



## Ricerca di Sistema elettrico

Attività ENEA per il conseguimento  
dell'Obiettivo a. Strumenti per il TPL  
Campagna di misura dei consumi  
energetici di autobus elettrici  
Analisi economica di accumuli stazionari per la  
ricarica rapida e ultrarapida di bus urbani

N. Andrenacci, V. Conti, A. Genovese, G. Giuli, M. Mancini,  
S. Orchi, M. Pasquali, F. Ortenzi, M. P. Valentini

STRUMENTI PER IL TPL. CAMPAGNA DI MISURA DEI CONSUMI ENERGETICI DI AUTOBUS ELETTRICI  
ANALISI ECONOMICA DI ACCUMULI STAZIONARI PER LA RICARICA RAPIDA E ULTRARAPIDA DI BUS URBANI

N. Andrenacci, V. Conti, A. Genovese, G. Giuli, M. Mancini, S. Orchi, M. Pasquali, F. Ortenzi, M. P. Valentini  
(ENEA)

Dicembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2018

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici ed interazione con gli altri vettori energetici

Progetto: Mobilità elettrica sostenibile

Obiettivo: Strumenti per il TPL

Responsabile del Progetto: Maria Pia Valentini - ENEA

RINGRAZIAMENTI

Molti dei contenuti del presente report sono stati resi possibili dalla fattiva collaborazione dell'Associazione delle Aziende di Trasporto ASSTRA e dell'Aziende ad essa associate che hanno aderito alla Campagna di misure sul campo dei consumi energetici di veicoli ad alimentazione elettrica. Gli autori del report esprimono tutta la loro gratitudine ad ASSTRA ed alle suddette Aziende ed in particolare all'ing. Daniela Carbone (ASSTRA), all'ing. Nadia Amitrano (ASSTRA), all'ing. Paride Gasparini (CTM), all'ing. Andrea Marongiu (CTM), all'ing. Francesco Caredda (CTM), All'ing. Paolo Rapinesi (ATB), all'ing. Marco Zanini (GTT).

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 CAMPAGNA DI MISURA DEI CONSUMI DI AUTOBUS ELETTRICI SU STRADA .....	5
1.1 IL PROTOCOLLO D’INTESA ASSTRA – ENEA PER LA REALIZZAZIONE DELLA CAMPAGNA.....	5
1.2 I DATI DELLA CTM DI CAGLIARI .....	7
1.2.1 Interpretazione delle grandezze fornite .....	10
1.2.2 Analisi dei consumi giornalieri e di corsa mediante l’impiego delle grandezze energetiche calcolate dal computer di bordo.....	15
1.2.3 Analisi dei consumi di corsa mediante l’impiego delle misure di potenza meccanica ed elettrica .....	20
1.2.4 Riorganizzazione ed analisi dei dati per tratta da fermata a fermata.....	23
1.2.5 Estrapolazione delle curve di consumo specifico a partire da quelle sperimentali .....	25
1.3 OSSERVAZIONI CONCLUSIVE.....	28
2 CONFRONTO DI ALCUNE TECNOLOGIE PER ACCUMULO STAZIONARIO PER SISTEMI DI RICARICA FLASH.....	29
2.1 INTRODUZIONE .....	29
2.2 ASPETTI TECNICI DI ALCUNE TECNOLOGIE DI ACCUMULO .....	30
2.2.1 Test preliminari su celle NMC- LTO .....	35
2.3 ASPETTI DI MERCATO DELLE TECNOLOGIE DI ACCUMULO ESAMINATE.....	39
2.4 ANALISI ECONOMICA INTEGRAZIONE DELLA RICARICA AL CAPOLINEA E ALLE FERMATE CON DIVERSI SISTEMI DI ACCUMULO STAZIONARI .....	43
3 CONCLUSIONI.....	48
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	49

## Sommario

Nel presente report sono illustrate le attività svolte da personale ENEA ai fini del conseguimento dell'Obiettivo di Ricerca a. Strumenti per il TPL.

Le attività hanno riguardato specificatamente i seguenti argomenti:

- Campagna di misura sul campo dei consumi di veicoli elettrici per il Trasporto Pubblico Locale
- Valutazioni economiche dell'impiego di accumuli stazionari per la ricarica rapida ed ultrarapida dei autobus elettrici urbani.

Il report è organizzato di conseguenza in due capitoli.

## 1 Campagna di misura dei consumi di autobus elettrici su strada

### 1.1 Il Protocollo d'Intesa ASSTRA – ENEA per la realizzazione della campagna

ASSTRA - Associazione Trasporti - è l'associazione datoriale, nazionale, delle aziende di trasporto pubblico locale in Italia, sia di proprietà degli enti locali che private. Nasce nel 2001 dalla fusione delle due associazioni di categoria Federtrasporti (federazione delle aziende municipalizzate) e Fenit (federazione delle ferrovie concesse). Entrambe le associazioni esistevano da più di 80 anni.

Aderiscono ad ASSTRA le aziende del trasporto urbano ed extraurbano, esercenti servizi con autobus, filobus, tram, metropolitane, impianti a fune, tutte le ferrovie locali (non appartenenti a Trenitalia S.p.A) nonché le imprese di navigazione lagunare e lacuale.

ASSTRA rappresenta le esigenze e gli interessi degli operatori del trasporto pubblico nelle adeguate sedi istituzionali, nazionali ed internazionali ed è controparte sociale nella contrattazione del Contratto Collettivo Nazionale di lavoro della categoria. Nello specifico, il ruolo chiave dell'Associazione è quello di rappresentare i suoi membri nella conclusione di contratti nazionali di lavoro ed assisterli e/o rappresentarli nella stipula di accordi aziendali e nelle vertenze locali di lavoro.

ASSTRA svolge a livello internazionale e nazionale, presso istituzioni e opinione pubblica, azioni di sostegno a favore della mobilità collettiva e sostenibile promuovendo e sostenendo lo sviluppo del settore e delle imprese ad essa associate.

L'attività trova la sua naturale esplicazione anche nei riguardi dei Ministeri competenti (Ambiente, Infrastrutture e dei Trasporti, Welfare, Sviluppo Economico, ecc.), delle Autorità specie per quanto riguarda tematiche che possono comportare incidenze economiche e/o giuridiche nel settore rappresentato.

ASSTRA, inoltre, interviene durante la costituzione della normativa nazionale e comunitaria (leggi, decreti, disegni, direttive) che coinvolge il sistema di trasporto pubblico. A tal fine segue attivamente tutte le attività parlamentari e comunitarie con la presentazione di emendamenti e proposte.

Considerato l'interesse di ASSTRA e dei propri associati ai temi relativi alle nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile e tenuto conto della competenza di ENEA e la sua sinergia con Amministrazioni pubbliche centrali e periferiche, Enti locali, Organi costituzionali, Istituti di ricerca internazionali, si è convenuto di avviare una campagna di misurazione dei consumi degli autobus adibiti al trasporto pubblico locale in grado di alimentare correttamente la catena modellistica messa a punto da ENEA e dalle Università cobeneficarie (UNIVAQ, Roma Tre e Tor Vergata) nel triennio di ricerca 2015-2017 per la valutazione di fattibilità tecnico-economica dell'elettrificazione delle linee di trasporto pubblico locale.

Allo scopo, è stato predisposto un Protocollo di misurazioni (vedi Allegato), finalizzato all'inizio del mese di Ottobre 2018, il cui obiettivo era di definire le modalità operative dell'acquisizione di dati sul consumo su strada di autobus a trazione elettrica in diverse condizioni reali di esercizio.

I dati raccolti sono finalizzati ad un duplice scopo:

- validare il modello di stima dei consumi di tipo "white box" che prevede in input il profilo di missione dettagliato del veicolo e informazioni relative alle caratteristiche del veicolo e del sistema di trazione
- estrapolare su base statistica delle curve di consumo specifico in funzione della velocità media di tratta, per consentire una stima più grossolana ma molto semplificata dei consumi attraverso i dati desumibili dal programma di esercizio reperibile in formato GTFS sui siti Aziendali, secondo le prescrizioni della normativa sugli "Open data".

