link	3.979
kwh/km eng	0.336
kW avg	2.779
Engine Efficiency	0.708
Vehicle Efficiency	0.581
kwh battery	3.979
kwh/km battery	0.481
Battery kWhLoss	0.065
Battery SOC	0.897
Full equivalent cycles/year	125

2.4 Linea modificata per ricarica rapida

A valle delle considerazioni del paragrafo precedente, si vuole progettare un sistema di trasporto, non più con ricarica al deposito, con un sistema di accumulo quindi molto grande in grado di svolgere la missione giornaliera del minibus, ma un sistema con una ricarica al capolinea con le seguenti caratteristiche:

- un pacco batterie sensibilmente ridotto in grado di svolgere teoricamente anche un solo giro, dell'ordine dei 3.8 kWh, più un coefficiente di sicurezza che tenga conto di eventuali imprevisti, della possibilità di rientro al deposito anche senza ricarica (in caso di qualche imprevisto o guasto) dell'inevitabile invecchiamento delle batterie. Anche in caso di batterie prossime alla sostituzione il bus deve essere in grado di svolgere la sua funzione. Tale pacco deve essere in grado di ricaricarsi rapidamente al capolinea e quindi deve essere ad alta potenza specifica: tecnologie di cella come le nanotecnologie di tipo NMC oppure al Titanato di Litio (LTO) consentono potenze in ricarica molto maggiori rispetto alle celle litio standard come quelle al Ferro Fosfato (LFP) e meglio si prestano per questo tipo di applicazioni. Le LTO infatti accettano correnti di ricarica e di scarica fino a 10 volte la loro capacità (10C) consentendo quindi il dimensionamento del sistema di accumulo sulla base dell'energia da ricaricare piuttosto che sulla potenza, cosa questa non possibile per batterie a più bassa potenza specifica. Le LTO poi hanno una vita molto maggiore rispetto alle altre (20.000 cicli contro 4000 circa delle NMC) cosa questa che le rende le più adatte. Lo svantaggio di questo tipo di celle è però una più bassa energia specifica a causa di una più bassa tensione di cella (2.3V contro i 3.7V delle NMC) ed anche un costo maggiore.
- Ricarica rapida al capolinea. L'energia consumata lungo tutto il giro deve essere ricaricata durante la sosta del bus al capolinea. Il tempo di sosta è formalmente stimato in 6 minuti e per una carica a potenza costante sarebbero necessari 40 kW di potenza. Nella realtà la ricarica si effettua in due step, la prima a corrente costante, la seconda a più bassa potenza a tensione costante. Per non allungare troppo i tempi potrebbe essere necessario aumentare la potenza nella prima fase. Nel caso di una ricarica alla fermata invece, le potenze sono più elevate e per un tempo molto ridotto: i tempi di sosta alla fermata sono dell'ordine dei 20 secondi e la potenza massima accettabile dalle batterie, nel caso di un accumulo al titanato di litio (10 Cdi corrente massima) di 10 kWh può arrivare ad essere di 100 kW.

- Un sistema di accumulo a terra per limitare la richiesta di potenza alla rete elettrica. Carichi impulsivi di questo tipo potrebbero costituire un problema per il gestore della rete. Un accumulo nella stazione può limitare tali richieste in quanto riduce la potenza durante la ricarica del bus e successivamente si può ricaricare a potenza più bassa. Ad esempio, per una ricarica al capolinea o alla fermata con 40 kW e 4 kWh, un accumulo contribuisce all'erogazione della potenza e ricaricarsi successivamente quando il bus è andato via. Nel caso di una ricarica alla fermata i benefici sono massimi in quanto si eroga un elevato valore di potenza per 20 secondi e si ricarica successivamente per alcuni minuti con riduzioni di potenza che possono essere anche dell'80% [16].

La nuova linea non ha più il limite kilometrico giornaliero che ha l'attuale bus, ovvero 6 corse, ma può rimanere in esercizio per tutto il giorno, necessitando quindi di 4 bus per soddisfare tutta la linea invece che 8 come avviene adesso.

2.4.1 La batteria

La linea di trasporto "modificata" quindi avrà un accumulo ad alta potenza specifica e la tecnologia scelta per la chimica delle celle è il titanato di litio. Per le potenze di ricarica in gioco la tensione nominale del sistema di accumulo non potrà più essere quella originale, ossia 72V, ma si porterà verso valori più elevato in grado di poter limitare le massime correnti. La tensione nominale quindi, per questo tipo di celle sarà di circa 305V con un valore massimo di 400V. si renderà inoltre necessario un convertitore per collegare la batteria all'azionamento, che rimarrà invece alla tensione precedente.

La tipologia di cella presa in considerazione è quella riportata in Figura 20 [12], dove si riportano anche tutti i dati di input per poter eseguire le simulazioni.

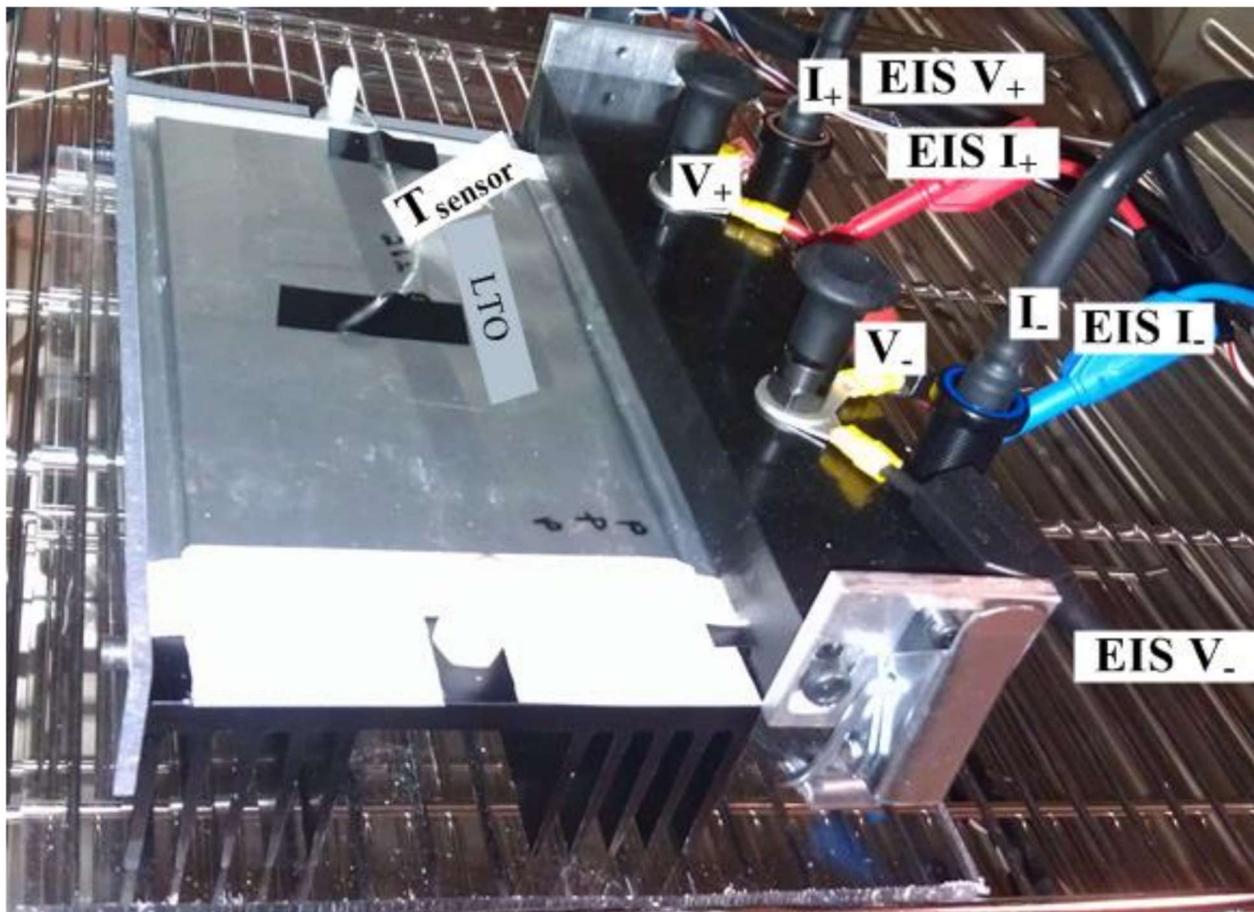


Figura 20 Esempio di Cella al titanato di Litio [12]

Le specifiche delle celle e del pacco batterie preso in considerazione sono invece riportate in Tabella 5.

La capacità di ogni singola cella è di 13 Ah, mentre la tensione nominale è di 2.26V con i massimi valori ammessi durante la carica e scarica di 1.5 e 2.9V. le massime correnti di cella sono di 130 A (ovvero 10C) e una vita utile di 20.000 cicli. Tuttavia, un altro PTR relativo alla predizione della vita delle batterie, si occuperà della stima della vita delle celle tra cui quelle al Titanato di Litio e sulla base di quei risultati sarà possibile uno studio più accurato della effettiva vita delle batterie simulate nel presente report, per cui tale studio non verrà approfondito ma rinviato a valle dei risultati dell'altra attività. Nel presente studio per si riportano alcuni indicatori responsabili dell'invecchiamento delle batterie, come ad esempio le correnti massime, il grado di scarica (DOD) e la potenza perduta nelle resistenze interne che può essere correlata sia con la corrente che con la temperatura, visto che tale potenza effettivamente la sorgente di calore delle batterie.

Il pacco batterie intero invece sarà formato da 135 celle in serie per avere una tensione nominale di 305V e una massima di 390.5, inferiore ai 400V di limite massimo dei convertitori attualmente a bordo del minibus. Con 3 celle in parallelo l'energia della batteria è di circa 11.9 kWh, valore di riferimento per le simulazioni che verranno effettuate, mentre la potenza massima (alla tensione nominale) di 83 kW ipotizzando un C rate più conservativo per il pacco batterie di 7C . Tale valore, circa 1/3 di quello attualmente a bordo dei Tecnobus Gulliver, è stato scelto in maniera molto conservativa, tenendo conto di possibili imprevisti durante il servizio:

- Impossibilità di effettuare la ricarica; il bus quindi dovrebbe poter svolgere due volte il giro senza ricaricarsi;
- Eventuale guasto del sistema di ricarica; l'energia a bordo deve consentire il rientro del mezzo nel deposito;
- Invecchiamento; la batteria, durante il suo uso perde le sue caratteristiche, in termini di potenza specifica e di energia specifica. Nel caso di sostituzione del pacco batteria quando essa avrà avuto una riduzione della sua capacità del 20%, il minibus deve essere comunque in grado di svolgere la sua missione.
- Una potenza di ricarica di almeno 40 kW; questa condizione non è molto stringente in quanto per un pacco batteria superiore a 4 kWh è sicuramente rispettata.

Tabella 5 Specifiche delle celle e del pacco batteria al Titanato di Litio

Parametro	Valore		
Tensione Nominale	2.26 V		
Tensione minima e massima	1.5-2.9 V		
Corrente massima di cella (Crate)	10C		
Range di Temperatura	-40 – 55 °C		
Cicli vita	5000-20000		
Celle in serie	135		
Tensione nominale pacco	305 V		
Tensione min/massima pacco	202.5/391.5 V		
Capacità nominale	13 Ah	13 Ah	10 Ah
Celle in parallelo	3	2	2
Energia Pacco batteria	11.9 kWh	7.93 kWh	6 kWh
Potenza massima di pacco (Crate:7C)	83 kW	55.5	42

Tuttavia, nelle simulazioni si riporteranno i risultati anche con accumuli più piccoli, 8 kWh e 6 kWh, immaginando il pacco batteria con due celle in parallelo e 135 celle in serie per la versione da 8 kWh. Un terzo pacco batterie da 6 kWh è stato ipotizzato immaginando una cella da 10 Ah, 135 celle in serie e 2 in parallelo, con le resistenze interne ricavate con una proporzione inversamente lineare fra capacità e resistenza interna.

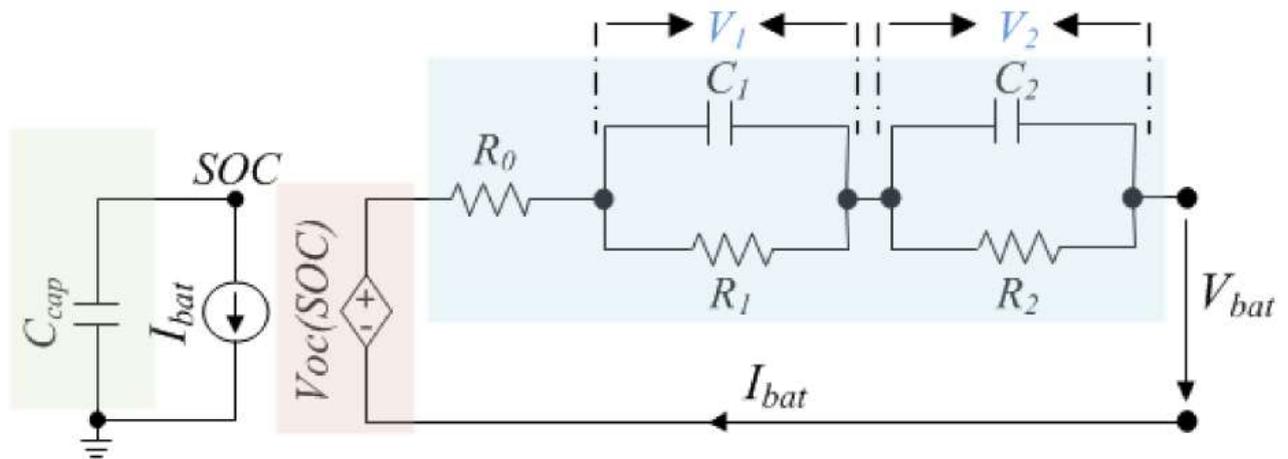


Figura 21 Circuito elettrico equivalente di una batteria [12]

Per una simulazione il più accurata possibile, ogni singola cella deve essere riprodotto in modo più accurato possibile. Nel presente studio, per riprodurre il più fedelmente possibile la dinamica della cella, il circuito equivalente è composto da:

- Un generatore di forza elettromotrice; la sua tensione, Open Circuit Voltage (OCV) è funzione dello stato di carica, come in Figura 22;
- Una resistenza interna R_0 ; anch'essa funzione dello stato di carica;
- Una serie di circuiti RC con due rami, uno dove c'è una resistenza e uno dove c'è una capacità; ogni componente è funzione dello stato di carica e tali parametri sono riportati in Figura 23.

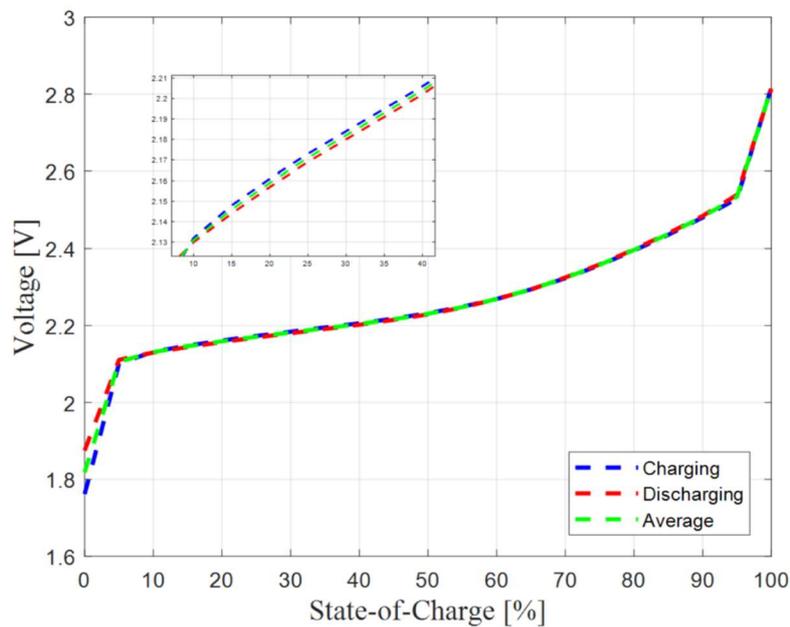


Figura 22 Tensione a vuoto di una cella LTO

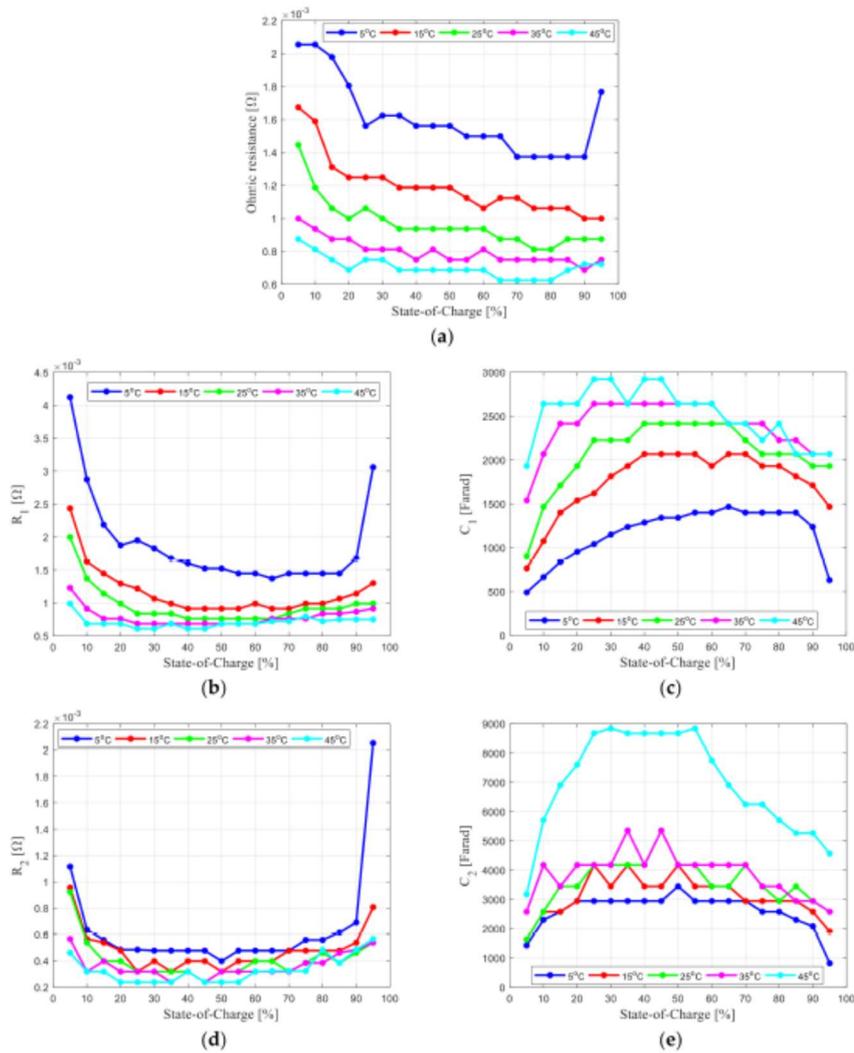


Figura 23 Parametri del circuito elettrico equivalente di una cella LTO [12]

Con questi dati di ingresso il pacco batteria può essere completamente riprodotto sia nel caso di prove statiche di carica e scarica, sia dinamiche, tipiche di applicazioni automotive, come riportato anche in [12].