In funzione di ciò si è previsto di raccogliere preliminarmente le informazioni relative:

- alla missione del veicolo, con indicazione del percorso e delle sue caratteristiche plano-altimetriche, la localizzazione georeferenziata delle singole fermate, il programma di esercizio completo;
- alle caratteristiche tecniche dei veicoli, come meglio specificato nel seguito

- alla modalità di acquisizione dei dati relativi al consumo energetico (o ai parametri ad esso correlati).

Dati richiesti relativi al veicolo:

- comportamento telaistico del veicolo;
- peso a vuoto;
- rapporto finale di trasmissione;
- coefficienti di resistenza e di rotolamento;
- area frontale;
- carico pagante massimo;
- soglie impostate sullo stato di carica (SOC) del sistema di accumulo elettrico (ESS);
- curve di efficienza di tutte le macchine elettriche e dei convertitori per la trazione, sia in esercizio diretto, che in esercizio inverso;
- caratteristiche dei sistemi di accumulo elettrico (chimismo, tensione nominale, capacità nominale, energia nominale max C rate carica/scarica).

Per la rilevazione del profilo cinematico e del contestuale assorbimento energetico è stata richiesta la misura delle seguenti grandezze (valide per un veicolo elettrico a batteria) fuori servizio (su un percorso il più possibile in piano ed in assenza di carico pagante).

Parametro	unità di misura	modalità di acquisizione	frequenza minima di acquisizione
Tempo orologio o tempo progressivo	h:m:ss	OBD/GPS	1-2 Hz
Velocità	m/s o km/h	OBD	1-2 Hz
Latitudine, Longitudine	Coordinate geografiche	GPS	1-2 Hz da GPS
Altitudine	m s.l.m.	GPS/GIS/profilo altimetrico	1-2 Hz da GPS Da punto a punto di misura da GIS/profilo altimetrico
Distanza da rilevazione precedente (se disponibile)	m	OBD/GIS/planimetria percorso	1-2 Hz da OBD Da fermata a fermata da GIS/planimetria percorso
Tensione batteria	V	OBD	1-2 Hz
Corrente batteria	A	OBD	1-2 Hz
Potenza Batteria	kW o W	OBD	1-2 Hz
SOC batteria	%	OBD	1-2 Hz
Temperatura batteria (se disponibile)	°C	OBD	1-2 Hz
Potenza motore	kW o W	OBD	1-2 Hz
Coppia motore	Nm	OBD	1-2 Hz
Velocità motore	Rpm	OBD	1-2 Hz
Accensione sistema riscaldamento	0/1	OBD/autista	1-2 Hz *Per tratta da fermata a fermata
Accensione sistema riscaldamento	0/1	OBD/autista	1-2 Hz *Per tratta da fermata a fermata
*L'accensione dovrebbe essere mantenuta invariata nel percorso fra due fermate consecutive e modificata solo all'atto della ripartenza dalla fermata			

Ove non fossero stati disponibili i dati da OBD, o se la frequenza di campionamento non fosse stata adeguata agli scopi della campagna di misura, ENEA avrebbe provveduto ad opportuna strumentazione del veicolo.

Altre misure di analoga natura si sarebbero dovute eseguire in condizioni di esercizio reale, identificando i tempi di sosta e di fermata per ragioni di servizio e distinguendoli da quelli per cause diverse (congestione, semafori, ....) e verificando il reale utilizzo dei sistemi di condizionamento di bordo nei diversi periodi

stagionali e le reali fluttuazioni di carico pagante nell'arco delle diverse giornate tipiche dell'anno, assunte a riferimento dal modello di analisi di fattibilità, correlandoli all'assorbimento energetico contestualmente rilevato.

Inizialmente era previsto che la campagna si svolgesse presso tre Aziende nel periodo luglio 2018/dicembre 2018, effettuando per ciascuna Azienda quattro giornate di campionamento, 1 per le condizioni standard fuori servizio e 3 per le condizioni di servizio effettivo.

La prima Azienda avrebbe messo a disposizione tre filobus da 12 m, di cui due "gemelli" ed un terzo di caratteristiche differenti, ma tutti con possibilità di marcia autonoma in batteria; la seconda un autobus elettrico da 12 metri; la terza un autobus elettrico da 7 metri ed 1 autobus elettrico da 12 metri.

Purtroppo non tutte le rilevazioni previste nel Protocollo sono state possibili, così come peraltro era previsto che potesse accadere nello stesso Protocollo .

Tuttavia sono stati acquisiti numerosi dati di misura che hanno consentito ugualmente la validazione del modello di simulazione dei consumi (per la quale sono stati utilizzati anche dati provenienti da Aziende non aderenti al Protocollo con ASSTRA) e alcune analisi statistiche interessanti, come descritto nel seguito del capitolo.

Questa trattazione riporta solo le analisi statistiche relative a due filobus con possibilità di marcia autonoma monitorati dalla CTM di Cagliari. Altri dati acquisiti all'interno del Protocollo ENEA-ASSTRA sono trattati nei report RdS/PAR 2017/233 e RdS/PAR 2018/127 prodotti da UNIVAQ in relazione alla calibrazione ed alla validazione del modello di simulazione dei consumi; in particolare UNIVAQ ha utilizzato i dati di misura dei tre filobus di Cagliari e di un bus elettrico da 12 m della ATB di Bergamo, oltre ad altri dati provenienti da altre Aziende di TPL non aderenti al Protocollo ASSTRA – ENEA.

## *1.2 I dati della CTM di Cagliari*

La prima delle Aziende aderenti all'iniziativa di misurazione è la CTM di Cagliari, con la quale si è potuto procedere ad alcune acquisizioni già prima della formalizzazione definitiva del Protocollo messo a punto con ASSTRA, approfittando della stagione estiva in corso (2018), durante la quale i filobus da monitorare effettuano sulla linea 5 un servizio prolungato sino ai lidi di Cagliari utilizzando la modalità della marcia in batteria per diversi chilometri dallo sgancio dal bifilare; tale prolungamento cessa verso la metà di settembre, motivo per il quale si è reso indispensabile anticipare i tempi rispetto alla formalizzazione definitiva del Protocollo con ASSTRA.

La seguente figura mostra il percorso della linea nella configurazione estiva, che comprende una tratta in contesto prettamente urbano ed una tratta in ambito periurbano: la marcia autonoma in batteria si verifica in questa seconda tratta, sulla litoranea, a partire da poco prima della curva a gomito evidente nella figura.

Nella successiva figura si legge il profilo altimetrico della linea e da esso si verifica che la percorrenza totale è di circa 26 km sul giro completo, dei quali circa 9 sono percorsi continuativamente in batteria, con un'incidenza del 35% in termini chilometrici (si verifica sui dati di misura che la tratta in batteria intermedia non sussiste più). Al capolinea di Poetto, dove la linea si atterra nel percorso di andata, viene effettuata una ricarica da bifilare per il tempo di sosta di servizio previsto, con la quale la batteria recupera tutta o parte dell'energia spesa dal distacco dal bifilare; lungo il percorso di ritorno la batteria viene nuovamente ricaricata dal momento del riaggancio del veicolo al bifilare e sino ad un 100% della propria capacità energetica.