2.4.2 Convertitori

Il pacco batteria così configurato ha una tensione nominale di circa 305 V, mentre l’azionamento del bus ha una tensione sensibilmente più bassa, settabile dai 72 ai 96 V, è necessario quindi un convertitore che possa abbassare la tensione da quella delle batterie a quella dell’azionamento. Il convertitore che viene usato in questi calcoli è il TAME BBDH 02 5 kW, già utilizzato nella precedente sperimentazione di ricerca di sistema [14][15].

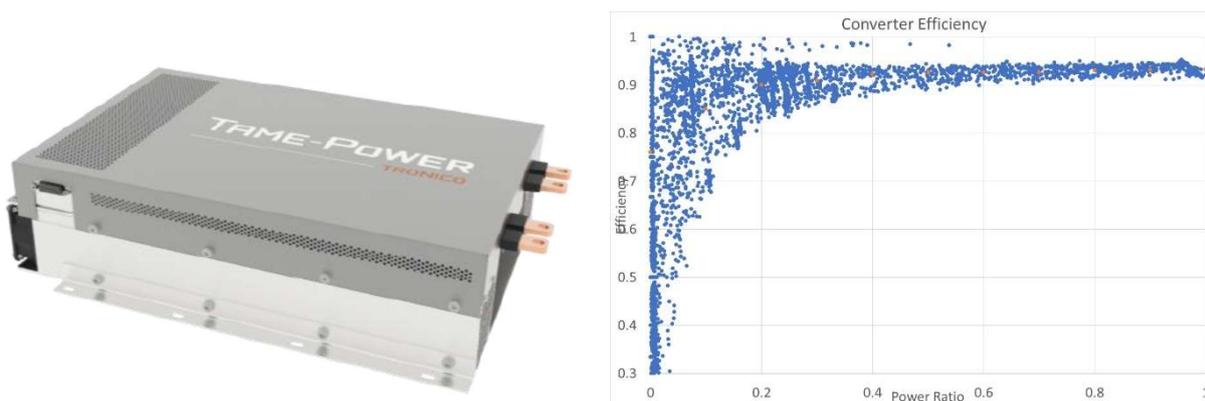


Figura 24 Convertitore DCDC TAME 5 kW (sx) e valori di rendimento in funzione della potenza erogata in uscita (dx)

Dal punto di vista modellistico, il parametro di interesse per questo dispositivo è il suo rendimento e quindi le perdite di energia che devono essere calcolate nella simulazione. In Figura 24 si può notare come la curva di efficienza vari in funzione della potenza normalizzata (lato azionamento) erogata; per carichi, maggiori del 40% il rendimento può ritenersi maggiore del 90 % con valori che arrivano al 93% a massimo carico. Questa curva viene utilizzata nel modello per tener conto delle perdite per il passaggio dalla batteria verso l'azionamento.

Il suddetto convertitore ha una potenza nominale di 5 kW a 60 V (lato azionamento), ma può arrivare a 10 kW per tensioni di 90 V (Figura 25). per poter erogare la potenza massima del motore elettrico saranno necessari 3 convertitori in parallelo ed una tensione di uscita di almeno 80V: il chopper che controlla il motore in corrente continua, di derivazione industriale (carrelli elevatori) può essere settato per una tensione maggiore rispetto a quella standard di 72 V in modo da consentire agli inverter di fornire la potenza massima che l'azionamento elettrico potrebbe richiedere.



Figura 25 andamento della potenza massima in uscita dall'inverter in funzione della tensione di uscita

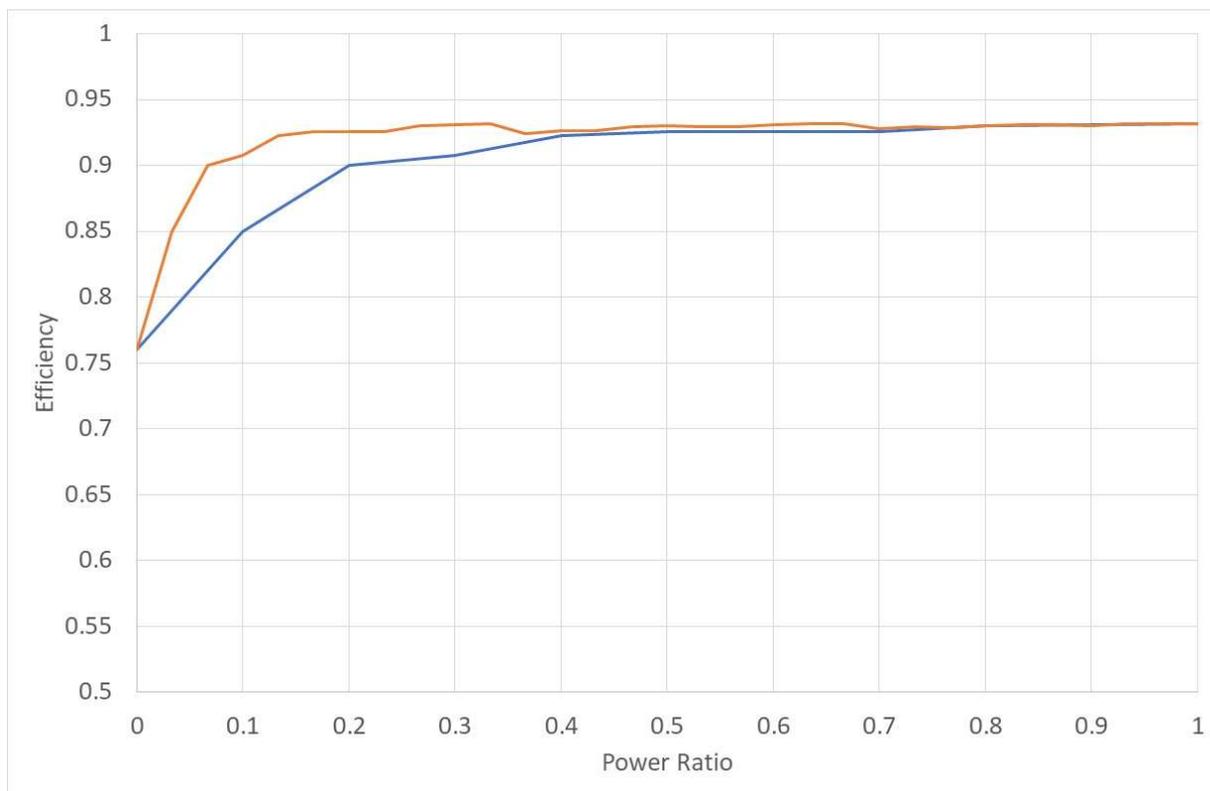


Figura 26 Possibili gestioni dei 3 convertitori a bordo del bus: parallelo oppure sequenziale.

Per il controllo dei 3 convertitori, si può ipotizzare che sia fatto facendoli funzionare tutti in parallelo erogando sempre la stessa potenza; in questo modo funzionano tutti allo stesso modo con gli stessi valori di rendimento. Una possibile variante potrebbe essere di usarli in modo sequenziale, in modo da aumentare il rendimento globale (Figura 26). Si nota come la gestione sequenziale offra rendimenti maggiori per i carichi più bassi.

2.5 Ricarica solo al capolinea

La prima architettura da testare consiste in una linea con il bus equipaggiato con il sistema di accumulo di sopra riportato, un convertitore per collegare quest’ultimo all’azionamento e un sistema di ricarica al capolinea.

Il Gulliver così configurato verrà simulato sul un profilo di velocità e di carico passeggeri e verranno riportati i parametri che verranno utilizzati come input per le successive annualità del triennio di ricerca. Verrà valutata la capacità minima necessaria per il completamento del servizio senza interruzioni, la potenza e l’energia da ricaricare al capolinea e verrà valutata in via preliminare anche lo sforzo in termini di vita del sistema di accumulo da realizzare.