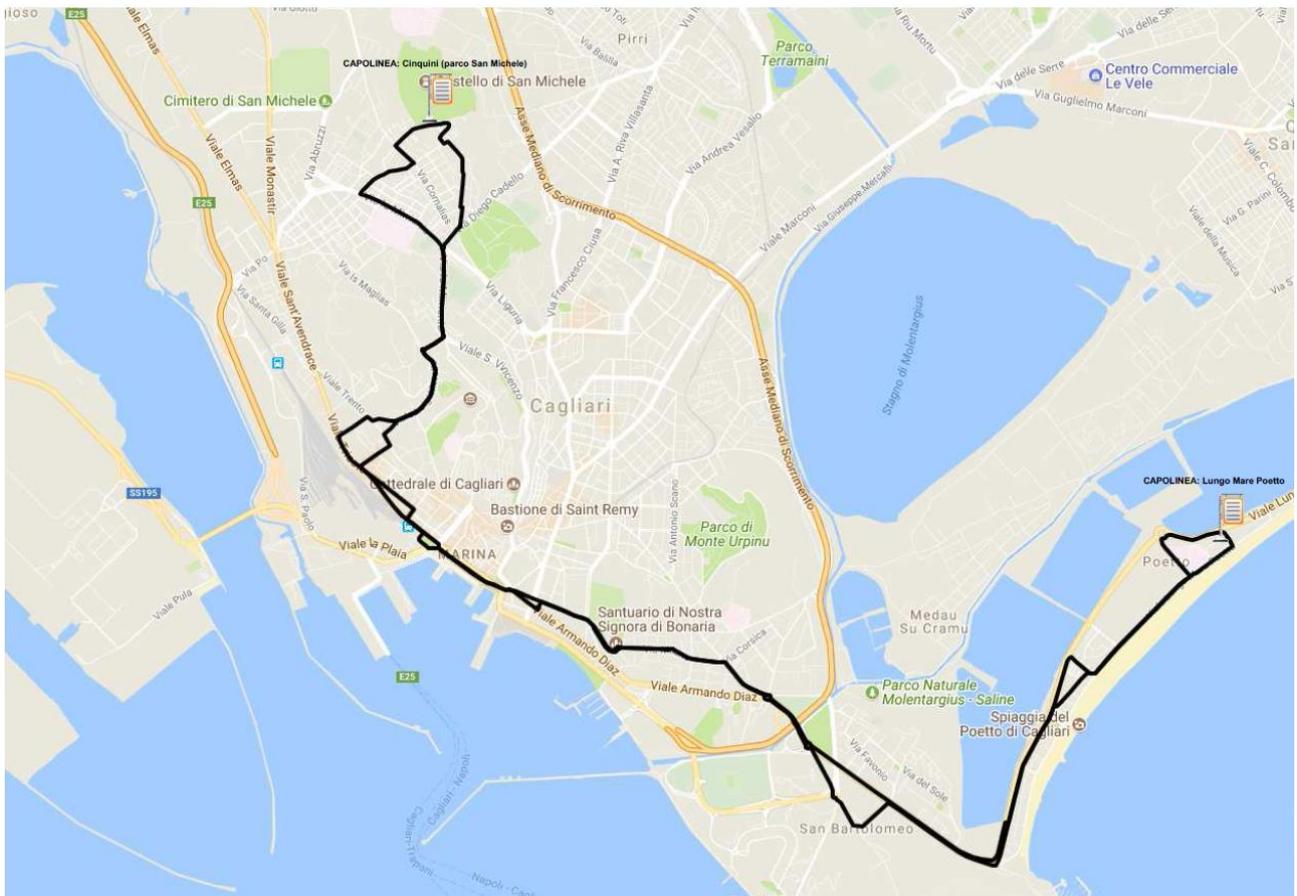


Figura 1: Il percorso estivo della linea 5 della CTM di Cagliari



Figura 2: Profilo altimetrico dalla linea monitorata presso la CTM di Cagliari

Il monitoraggio dei veicoli 1 e 2 è avvenuto attraverso l'acquisizione dei dati forniti dal computer di bordo. In particolare sono state acquisite le seguenti grandezze:

**Tabella 1: Grandezze misurate sui mezzi 1 e 2 della CTM di Cagliari**

<b>Input Voltage [V]</b>	V	Misurato dal trasduttore di tensione A100-A11 all'ingresso dalla catenaria, prima dell'interruttore F1	1
<b>Input Current [A]</b>	A	Misurato dal driver IGBT degli Skiip di recupero A100-A26 e A100-A27	2
<b>Electric Motor Speed [rpm]</b>	rpm	Misurato dal lettore di velocità ad induzione tramite la ruota dentata (256 denti) sull'asse del motore di trazione.	3
<b>Electric Motor Torque [Nm]</b>	Nm	Calcolato dal comando e controllo del comando principale A100-A1, in base ai giri ed alla potenza erogata del motore di trazione.	4
<b>Electric Motor Temp Power [kW]</b>	kW	Misurato dal comando e controllo del comando principale A100-A1 dalla tensione in ingresso del inverter di trazione (misurato dal trasduttore A100-A12) e dalla corrente dell'inverter di trazione (misurato dai driver degli Skiip di potenza A100-A21 ... A100-A23)	5
<b>Input Voltage Tract. Conv. [V]</b>	V	Misurato dal trasduttore di tensione A100-A12 del circuito di semipotenziale	6
<b>Overall Energy consumed [kWh]</b>	kWh	Calcolato dal computer di bordo A51 dai valori della tensione e della corrente in ingresso (integrazione nel tempo), vedi valori Input Voltage e Input Current	7
<b>Overall Energy returned [kWh]</b>	kWh	Calcolato dal computer di bordo A51 dai valori della tensione e della corrente in ingresso (integrazione nel tempo), vedi valori Input Voltage e Input Current	8
<b>Energy consumed from Tract. Batt [kWh]</b>	kWh	Calcolato dal computer di bordo A51 dai valori della tensione e della corrente della batteria di trazione (integrazione nel tempo). La tensione misurata dall' A100-A13, la corrente dal driver IGBT dell'inverter batteria A100-A28	9
<b>Energy returned to Tract. Batt [kWh]</b>	kWh	Calcolato dal computer di bordo A51 dai valori della tensione e della corrente della batteria di trazione (integrazione nel tempo). La tensione misurata dall' A100-A13, la corrente dal driver IGBT dell'inverter batteria A100-A28	10

Purtroppo le grandezze energetiche calcolate dal computer di bordo sono approssimate al kWh, il che rende più difficoltosa l'analisi energetica per tratta, che rappresenta invece uno degli obiettivi della campagna di misura. Per ovviare a questa approssimazione si rende necessario effettuare un'interpolazione dei dati forniti dal computer di bordo, tenendo in considerazione i vincoli imposti dai diversi regimi di alimentazione seguiti dal veicolo.

Il monitoraggio del terzo veicolo è avvenuto attraverso installazione di un sistema di acquisizione dati dal CANbus da parte di ENEA. Sono stati acquisiti le seguenti grandezze:

**Tabella 2: Grandezze misurate sul mezzo 3 della CTM di Cagliari**

Grandezza	UdM
Date	gg:mm:aaaa
Time	hh:mm:ss
BAT_SOC	%
BAT_V	V
BAT_I	A
VSpeed	km/h
VSpeedHRES	Km/h high resol.
MTorque	Nm
Line_V	V
Line_I	A
Converter_V	V
Converter_I	A
Brake_kWh	kWh
Line_Conn_flag	0/1
Batt_Conn_flag	0/1
Aux_B_IN_I	A
Aux_KG_IN_I	A
AC_kW	kW
Start	0/1

L’acquisizione durante il servizio ha riguardato diverse giornate dell’estate 2018, dal 3 agosto al 16 settembre, con qualche interruzione; in due di tali giornate, sul veicolo 1 e sul veicolo 3 rispettivamente, è stato misurato il carico dei passeggeri tratta per tratta. Inoltre sugli stessi due veicoli, di diversa marca, ad ottobre è stata effettuata un’acquisizione fuori servizio volta a verificare l’incidenza dell’assorbimento degli ausiliari e a tenere sotto controllo alcune variabili importanti nella determinazione dei consumi veicolari come carico e pendenza.

### 1.2.1 Interpretazione delle grandezze fornite

L’attività dei ricercatori ENEA si è concentrata soprattutto sull’analisi dei dati provenienti dai veicoli 1 e 2 , lasciando all’Università dell’Aquila il compito di analizzare i dati completi forniti dalla CTM di Cagliari (vedi Report RdS/PAR 2017/233 e RdS/PAR 2018/127).