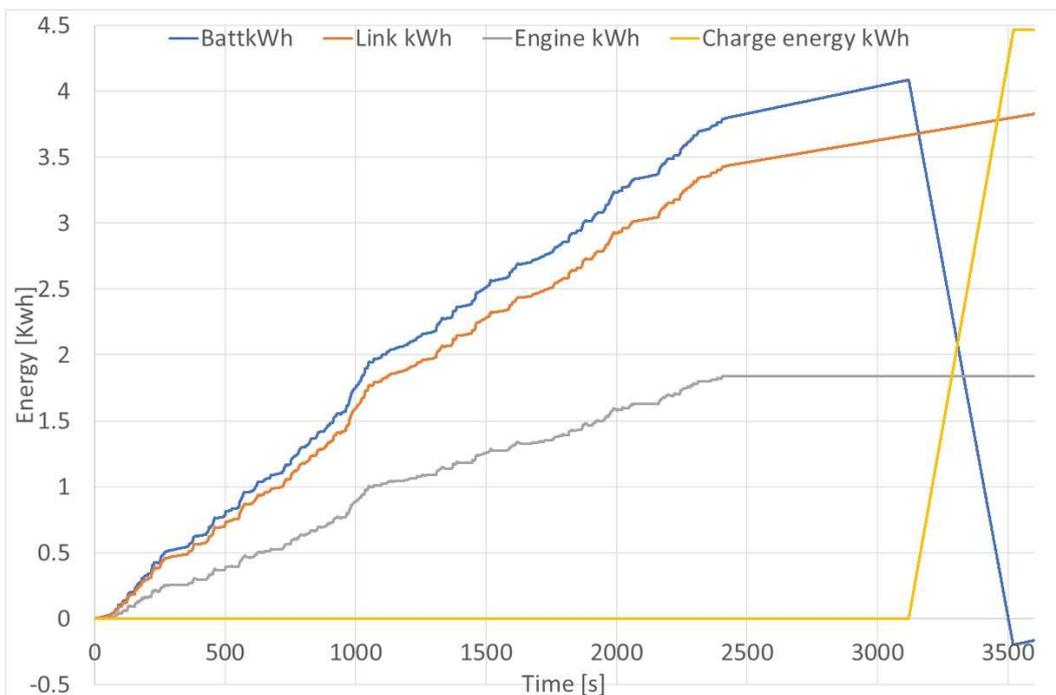


Figura 27 Energia consumata dal motore elettrico, totale (motore più ausiliari) e dalla batteria (12 kWh) per un sistema con ricarica al capolinea

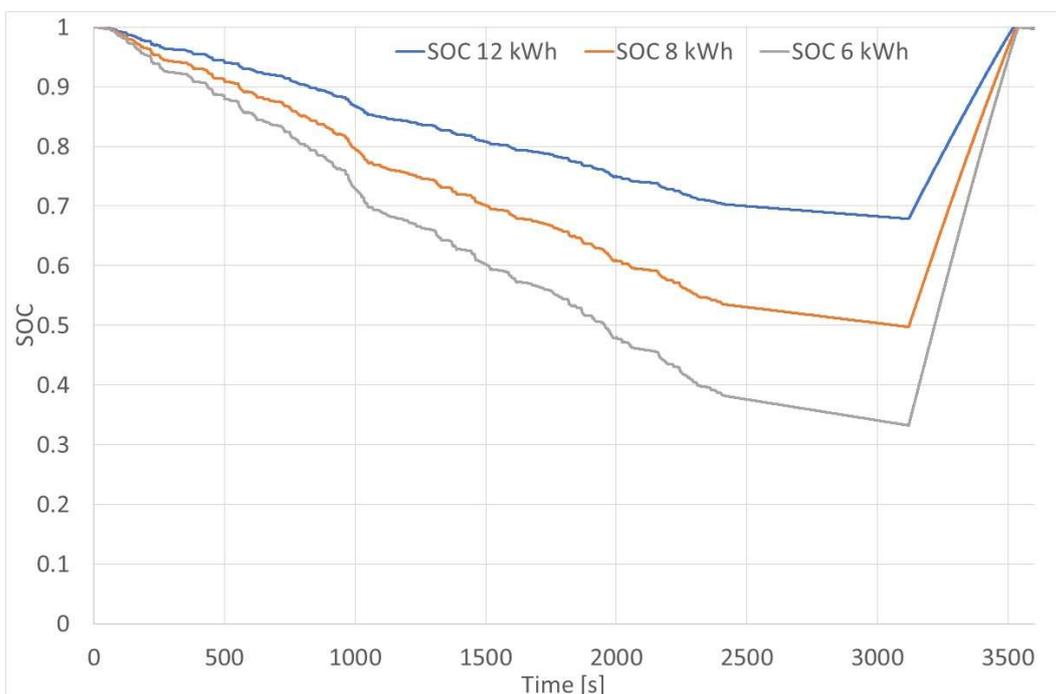


Figura 28 Andamento del SOC durante un giro della Linea 117 con ricarica al capolinea

In Figura 27 si riportano i valori di energia consumata durante l'intera corsa della linea 117 così modificata. La linea grigia rappresenta l'energia consumata a valle del motore elettrico, la linea rossa rappresenta invece il consumo totale del bus durante tutto il servizio, ovvero l'energia del motore elettrico, gli ausiliari tenendo conto dei vari rendimenti di trasformazione.

La linea blu rappresenta invece l'energia consumata in batteria e successivamente ricaricata al capolinea; la differenza con l'energia consumata sul "link" è dovuta alla presenza del convertitore che ha una efficienza minore di uno, ma decrescente con il carico, quindi per potenze più basse è minore aumentando ancora di più l'apporto di energia.

In Figura 28 si riporta l'andamento del SOC durante il servizio per 3 possibili configurazioni di accumulo: il primo da 12 kWh (135 celle in serie e 3 in parallelo), il secondo da 8 kWh (135 celle in serie e 2 in parallelo) e il terzo con un pacco batteria da 6 kWh. Tutti gli accumuli sono in grado di completare il servizio e hanno sufficiente energia per poter partire e tornare dal deposito, e con una certa confidenza possono alimentare il bus lungo tutta la loro vita utile. Il pacco da 12 kWh può però in aggiunta anche fare due corse di seguito senza ricaricarsi, cosa che potrebbe essere importante nel caso in cui la stazione di ricarica fosse temporaneamente non disponibile, ad esempio un parcheggio in divieto di sosta di un veicolo o qualunque altra problematica che possa impedire la ricarica; nel caso in cui il capolinea e la stazione di ricarica fosse posizionata in un punto inaccessibile dai veicoli tale problema potrebbe non essere mai presente e anche l'accumulo da 8 kWh potrebbe essere utilizzato. In aggiunta si mostra anche l'andamento del SOC per un accumulo di 6 kWh, simulato ipotizzando una capacità della cella di 10 Ah con due celle in parallelo. Questa simulazione è stata fatta normalizzando tutti i parametri come le resistenze interne in modo da poter confrontare le diverse capacità. Il SOC minimo con tale accumulo è poco al di sopra di 0.3, in grado di poter accettare un invecchiamento della cella (una riduzione della capacità del 20%), ma è molto al limite in caso di qualunque imprevisto come un traffico eccessivo che potrebbe aumentare il consumo kilometrico del bus.

La potenza di ricarica, stimata inizialmente di 40 kW, non è in grado di ricaricare completamente il bus in 6 minuti; le possibili soluzioni possono essere l'allungamento del tempo oppure l'aumento della potenza. il servizio della linea 117 è stato sempre completato in un tempo minore rispetto a quello riportato nella tabella di viaggio e nei 3 giri acquisiti è stato sempre minore di 45 minuti. Un aumento di 2 minuti quindi non comporta nessuna variazione e può essere tranquillamente adottato nelle simulazioni (anche quella di Figura 28) e nel dimensionamento della stazione di ricarica che verrà fatto nella seconda annualità del triennio di ricerca di Sistema elettrico.

La fase di ricarica quindi è effettuata ad una potenza di 40 kW per un tempo di 8 minuti, in quanto maggiori potenze di ricarica sollecitano di più il sistema di accumulo e anche la vita utile dello stesso.

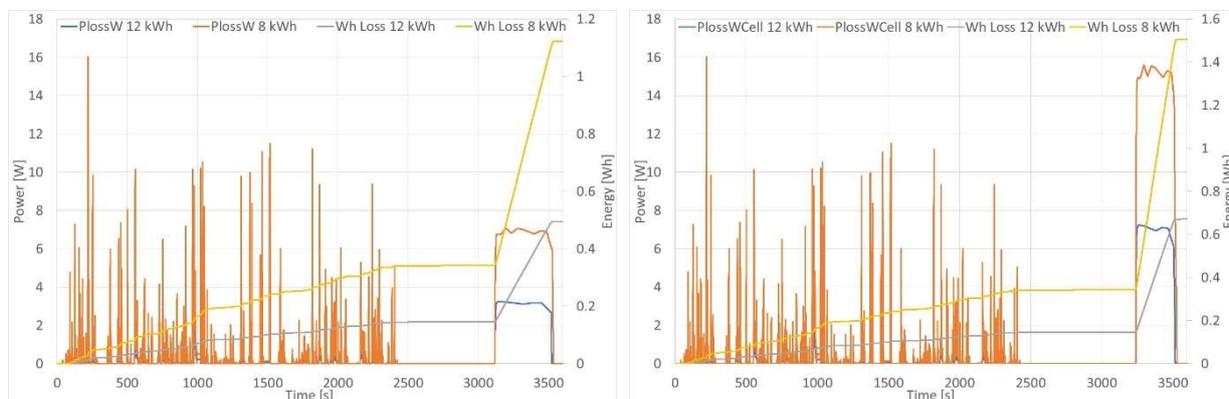


Figura 29 Andamento della potenza e dell'energia perduta sulle resistenze interne della cella durante un giro della Linea 117 con ricarica da 40 kW (a sx) e da 60 kW (a dx)

In Figura 29 si riporta l'andamento della potenza perduta sulle resistenze interne di ogni cella per i due sistemi di accumulo e per i due valori di potenza di ricarica. Tale potenza perduta è diretta funzione anche della sollecitazione termica in quanto maggiore è la dispersione e maggiore sarà la temperatura delle celle. Il grafico a sinistra mostra come la batteria da 8 kWh sia sollecitata maggiormente (si richiede una potenza specifica maggiore, quasi doppia) rispetto a quella più grande e la fase di ricarica è quella più onerosa a causa della sua durata. Allo stesso tempo, un aumento della potenza di ricarica del 50%, ovvero passando da 40 sa 60 kW raddoppia le perdite in fase di ricarica. La soluzione a più bassa potenza quindi può ritenersi preferibile anche per una minore sollecitazione del sistema di accumulo, di circa il 50%.

Per quanto riguarda i dati aggregati del ciclo, si riporta la tabella riepilogativa (Tabella 6).