Come primo passo dell’analisi si è ritenuto opportuno consolidare l’interpretazione delle grandezze energetiche fornite in input per i veicoli 1 e 2 e cioè:

- A = Overall Energy Consumed
- B = Energy Consumed From Traction Battery
- C = Overall Energy Returned
- D = Energy returned to Traction Battery

Inoltre si è voluto comprendere la relazione fra tali valori di energia calcolati dal computer di bordo e i valori di tensione e corrente in ingresso al sistema motore + batteria di trazione (Input Voltage e Input Current) che, opportunamente integrati nel tempo, possono fornire altri utili valori energetici.

Sono state perciò definite due ulteriori grandezze energetiche calcolate dai valori di tensione (Input Voltage - V) e corrente (Input Current - I) denominate:

- (VI)+ = valore energia in ingresso a motore+batteria quando la corrente è positiva (assorbimento)
- (VI)- = valore energia in ingresso alla linea di alimentazione elettrica quando la corrente è negativa (recupero)

Dall'analisi dei dati si osserva che il valore di tensione intorno a 600 V indica la marcia in batteria, per qualsiasi valore di corrente I. Questa osservazione è estremamente utile per poter ulteriormente distinguere fra fasi di marcia autonoma e fasi di marcia in bifilare.

Sono state graficate le grandezze energetiche fornite o stimate per il veicolo 1 nella giornata del 16 settembre (da cui sono state escluse le fasi di trasferimento a/dal deposito e quelle di ricarica iniziale della batteria al capolinea di inizio servizio, in modo che il SOC iniziale e finale fosse pari al 100%); nei grafici è riportato anche l'andamento del SOC (incrementato di un opportuno fattore per renderlo visibile graficamente), che dà un'indicazione della fase di alimentazione in cui trova il veicolo.

Per esigenze di esposizione indaghiamo innanzitutto il significato di B, definita come energia consumata dalla batteria.

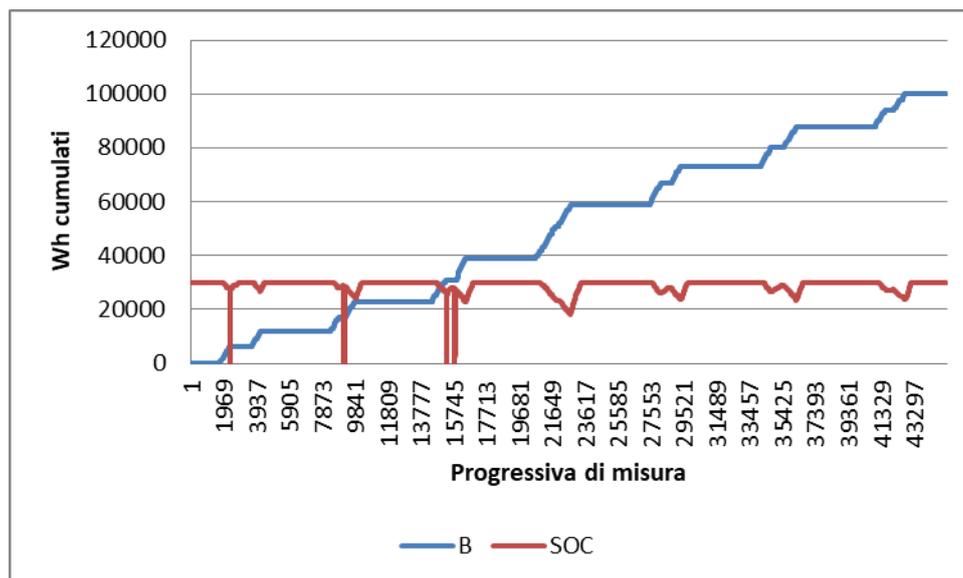


Figura 3: Andamento della grandezza B

Si verifica dal grafico soprastante relativo alla giornata del 16 settembre per il veicolo 1 che B rappresenta l'energia trasferita dalla batteria al motore di trazione durante la marcia in batteria. Infatti, B cresce velocemente durante la marcia in batteria (SOC decrescente), rimane costante durante la marcia sotto catenaria (SOC prima crescente per ricarica batteria e poi costante)

Per la giornata del 16 settembre nel periodo considerato B = 100 kWh,

Dividendo B per la somma dei km durante la marcia autonoma si ottiene il consumo specifico medio durante la marcia autonoma, a meno del rendimento di batteria e dei recuperi energetici.

Passiamo ora a verificare il significato di A, che viene definita come Energia complessiva consumata.

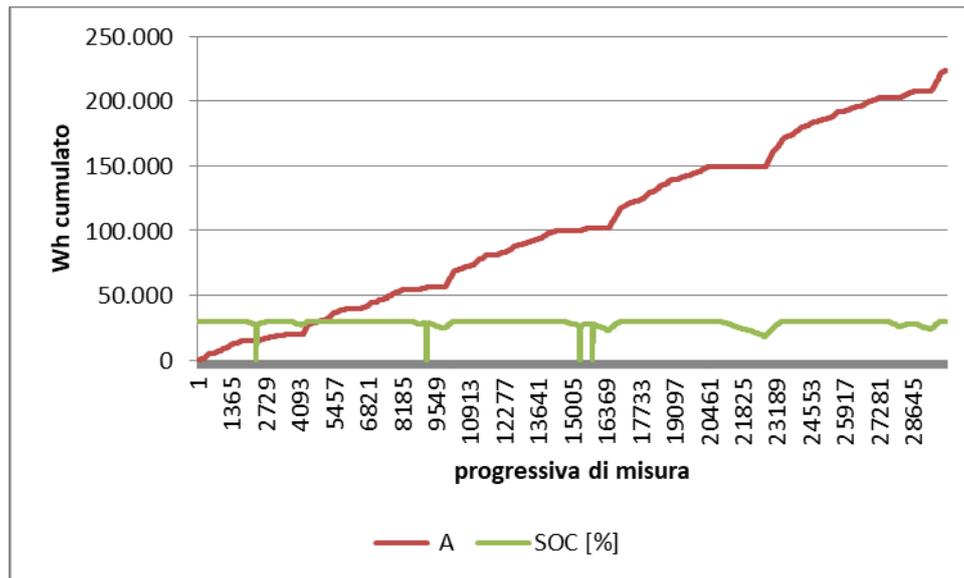


Figura 4: Andamento della grandezza A a confronto con l'energia assorbita calcolata dai valori di tensione e corrente

Con tutta evidenza, A rappresenta l'energia prelevata da rete che va direttamente al motore o in batteria. Infatti è costante durante la fase di scarica della batteria (marcia autonoma) e cresce rapidamente non appena il veicolo si riconnette alla rete perché in quei tratti al consumo per trazione si somma il consumo per ricarica della batteria.

Nelle tratte in cui SOC = 100 e A crescente, A rappresenta il consumo effettivo per trazione del veicolo durante la marcia in linea (a meno dei recuperi). A cumulato rappresenta il consumo lordo del veicolo (alimentazione diretta del veicolo e ricarica della batteria); nella giornata del 16 settembre nel periodo considerato è pari a 338 kWh

Verifichiamo ora la corrispondenza fra i valori di energia "attiva" (A e B) calcolati dal computer di bordo e quelli che è possibile calcolare direttamente utilizzando i valori di tensione e corrente, che presentano il vantaggio di essere approssimati al wh piuttosto che al kWh.