Le differenze tra la linea originale e quella modificata stanno tutte nel differente accumulo e nella presenza di una ricarica al capolinea. La potenza in ricarica è di 40 kW e l'energia ricaricata per ogni giro è di 4.45

kWh (con 12 kWh di accumulo). Si è passati poi da 35.6 kWh nella versione attualmente in circolazione a Roma a 12 kWh, 8 kWh o 6 kWh. Il grado di scarica per il nuovo sistema di accumulo è di 0.33 per il pacco da 12 kWh, di 0.5 per quello da 8 kWh o di 0.63 con 6 kWh, cosa questa che può far presupporre una vita inferiore al pacco più piccolo. Un altro parametro utile per la stima della vita è l'energia perduta nelle resistenze interne della batteria, che passa da 0.05 kWh nel bus attualmente in circolazione, a 0.2 per il pacco da 8 kWh, 0.3 per quello da 8 kWh e 0.393 per il pacco da 6 kWh). Il numero di cicli equivalenti inoltre passa da 125 cicli/anno a 412 (12 kWh) a 624 (8 kWh) fino a 786 (6 kWh), con un aumento di circa il 50% e 90%, mostrando quindi un aumento proporzionale alla riduzione dell'energia accumulata. Allo stesso modo si comporta la differenza del grado di scarica e anche della potenza perduta, indicatori quindi di una differenza in termini di vita utile del pacco batterie proporzionale a tale valore [17].

Tabella 6 Riepilogo per un sistema di trasporto con ricarica al capolinea

Time s	3600		
Avg Speed km/h	8.34		
Distance km	8.34		
kwh/km wheel	0.095		
kwh in eng real	2.599		
kwh out eng real	1.808		
kwh wheel out eng real	1.509		
kwh/km engine	0.313		
Engine kW avg	2.599		
kwh/km link	0.458		
Engine Efficiency	0.696		
Engine Overall Efficiency	0.581		
Charge Power	40		
Battery Energy kWh	12	8	6
Charge kWh	4.453	4.565	4.654
DOD	0.33	0.5	0.63
kWh loss	0.2	0.30	0.393
Battery efficiency	0.957	0.936	0.917
Full equivalent cycles/year	412	624	786

2.6 Ricarica al capolinea e a una fermata

Una seconda architettura da testare consiste in una linea con il bus equipaggiato con il sistema di accumulo di sopra riportato, un convertitore per collegare quest'ultimo all'azionamento, un sistema di ricarica al capolinea e una stazione di ricarica alla fermata per una ricarica ultrarapida.

Il sistema è esattamente come nel caso di sopra riportato, ma con l'aggiunta di una ricarica di 20 secondi al massimo della potenza a metà percorso (con corrente a 7C); per differenti capacità di accumulo ci saranno quindi differenti potenze di ricarica, ovvero 83 kW nominali per un accumulo da 12 kWh e 55.6 kW per il pacco da 8 kWh e 42 kW per 6 kWh. La stazione è stata virtualmente posizionata a metà percorso (all'incirca piazza San Silvestro), ma può essere anche posizionata in una fermata differente, in quanto l'accumulo a bordo è in grado di poter comunque percorrere una distanza maggiore o minore senza interruzioni del servizio (in teoria anche tutto il servizio, come nel caso di ricarica al solo capolinea).

Il Gulliver così configurato verrà simulato come nel caso di ricarica al solo capolinea su un profilo di velocità e di carico passeggeri e verranno riportati i parametri che verranno utilizzati come input per le successive annualità del triennio di ricerca. Verrà valutata la capacità minima necessaria per il completamento del servizio senza interruzioni, la potenza e l'energia da ricaricare al capolinea e verrà valutata in via preliminare anche lo sforzo in termini di vita del sistema di accumulo da realizzare.

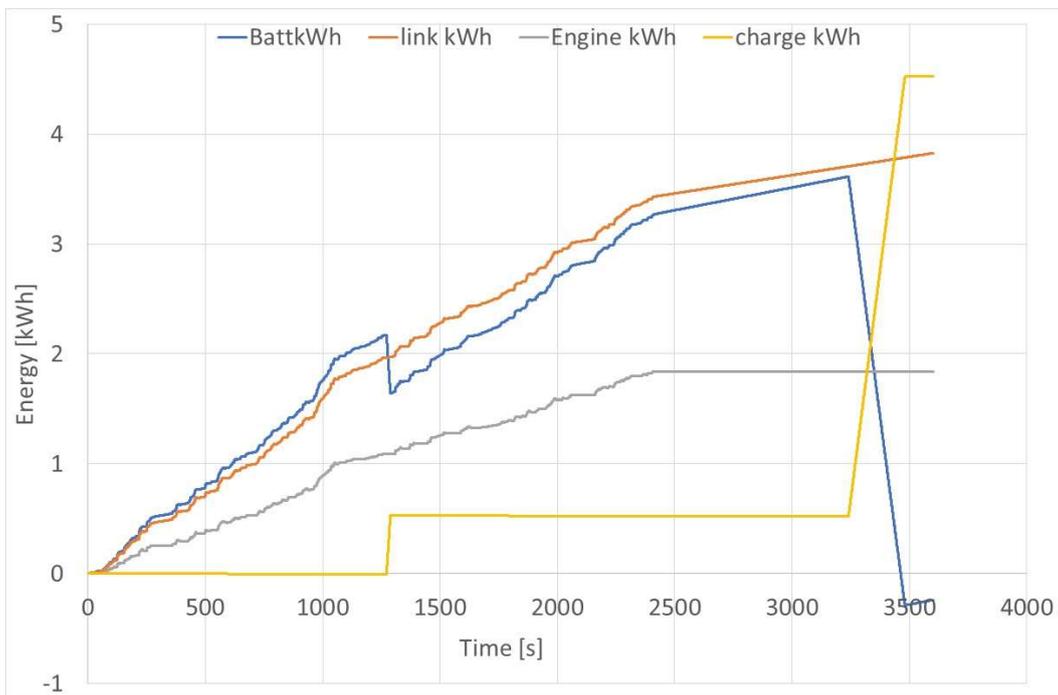


Figura 30 Energia consumata dal motore elettrico, totale (motore più ausiliari) e dalla batteria (12 kWh) per un sistema con ricarica al capolinea più una ricarica a metà percorso

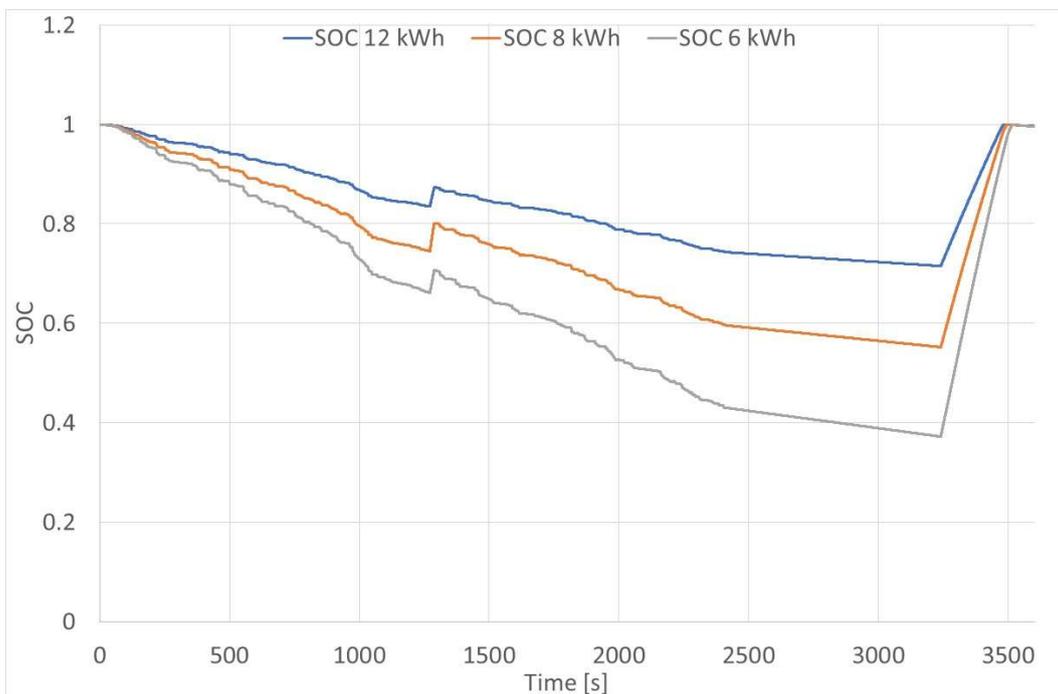


Figura 31 Andamento del SOC durante un giro della Linea 117 con ricarica al capolinea più una ricarica a metà percorso per un accumulo da 12 kWh e 8 kWh

In Figura 30 e Figura 27 si riportano i valori di energia consumata durante l'intera corsa della linea 117 così modificata e con un accumulo da 12 kWh. La linea grigia rappresenta l'energia consumata a valle del motore elettrico, la linea rossa rappresenta invece il consumo totale del bus durante tutto il servizio, ovvero l'energia del motore elettrico, gli ausiliari tenendo conto dei vari rendimenti di trasformazione. La linea blu rappresenta invece l'energia consumata in batteria e ricaricata a metà percorso e al capolinea; la linea gialla rappresenta l'energia ricaricata lungo tutta la linea e si può notare l'apporto di circa 0.5 kWh nella ricarica a metà percorso, energia che consente di percorrere circa 1 km. In Figura 31 si riporta

l'andamento del SOC per il tre accumuli, che a parte la ricarica intermedia, non differiscono dalla configurazione con la sola ricarica al capolinea.

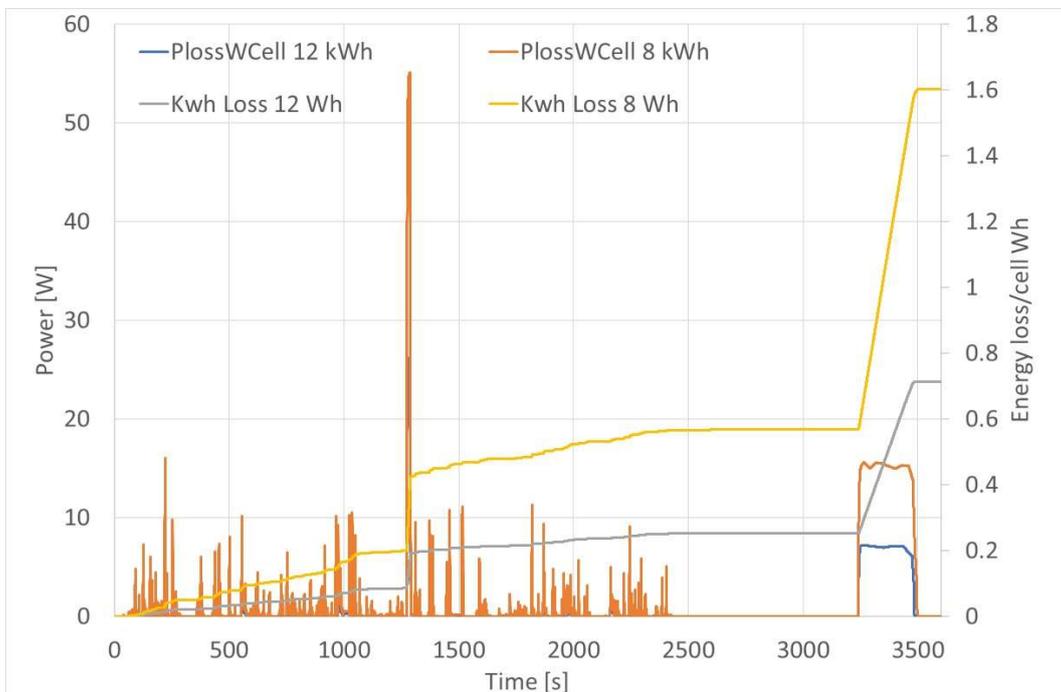


Figura 32 Andamento della potenza e dell'energia perduta sulle resistenze interne della cella durante un giro della Linea 117 con ricarica al capolinea più una ricarica a metà percorso per un accumulo da 12 kWh e 8 kWh

Le perdite sulla batteria invece hanno un aumento in termini di potenza ed energia non trascurabile in quanto nella ricarica intermedia la corrente è molto elevata. Tuttavia, l'aggiunta di una ricarica intermedia non comporta miglioramenti di alcun tipo rispetto poiché l'apporto di energia è contenuto, mentre la complessità è maggiore e lo stress sulla batteria è ulteriormente aumentato, come si vede anche dalla Tabella 7. Non si giustifica nemmeno la possibilità di utilizzare il pacco più piccolo (grazie ad una ricarica aggiuntiva) in quanto anche con la sola ricarica al capolinea potrebbe essere comunque utilizzato.

Tabella 7 Riepilogo per un sistema di trasporto con ricarica al capolinea più una ricarica a metà percorso

Battery Energy kWh	12 kWh	8 kWh	6 kWh
Charge Current at Terminal	3.35	5C	6.7C
Charge Current at Bus stop	7C	7C	7C
Charge kWh	0.46/4.05 (4.523)	0.31/4.32 (4.655)	0.23/4.49 (4.72)
DOD	0.285	0.45	0.63
kWh loss	0.278	0.402	0.44
Battery efficiency	0.936	0.913	0.907
Full equivalent cycles/year	356	562	786

2.7 Ricarica al capolinea e a 3 fermate

L'ultimo caso preso in considerazione è quello con una ricarica al capolinea e tre ricariche alla fermata. Una architettura del genere consente di avere ricariche a più alta potenza e con meno energia. La stazione di ricarica è come quella dei precedenti casi (in termini di potenza, ovvero 40 kW), con una energia trasferita che sarà inferiore; le tre ricariche saranno posizionate a distanze uguali e saranno a potenza massima, ovvero a 7C, con valori di potenza differenti al variare dell'energia a bordo, come nel caso precedente.

Il Gulliver così configurato verrà simulato come nel caso di ricarica al solo capolinea su un profilo di velocità e di carico passeggeri e verranno riportati i parametri che verranno utilizzati come input per le successive annualità del triennio di ricerca. Verrà valutata la capacità minima necessaria per il completamento del servizio senza interruzioni, la potenza e l'energia da ricaricare al capolinea e verrà valutata in via preliminare anche lo sforzo in termini di vita del sistema di accumulo da realizzare.

In Figura 33 si riporta l'andamento del consumo di energia del motore elettrico, del consumo totale (compresi gli ausiliari), dell'energia consumata in batteria e di quella ricaricata alle fermate e al capolinea

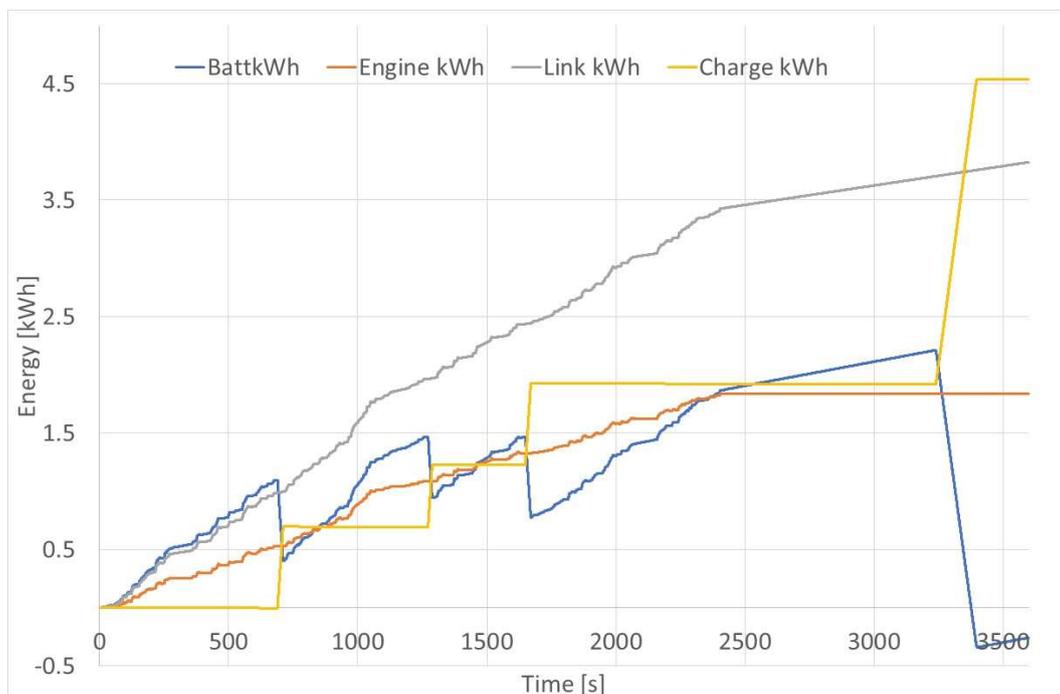


Figura 33 Energia consumata dal motore elettrico, totale (motore più ausiliari) e dalla batteria (12 kWh) per un sistema con ricarica al capolinea più 3 ricariche lungo il percorso

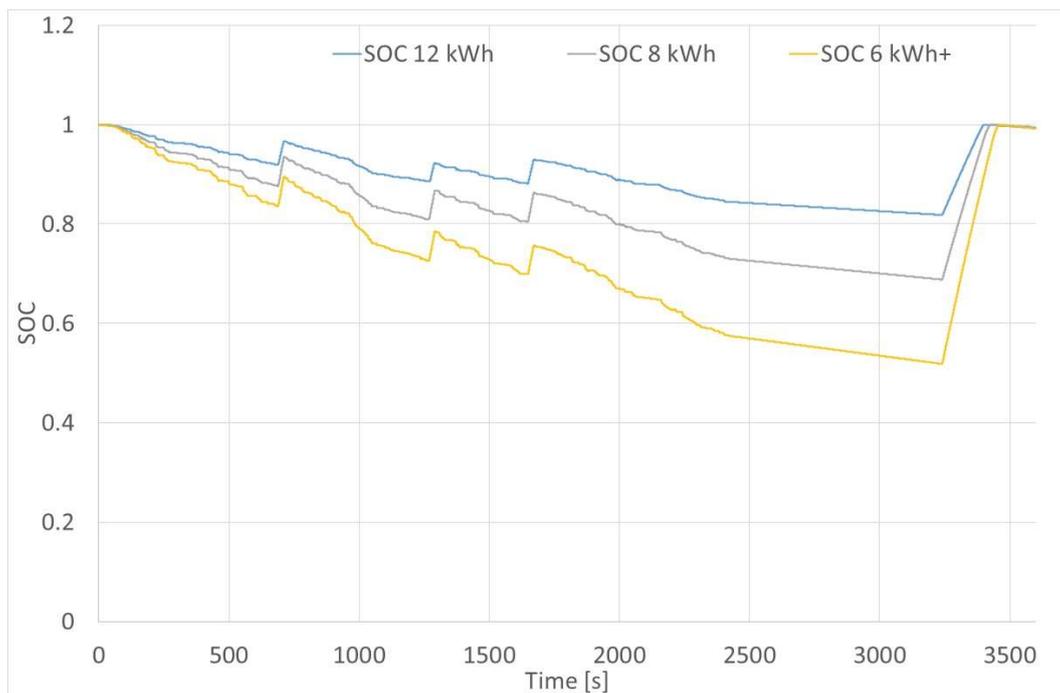


Figura 34 Andamento del SOC durante un giro della Linea 117 con ricarica al capolinea più 3 ricariche lungo il percorso per un accumulo da 12 kWh, 8 kWh e 6 kWh

In quest'ultimo caso, come anche nei precedenti, la potenza per la trazione e per gli ausiliari è sempre la stessa, varia soltanto la modalità di ricarica e la variazione dello stato di carica lungo il percorso come si nota anche in Figura 34. In quest'ultima figura si riporta lo stato di carica di 3 diverse tipologie di accumulo: 6,8 e 12 kWh. Con un numero crescente di ricariche lungo il percorso è ipotizzabile anche una riduzione dell'energia stoccabile a bordo: come contro altare si ottiene però che per accumuli più piccoli anche la potenza di ricarica è più piccola, in quanto funzione della capacità nominale della batteria. I diversi accumuli avranno quindi diverse profondità di scarica, tutti comunque in grado di eseguire il percorso con il pacco da 6 kWh che ha un grado di scarica di poco meno del 50%.