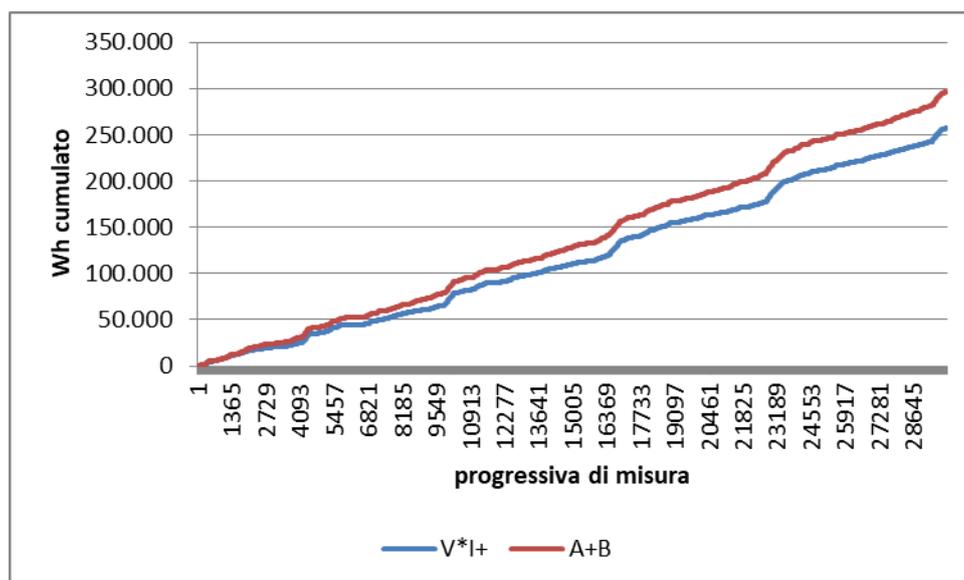


Figura 5: Confronto fra i valori di consumo calcolati dai valori di tensione e corrente originari e quelli forniti dal computer di bordo

Come andamento, il valore di energia consumata calcolato da tensione e corrente positiva ( $V \cdot I$ )<sup>+</sup> segue bene quello della somma dei termini A e B ma si verifica numericamente che il valore di  $(VI)^+$  cumulato a fine giornata è sensibilmente minore della somma dei termini A e B.

Dopo approfondita analisi di più casi, questa discrepanza è stata attribuita alle due cause di seguito specificate:

- Il valore della tensione di linea durante la marcia in batteria è riportato sempre intorno a 600 V, laddove la tensione nominale dichiarata è di 750 V;
- I valori di V ed I sono forniti troncati all'unità di misura (8V e 8A rispettivamente)<sup>1</sup>.

Per verificare le ipotesi suddette, è stato confrontato l'andamento della grandezza B con quello della grandezza  $(VI)^+$  durante la marcia in batteria, avendo apportato le correzioni sui valori di tensione e di corrente; la verifica ha dimostrato la sostanziale correttezza delle ipotesi sulle motivazioni delle discrepanze nei dati, ragion per cui nel corso delle successive analisi sono stati utilizzati valori di V ed I maggiorati per tener conto del troncamento e della tensione nominale dichiarata durante la marcia in batteria. Più specificatamente nel calcolo dei valori puntuali di potenza, durante la marcia in batteria il valore di tensione è stato considerato pari a 750 V e lungo l'intero percorso i valori di tensione e di corrente sono stati maggiorati ciascuno di 4 unità. Queste correzioni hanno riguardato anche il calcolo dell'energia di recupero (per valori negativi di corrente).

Passando ad esaminare le altre due grandezze energetiche restituite dal computer di bordo, ossia C e D, si verifica che la seconda delle due, definita come Energia in ingresso alla batteria, include l'energia incamerata dalla batteria, sia per recupero in frenata durante la marcia autonoma sia per ricarica dalla rete elettrica durante la marcia in bifilare.

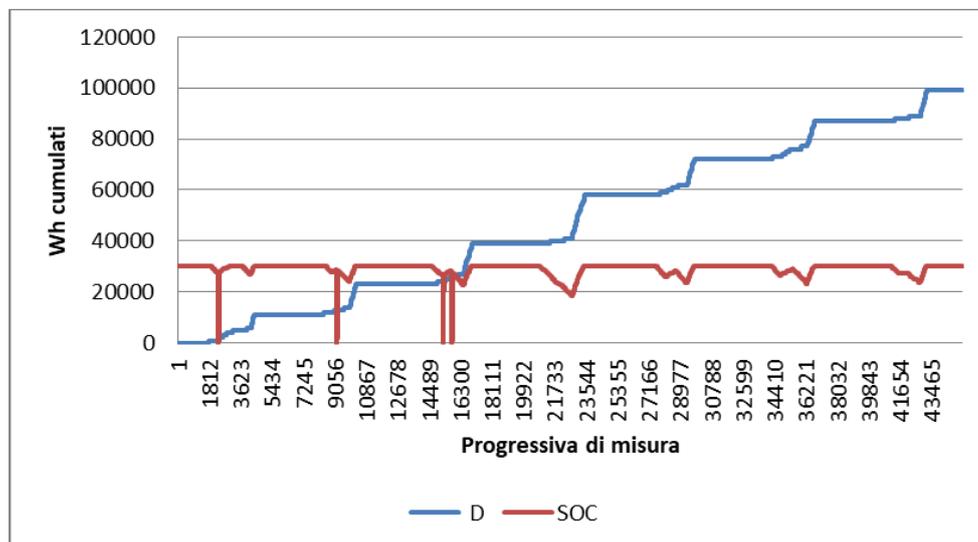


Figura 6: Andamento della grandezza D

Infatti, secondo l'andamento nella giornata del 16 settembre per il Veicolo 1 mostrato nel grafico precedente, D cresce lentamente durante la marcia autonoma in batteria per il recupero di frenata dal motore, rampa velocemente dal momento della connessione in rete sino a che il SOC = 100% per effetto della ricarica della

<sup>1</sup> Entrambi le grandezze sono misurate con una definizione di 8 unità (rispettivamente 8 V e 8 A) ma il valore di misura viene fornito troncato all'unità di misura e, di conseguenza, con un'approssimazione per difetto mediamente di 4 unità.

batteria da rete, rimane costante da SOC = 100% sino alla disconnessione dalla rete. La maggior parte di D è dato dalla ricarica da rete piuttosto che dal recupero di frenatura.

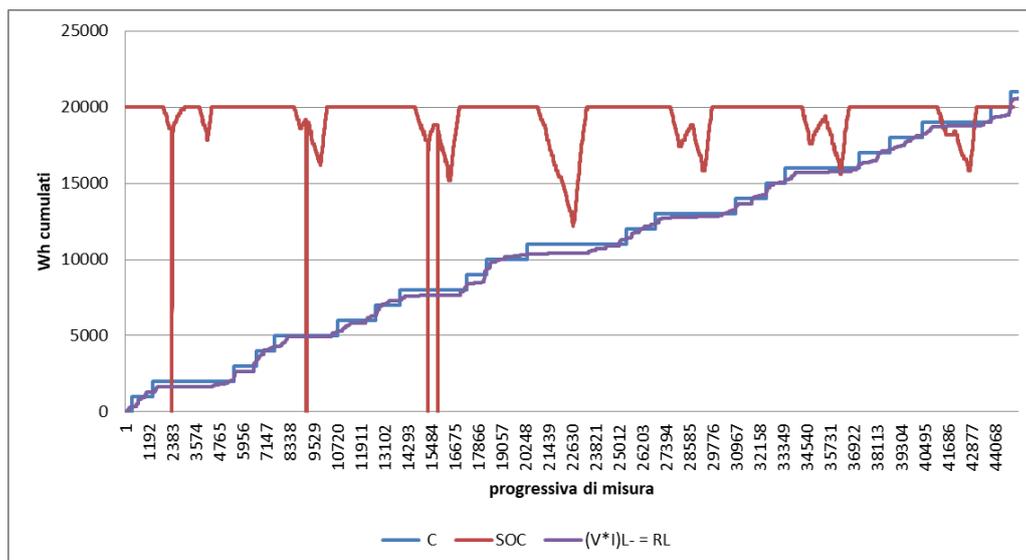
In realtà, dall'analisi di altre giornate di misura, è emerso che D può crescere anche dopo il raggiungimento dello stato di piena carica (SOC = 100%) a seguito della ricarica da bifilare; questo è dovuto evidentemente alla presenza di una piccola capacità residua in aggiunta a quella nominale.

Dagli approfondimenti effettuati, si è verificato che sono presenti, durante la marcia in bifilare, delle fasi di recupero del motore a cui non corrisponde un'energia elettrica di ritorno in rete, da cui si è dedotto che tale energia confluisca in batteria come mostrato dall'andamento di D in alcuni casi.

In sostanza, si è concluso che la grandezza D raccoglie tre termini energetici e cioè:

1. l'energia fornita dalla rete durante l'avvio della marcia in bifilare, per riportare lo stato di carica della batteria al massimo;
2. l'energia di recupero fornita dall'azionamento di bordo durante la marcia in bifilare
3. l'energia di recupero fornita dall'azionamento di bordo durante la marcia in batteria

Coerentemente con quanto appena esposto, l'andamento della grandezza C, definita come Energia in ingresso alla linea di alimentazione (per recupero dell'energia inerziale) coincide con ragionevole approssimazione all'energia calcolata dai valori di V ed I corretti, per le fasi di marcia in bifilare (cfr. figura seguente).



**Figura 7: Andamento della grandezza C a confronto con l'energia di recupero calcolata dai valori di tensione e corrente corretti**

Di conseguenza, nei casi in cui si verificano dei ritorni in batteria durante la marcia in bifilare (D crescente in bifilare dopo l'operazione di ricarica), questi non sono ricompresi nei valori di recupero stimabili attraverso tensione e corrente. Evidentemente il valore di corrente negativa generata dall'azionamento di bordo è più elevato di quello misurato dai sensori che forniscono i valori della corrente negativa e si deve dedurre che il flusso di corrente, prima di arrivare al bifilare, si distribuisca in due circuiti, il primo in ingresso alla rete, il secondo in ingresso alla batteria.

Sulla base di quanto osservato, possiamo trarre il seguente schema dei flussi energetici, dove in blu sono indicate le componenti di energia attive (impiegate per la trazione) e in rosso quelle passive (di recupero).

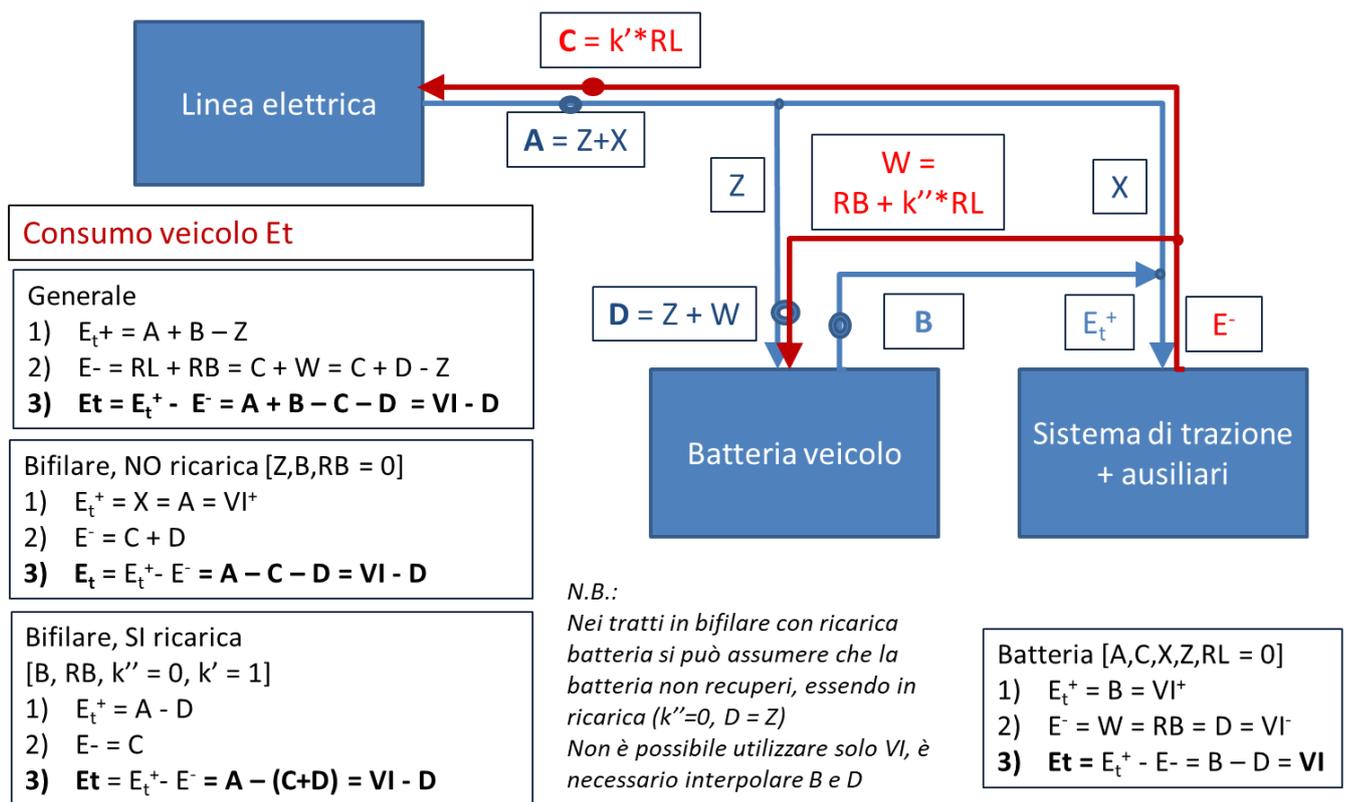


Figura 8: Schema elettrico veicolo con indicazione dei punti di misura e significato delle grandezze misurate

Il sistema di equazioni riportato nella figura mostra che solo per le tratte di marcia in batteria è possibile calcolare il consumo del veicolo direttamente dai valori di tensione e corrente forniti in input (sia pure corretti secondo quanto precedentemente esposto).

Per le tratte in bifilare, tale calcolo non è possibile, per motivi diversi che si tratti della fase di ricarica della batteria o meno, e perciò si rende necessario fare intervenire la grandezza  $D$  fornita dal computer di bordo, opportunamente interpolata quando si voglia effettuare un'analisi dei consumi puntuali in bifilare.

### 1.2.2 Analisi dei consumi giornalieri e di corsa mediante l'impiego delle grandezze energetiche calcolate dal computer di bordo

Dopo aver verificato il significato delle grandezze energetiche fornite in input per i veicoli esaminati, ne sono stati verificati i valori per tutte le giornate di rilevamento, a partire dai bilanci energetici globali.

Le tabelle 5 e 6 riassumono i risultati delle elaborazioni che utilizzano i dati energetici calcolati dal computer di bordo e quelli delle percorrenze nelle diverse condizioni di marcia (sotto bifilare o meno).