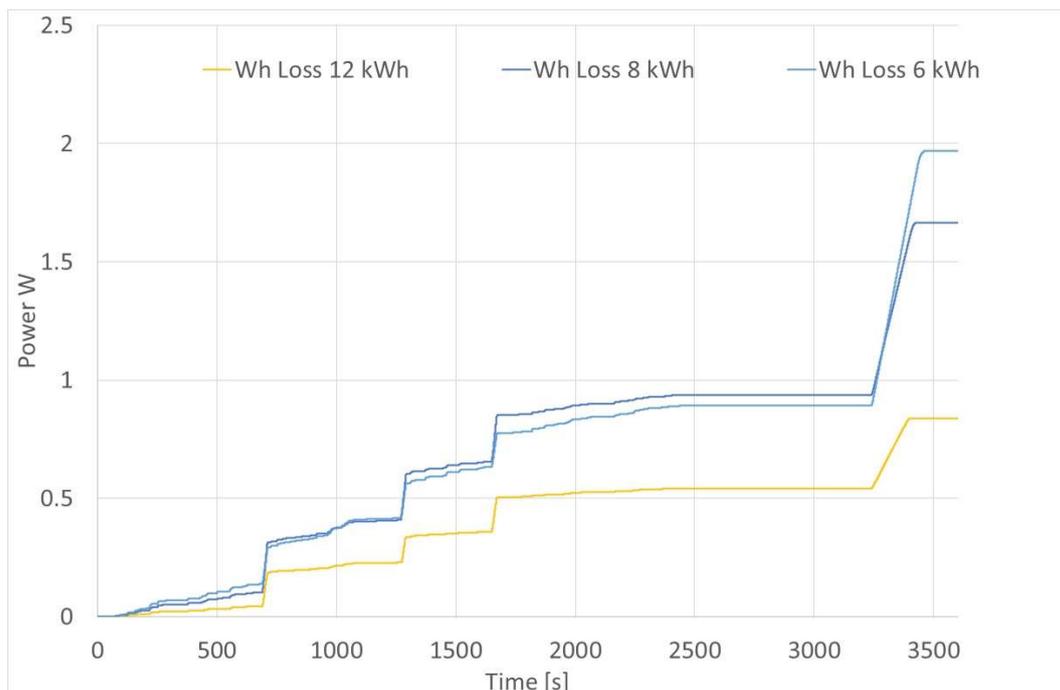


Figura 35 Andamento dell’energia perduta sulle resistenze interne della cella durante un giro della Linea 117 con ricarica al capolinea più 3 ricariche per un accumulo da 12,8,6 kWh

L’energia dissipata sulle resistenze interne è riportata in Figura 35: alla diminuzione del pacco batterie corrisponde un aumento dell’energia dissipata, ben visibile in tale figura.

Tabella 8 Riepilogo per un sistema di trasporto con ricarica al capolinea più 3 ricariche alla fermata

Battery Energy	12 kWh	8 kWh	6 kWh
Charge Current at Terminal	3.35	5C	6.67
Charge Current at Bus stop	7C	7C	7C
Charge kWh	0.46/3.14 4.523	0.31/3.38 4.63	0.23/4.006 4.696
DOD	0.18	0.29	0.48
kWh loss	0.311	0.4	0.438
Battery efficiency	0.931	0.913	0.906
Full equivalent cycles/year	674	1086	2396

In Tabella 8 si riportano tutti i dati aggregati di riepilogo dei 3 sistemi di accumulo per un sistema con ricarica al capolinea e a tre fermate. Si nota come lo stress in termini di corrente sia crescente per la ricarica al capolinea mentre alla fermata è lo stesso. L’energia ricaricata però è molto differente: per accumuli più grandi la potenza di ricarica al capolinea è maggiore quindi con una energia maggiore e conseguentemente una energia minore da trasferire al capolinea. Al diminuire della capacità l’energia immessa al capolinea diventa sempre più piccola e si passa da 0.46 kWh per ogni fermata con 12 kWh di batteria, a 0.31 per 8 kWh fino a 0.23 kWh per 6 kWh di batteria.

Il grado di scarica della batteria, l’energia perduta sulle resistenze interne e il numero equivalente di cicli/anno della batteria hanno un comportamento più che lineare con la dimensione dell’accumulo a bordo, mentre al contrario per pacchi batterie decrescenti la sua efficienza decresce.

3 Conclusioni

La prima annualità dell'attività di ricerca di sistema elettrico relativa allo sviluppo di sistemi di accumulo innovativi per la ricarica rapida a terra e a bordo dei sistemi di trasporto pubblico ha come obiettivo la realizzazione di un report propedeutico alle attività successive del secondo e del terzo anno.

L'obiettivo della attività è la sperimentazione di un sistema di trasporto pubblico a ricarica rapida con una stazione di ricarica equipaggiata con un accumulo a terra basato su volani. I vantaggi dell'accumulo sono quelli di una minore richiesta di potenza alla rete elettrica, mentre quelli dei volani sono una vita utile molto maggiore rispetto alle batterie al litio. Un sistema di trasporto di questo tipo avrà anche una batteria a bordo ad alta potenza specifica, a differenza di quelle al litio standard in quanto devono potersi ricaricare in pochi minuti al capolinea oppure anche per pochi secondi alle fermate. Il vantaggio dell'utilizzo di queste tecnologie è quello di ridurre drasticamente l'energia a bordo degli autobus con una conseguente riduzione dei costi e quello di limitare la richiesta di potenza alla rete elettrica, che può essere molto elevata ed intermittente nel caso di autobus.

La presente annualità, propedeutica alle successive due ha come output i dati di ingresso per il dimensionamento del pacco batterie a bordo del bus e della stazione di ricarica con l'accumulo inerziale che verranno progettati e realizzati nella seconda annualità.

Si è quindi definito

- un profilo di missione ed un autobus, ovvero la linea 117 dell'ATAC di Roma che viene effettuata con dei minibus Tecnobus Gulliver. Per il rilievo del ciclo di marcia sono state effettuate delle acquisizioni in linea con un rilevatore GPS, aggiungendo poi la conoscenza del numero delle corse effettuate in un giorno, il numero dei giorni della settimana della linea e quindi il numero annuo.
- Si sono definite le modifiche a tale corsa aggiungendo una stazione di ricarica al capolinea, con una potenza di 40 kW per circa 8 minuti, in grado di ricaricare completamente il bus dell'energia consumata lungo tutta la linea. Si sono testate anche altre configurazioni con 1 o 3 ricariche alla fermata per valutare i benefici in termini di riduzione della capacità della batteria a bordo del bus.
- Si è utilizzato un modello di simulazione di un veicolo/percorso/ricarica in modo da poter testare diverse possibili configurazioni di ricarica e di accumulo a bordo.
- Si è definito un nuovo sistema di accumulo ad alta potenza specifica per il minibus. Una ricarica al capolinea da 40 kW di picco con un pacco batterie sensibilmente ridotto rispetto a quello "originale" necessità di una riprogettazione del sistema di accumulo, che ha una tensione nominale aumentata e l'aggiunta di un convertitore per potersi collegare con l'azionamento esistente. Le dimensioni della batteria testate sono 12, 8 e 6 kWh in un sistema con ricarica al capolinea oppure con l'aggiunta di 1 o 3 ricariche alla fermata.

Una nuova linea così definita non ha più il limite kilometrico giornaliero che ha l'attuale bus, ovvero 6 corse per andare in deposito a ricaricarsi, ma può rimanere in esercizio per tutto il giorno, necessitando quindi di soltanto 4 bus per soddisfare tutta la linea invece che 8 come avviene adesso.

Definiti questi dati di ingresso, l'output delle simulazioni è il dimensionamento di massima della stazione di ricarica e del sistema di accumulo di bordo sulla base della tipologia di ricarica (al capolinea oppure in aggiunta con ricariche alla fermata).

- I consumi energetici di un minibus operante sulla linea presa in considerazione
- La stima dell'energia di ricarica al capolinea e alle fermate nei tempi usuali di sosta e di fermata, in funzione del valore della potenza di ricarica fissato all'interno dei limiti imposti dalle tecnologie di accumulo e di impianto adatte alla ricarica di tipo veloce ed ultraveloce
- La stima dei valori di energia a bordo nel corso dell'esercizio in funzione delle strategie di ricarica

In Tabella 9 si riportano i risultati di tutte le simulazioni effettuate con un Tecnobus Gulliver sulla linea 117 di Roma in configurazione esistente e con i nuovi sistemi di accumulo (a diverse capacità) con differenti tipologie di ricarica, al capolinea oppure capolinea con una o più ricariche alla fermata.