**Tabella 3: Bilanci energetici sul totale della giornata di rilevamento per il veicolo 1 di Cagliari**

Giorno	Ora Inizio	Ora Fine	Energia prelevata dalla rete	Energia restituita alla rete	Energia in ingresso al pacco batteria	Energia in uscita dal pacco batteria	Variazione Energia in batteria	Energia lorda per trazione + aux. + perdite	Energia netta per trazione + aux. + perdite	Distanza percorsa in batteria	Distanza percorsa in bifilare	Distanza percorsa totale	Consumo specifico medio al lordo dei recuperi	Consumo specifico medio al netto dei recuperi	Consumo specifico medio lordo in batteria
			A (kWh)	C (kWh)	D (kWh)	B (kWh)	F (kWh)	A-F (kWh)	A-C - F (kWh)	(km)	(km)	(km)	(kWh/km)	(kWh/km)	(kWh/km)
03/08/2018	00:00:01	23:56:53	538	21	137	126	11	527	506	67	176	243	2,17	2,08	1,88
04/08/2018	04:26:07	22:45:01	454	22	131	131	0	454	432	80	168	248	1,83	1,74	1,64
05/08/2018	05:37:09	00:00:00	504	21	145	138	7	497	476	75	179	254	1,96	1,87	1,84
06/08/2018	00:00:01	00:00:00	488	30	156	150	6	482	452	82	166	248	1,94	1,82	1,83
24/08/2018	04:48:29	22:55:28	489	25	146	146	0	489	464	75	172	247	1,98	1,88	1,95
25/08/2018	05:45:08	23:55:57	454	26	146	155	-9	463	437	83	161	244	1,90	1,79	1,87
27/08/2018	00:00:01	22:47:34	475	29	161	152	9	466	437	86	162	248	1,88	1,76	1,77
28/08/2018	07:59:58	23:39:36	398	19	141	152	-11	409	390	86	133	219	1,87	1,78	1,77
29/08/2018	04:55:29	23:04:40	459	24	164	159	5	454	430	87	160	247	1,84	1,74	1,83
01/09/2018	06:59:59	23:43:23	409	20	131	126	5	404	384	74	155	229	1,76	1,68	1,70
02/09/2018	05:36:17	23:59:03	464	22	130	131	-1	465	443	70	184	254	1,83	1,74	1,87
04/09/2018	04:45:15	22:45:35	483	25	125	135	-10	493	468	73	170	243	2,03	1,93	1,85
05/09/2018	05:38:48	23:52:56	488	25	178	191	-13	501	476	90	154	244	2,05	1,95	2,12
06/09/2018	04:22:19	00:00:00	465	25	162	156	6	459	434	75	147	222	2,07	1,95	2,08
08/09/2018	04:48:47	23:06:04	479	29	137	128	9	470	441	71	177	248	1,90	1,78	1,80
09/09/2018	06:46:20	20:58:40	366	16	111	119	-8	374	358	70	127	197	1,90	1,82	1,70
10/09/2018	05:26:09	23:44:28	424	30	114	117	-3	427	397	77	167	244	1,75	1,63	1,52
11/09/2018	04:42:27	23:12:42	462	26	154	137	17	445	419	76	172	248	1,79	1,69	1,80
12/09/2018	07:00:01	23:59:59	447	33	130	141	-11	458	425	73	157	230	1,99	1,85	1,93
13/09/2018	04:59:58	23:16:49	428	34	114	121	-7	435	401	79	168	247	1,76	1,62	1,53
14/09/2018	05:38:00	23:25:20	445	32	120	129	-9	454	422	76	168	244	1,86	1,73	1,70
16/09/2018	06:43:57	20:59:47	366	22	110	116	-6	372	350	71	126	197	1,89	1,78	1,63
<b>Totale periodo</b>			<b>9985</b>	<b>556</b>	<b>3043</b>	<b>3056</b>	<b>-13</b>	<b>9998</b>	<b>9442</b>	<b>1696</b>	<b>3549</b>	<b>5245</b>	<b>1,91</b>	<b>1,80</b>	<b>1,80</b>

**Tabella 4: Bilanci energetici sul totale della giornata di rilevamento per il veicolo 2 di Cagliari**

Giorno	Ora Inizio	Ora Fine	Energia prelevata dalla rete	Energia restituita alla rete	Energia in ingresso al pacco batteria	Energia in uscita dal pacco batteria	Variazione Energia in batteria	Energia lorda per trazione + aux. + perdite	Energia netta per trazione + aux. + perdite	Distanza percorsa in batteria	Distanza percorsa in bifilare	Distanza percorsa totale	Consumo specifico medio al lordo dei recuperi	Consumo specifico medio al netto dei recuperi	Consumo specifico medio lordo in batteria
			A (kWh)	C (kWh)	D (kWh)	B (kWh)	F (kWh)	A-F (kWh)	A-C - F (kWh)	(km)	(km)	(km)	(kWh/km)	(kWh/km)	(kWh/km)
01/08/2018	10:59:59	00:00:00	375	12	129	107	22	353	341	51	113	164	2,15	2,08	2,10
02/08/2018	00:00:01	23:44:17	535	18	183	184	-1	536	518	86	163	249	2,15	2,08	2,14
03/08/2018	07:59:58	23:15:41	446	21	145	143	2	444	423	69	137	206	2,16	2,05	2,07
04/08/2018	05:35:48	00:00:00	437	14	148	144	4	433	419	90	153	243	1,78	1,72	1,60
06/08/2018	05:21:20	23:53:29	470	27	153	139	14	456	429	80	163	243	1,88	1,77	1,74
07/08/2018	04:59:59	23:02:15	503	27	147	136	11	492	465	74	172	246	2,00	1,89	1,84
17/08/2018	05:43:28	23:30:42	466	18	139	130	9	457	439	71	172	243	1,88	1,81	1,83
18/08/2018	07:59:58	00:00:00	384	18	136	136	0	384	366	71	134	205	1,87	1,79	1,92
24/08/2018	05:37:45	23:48:58	465	21	153	141	12	453	432	77	166	243	1,86	1,78	1,83
25/08/2018	04:31:02	21:58:39	462	22	136	125	11	451	429	72	175	247	1,83	1,74	1,74
27/08/2018	05:35:15	23:29:33	427	20	163	148	15	412	392	81	162	243	1,70	1,61	1,83
29/08/2018	05:30:54	23:26:39	457	30	127	117	10	447	417	71	172	243	1,84	1,72	1,65
31/08/2018	05:36:35	23:32:24	464	26	134	117	17	447	421	68	175	243	1,84	1,73	1,72
01/09/2018	04:54:18	00:00:00	444	26	154	140	14	430	404	78	169	247	1,74	1,64	1,79
03/09/2018	05:29:10	22:04:49	402	26	130	112	18	384	358	70	144	214	1,79	1,67	1,60
04/09/2018	05:27:28	23:33:14	461	19	169	158	11	450	431	84	159	243	1,85	1,77	1,88
06/09/2018	05:38:13	23:52:57	443	22	127	134	-7	450	428	75	168	243	1,85	1,76	1,79
07/09/2018	06:59:58	22:46:51	341	26	107	104	3	338	312	74	145	219	1,54	1,42	1,41
08/09/2018	05:40:24	23:55:02	399	27	125	119	6	393	366	70	174	244	1,61	1,50	1,70
13/09/2018	05:51:54	23:38:37	378	26	101	92	9	369	343	67	176	243	1,52	1,41	1,37
14/09/2018	04:51:19	23:06:46	440	19	176	155	21	419	400	92	149	241	1,74	1,66	1,68
15/09/2018	05:51:28	23:46:58	454	21	149	136	13	441	420	76	168	244	1,81	1,72	1,79
16/09/2018	05:41:33	23:49:08	445	16	131	125	6	439	423	75	179	254	1,73	1,67	1,67
<b>Totale periodo</b>			<b>10098</b>	<b>502</b>	<b>3262</b>	<b>3042</b>	<b>220</b>	<b>9878</b>	<b>9376</b>	<b>1722</b>	<b>3688</b>	<b>5410</b>	<b>1,83</b>	<b>1,73</b>	<b>1,77</b>

Si verifica la seguente variabilità dei consumi specifici medi calcolati a livello di giornata dalle grandezze A, B, C e D e comprendenti gli assorbimenti per trazione, degli ausiliari e le perdite energetiche in batteria:

**Tabella 5: Variabilità dei valori di consumo specifico giornaliero per il veicolo 1 su 22 giornate di rilevamento**

	Cons. spec. medio lordo totale (kWh/km)	Con. spec. medio netto tot. (kWh/km)	Cons. spec. medio lordo batt. (kWh/km)
Valore medio (kWh/km)	1,91	1,80	1,80
Valore min (kWh/km)	1,75	1,62	1,52
Valore max (kWh/km)	2,17	2,08	2,12
Dev. Std (kWh/km)	0,11	0,11	0,15
Coeff. Dispers. (%)	5,7%	6,2%	8,4%

**Tabella 6: Variabilità dei valori di consumo specifico giornaliero per il veicolo 2 su 23 giornate di rilevamento**

	Cons. spec. medio lordo totale (kWh/km)	Con. spec. medio netto tot. (kWh/km)	Cons. spec. medio lordo batt. (kWh/km)
Valore medio (kWh/km)	1,83	1,73	1,77
Valore min (kWh/km)	1,52	1,41	1,37
Valore max (kWh/km)	2,16	2,08	2,14
Dev. Std (kWh/km)	0,17	0,17	0,19
Coeff. Dispers. (%)	9,3%	10,1%	10,6%

Si osserva una maggiore variabilità assoluta e relativa dei valori per il secondo veicolo rispetto al primo, a fronte di valori medi di consumo leggermente più bassi; nel complesso, tuttavia, si può dire che i veicoli monitorati presentano valori di consumo specifico, comprendenti gli assorbimenti per trazione e degli ausiliari e le perdite energetiche a monte dell'ingresso al sistema trazione + ausiliari, abbastanza stabilmente intorno a 1,8 kWh/km, o poco meno.