Tabella 9 riepilogo di tutte le caratteristiche dei minibus con ricarica al capolinea e con ricarica a una o più fermate.

	Ref.	(LTO)			(LTO)			(LTO)		
		Terminal			Terminal+ 1 Bus Stop			Terminal + 3 Bus Stops		
Battery Energy kWh	35.6	12	8	6	12	8	6	12	8	6
(C rate) Terminal	0.5	3.35	5	6.7	3.35	5	6.7	7	7	7
(C rate) Bus stop					7	7	7	7	7	7
Charge Power Terminal kW	18	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Charge Power bus-stop kW					83	55.5	42	83	55.5	42
Charge kWh total	25.57	4.45	4.56	4.65	4.52	4.65	4.72	4.523	4.63	4.696
Charge kWh bus stop					0.46	0.31	0.23	0.7	0.31	0.23
Charge kWh terminal	25.57	4.45	4.56	4.65	4.05	4.32	4.49	3.14	3.38	4.006
Consumption kWh/km	0.54	0.53	0.56	0.57	0.54	0.56	0.573	0.5	0.56	0.57
DOD	0.65	0.33	0.5	0.63	0.285	0.45	0.63	0.18	0.29	0.48
kWh loss	0.065	0.2	0.3	0.393	0.278	0.402	0.44	0.311	0.4	0.438
Battery eff	0.986	0.957	0.936	0.917	0.936	0.913	0.907	0.931	0.913	0.906
Full equivalent cycles/year	125	412	624	786	711	1123	1572	898	1447	2396

Con riferimento al sistema esistente, con un accumulo da 35.6 kWh in grado di svolgere la missione giornaliera e con ricarica lenta al deposito, tutte le configurazioni studiate nel presente report hanno una energia a bordo sensibilmente inferiore, passando dai 12 kWh fino a valori di 6 kWh. La potenza di ricarica passa da valori di alcuni kW (si ipotizza una ricarica a 0.5C ovvero 18 kW, ma può essere anche molto più bassa) a 40 kW per la ricarica al capolinea e anche a 83 kW per una ricarica alla fermata con un accumulo da 12 kWh. L'energia consumata e ricaricata in ogni percorso si assesta tra i 4.45 fino ai 4.7 kWh in funzione della capacità della batteria (a parità di potenza una batteria più piccola ha perdite sulle resistenze interne maggiori) e della potenza di ricarica (se presente alla fermata). Le perdite anche 'esse hanno lo stesso comportamento risultando inversamente proporzionali alla capacità della batteria e proporzionali alla potenza di ricarica, come anche l'efficienza e il numero di cicli equivalenti.

Per il proseguo del triennio di ricerca sarà necessario, fra le tante possibili configurazioni, scegliere un sistema di accumulo in grado di poter testare sia la ricarica al capolinea, sia quella alla fermata. Sebbene ci siano più accumuli in grado di poter svolgere entrambi, come dimostrativo si procederà alla realizzazione della architettura più conservativa, ovvero l'accumulo con 12 kWh.

In aggiunta, le batterie a così alta potenza specifica ad oggi sono di difficile reperimento e le correnti massime accettabili, per ragioni dovute anche alla vita utile delle stesse, vengono abbassate rispetto al valore di 10C riconosciuto come valore massimo per le celle al Titanato di Litio dove sono comunque necessari sistemi di raffreddamento particolarmente sofisticati. La ricarica al capolinea comunque rimane il test più significativo della sperimentazione e con un accumulo più grande sarà possibile quindi avere anche valori di potenza massima più elevati anche per la ricarica alla fermata.

Per quanto riguarda la vita del pacco batterie, un altro PTR si occuperà della stima della vita delle celle tra cui quelle al Titanato di Litio e sulla base di quei risultati sarà possibile uno studio più accurato della effettiva vita delle batterie simulate nel presente report, per cui tale studio non verrà approfondito ma rinviato a valle dei risultati dell'altra attività. Nel presente studio però si riportano alcuni indicatori responsabili dell'invecchiamento delle batterie, come ad esempio le correnti massime, il grado di scarica (DOD) e la potenza perduta nelle resistenze interne che può essere correlata sia con la corrente che con la temperatura, visto che tale potenza effettivamente la sorgente di calore delle batterie.

I dati di input per la seconda annualità pertanto sono per quanto riguarda il sistema di accumulo del minibus:

- Potenza in ricarica massima: 40kW

- Tensione nominale 300V, Tensione massima <400 V, tensione minima >200 V
- Energia ~12 kWh
- Corrente massima in ricarica al capolinea: 3.35C
- Convertitore per la connessione tra il sistema di accumulo e il chopper con tensione a monte tra i 200 e i 400V e tensione a valle tra i 72 e i 90V

Per la stazione di ricarica, si riportano le caratteristiche più importanti:

- Potenza in ricarica massima al capolinea: 40kW
- Tensione nominale 300V, Tensione massima <400 V, tensione minima >200 V
- Energia da ricaricare: 4.5-5 kWh
- Potenza massima richiesta alla rete: 21 kW (32 A)

Il dimensionamento dell'accumulo a terra con volano, di tutta l'elettronica di potenza e di controllo necessaria per ricaricare il minibus e per ricaricare il volano dopo che il bus si è allontanato saranno progettati e realizzati nella seconda annualità del progetto dall'università di Roma Tre, dovendo comunque soddisfare le caratteristiche di sopra riportate. Anche in questo caso, vista la scarsità di sistemi di accumulo con volani e il conseguente elevato costo per applicazioni prototipali, la priorità sarà realizzare un sistema di accumulo con volani e una stazione in grado di poter ricaricare un bus al capolinea.

4 Riferimenti bibliografici

- [1] Adriano Alessandrini, Fabio Cignini, Fernando Ortenzi, Giovanni Pedè, Daniele Stam, Advantages of retrofitting old electric buses and minibuses, Energy Procedia, Volume 126, September 2017, Pages 995-1002
- [2] Fernando Ortenzi, Silvia Orchi, Maria Pia Valentini, Natascia Andrenacci and Alessandro Lidozzi, Technical and economical evaluation of fast charging infrastructures for electric buses, AIP Conference Proceedings 2191, 020123 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5138856>
- [3] <https://www.nbabatterie.com/>
- [4] <https://www.tecnobus.it/>
- [5] <https://www.autobusweb.com/minibus-elettrici-atac-post-revamping-presentato-il-primo-prototipo/>
- [6] <http://www.energiestro.net/technology/>
- [7] Adriano Alessandrini, Fabio Cignini, Fernando Ortenzi, Giovanni Pedè, Daniele Stam, Advantages of retrofitting old electric buses and minibuses, Energy Procedia, Volume 126, 1 September 2017, Pages 995-1002, 72nd Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association, ATI 2017; Lecce; Italy; 6 September 2017 through 8 September 2017; Code 130812
- [8] F Ortenzi, G Pedè, P. Antonini Design of the Storage System of a High Performance Hybrid Vehicle, 12th International Conference on Engines and Vehicles, ICE 2015, SAE 2015-24-2544
- [9] Fernando Ortenzi, Luigi Anniballi, Pierluigi Antonini, Fabio Massimo Frattale Mascioli, High specific power batteries for racing applications: the HI-ZEV vehicles, Energia, ambiente e innovazione, 2/2017
- [10] Ortenzi, F., Genovese, A., Carrazza, M., Rispoli, F. et al., "Exhaust Energy Recovery with Variable Geometry Turbine to Reduce Fuel Consumption for Microcars," SAE Technical Paper 2018-01-1825, 2018, <https://doi.org/10.4271/2018-01-1825>
- [11] A Alessandrini, F Filippi, F Orecchini, F Ortenzi, A new method for collecting vehicle behaviour in daily use for energy and environmental analysis, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, Volume: 220 issue: 11, page(s): 1527-1537, Issue published: November 1, 2006
- [12] Stroe, A.-I.; Meng, J.; Stroe, D.-I.; Świerczyński, M.; Teodorescu, R.; Kær, S.K. Influence of Battery Parametric Uncertainties on the State-of-Charge Estimation of Lithium Titanate Oxide-Based Batteries. Energies 2018, 11, 795..

- [13] Nuno FARIA, Paulo PEREIRINHA, EMR of an electric vehicle, Summer School EMR'15 Energetic Macroscopic Representation
- [14] A. Alessandrini et al., "A Flash Charge System for Urban Transport," 2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Genova, Italy, 2019, pp. 1-6.doi: 10.1109/EEEIC.2019.8783867
- [15] Alessandrini A. et al. (2019) Design of a Hybrid Storage for Road Public Transportation Systems. In: Carbone G., Gasparetto A. (eds) Advances in Italian Mechanism Science. IFToMM ITALY 2018. Mechanisms and Machine Science, vol 68. Springer, Cham
- [16] Ortenzi, F.; Pasquali, M.; Prosini, P.P.; Lidozzi, A.; Di Benedetto, M. Design and Validation of Ultra-Fast Charging Infrastructures Based on Supercapacitors for Urban Public Transportation Applications. *Energies* 2019, 12, 2348.
- [17] A. Stroe, D. Stroe, V. Knap, M. Swierczynski and R. Teodorescu, "Accelerated Lifetime Testing of High Power Lithium Titanate Oxide Batteries," 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Portland, OR, 2018, pp. 3857-3863.