In batteria, il consumo tende ad abbassarsi (i valori mostrati nelle tabelle sono al lordo dei recuperi di frenatura) a causa di una somma di fattori di contesto: profilo piano altimetrico del percorso, condizioni di carico e di traffico.

In ogni caso i valori mostrati risultano sensibilmente più elevati di quelli sinora utilizzati nelle valutazioni di carattere tecnico economico sull'elettrificazione di linee di Trasporto pubblico urbano (intorno a 1,3 kWh/km mediamente su base annua nel caso di simulazione delle linee ATAC di Roma, valore calcolato sulla base del programmato di esercizio per bus di medesima taglia di quelli analizzati a Cagliari). Si vedrà meglio nel seguito come, ad un'analisi di maggior dettaglio, le stime dei consumi specifici in batteria sono da rivedersi al ribasso. Tuttavia, considerata l'estrema variabilità delle tipologie di veicolo (in questo caso si tratta di filobus adattati alla marcia autonoma), delle condizioni di circolazione e di azionamento degli ausiliari di bordo, ci si riserva di effettuare ulteriori approfondimenti attraverso altre misure.

Per il veicolo 1, sempre impiegando le grandezze energetiche stimate dal computer di bordo, sono stati analizzati anche i consumi medi di corsa in funzione dell'orario di partenza dal capolinea nei giorni feriali.

L'analisi è stata effettuata sia a livello di giro (Andata + Ritorno) che per percorso unidirezionale.

I seguenti grafici riportano quanto rilevato relativamente ai consumi complessivi di tratta (trazione + ausiliari per condizionamento di bordo).

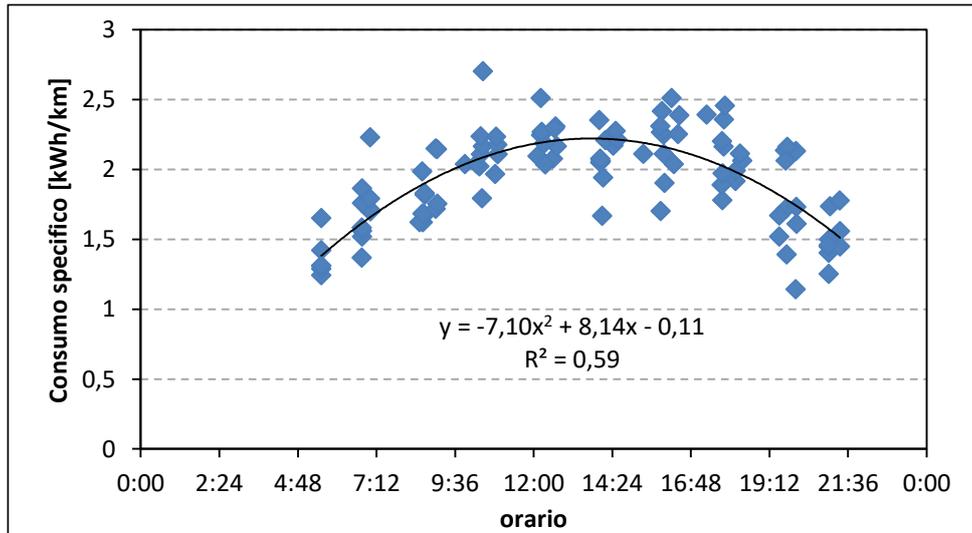


Figura 9: Consumi specifici complessivi medi di giro in funzione dell'orario di inizio servizio

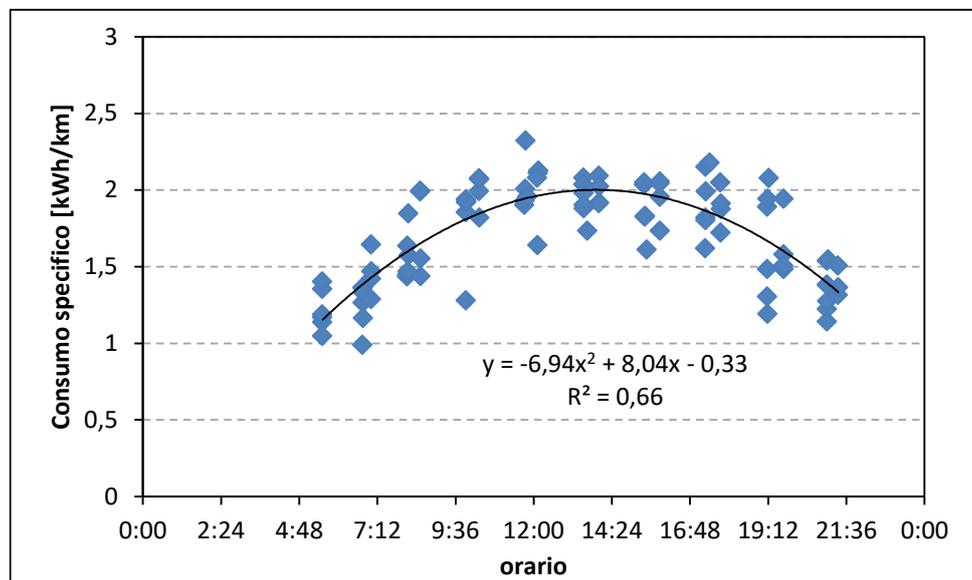


Figura 10: Consumi specifici medi complessivi di corsa di andata in funzione dell'orario di inizio servizio

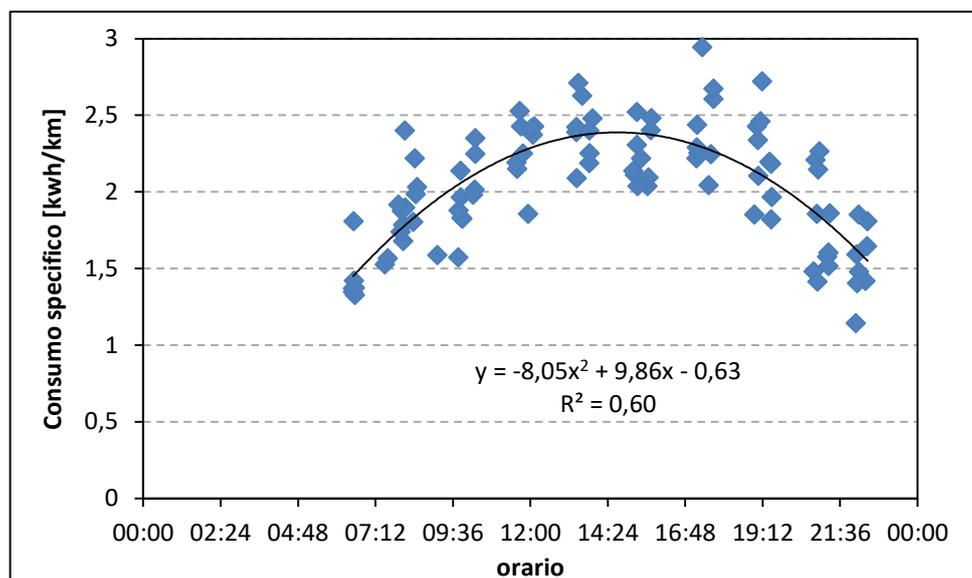


Figura 11: Consumi specifici complessivi medi di corsa di ritorno in funzione dell'orario di inizio servizio

Molto evidente l'influenza dell'orario di servizio sui consumi del veicolo, come era lecito attendersi.

Particolarmente interessante è che i valori di consumo nell'ora di punta risultano influenzati non solo dal carico del veicolo ma anche dalla situazione di congestione che presumibilmente si verifica nello stesso momento e, probabilmente, dall'assorbimento dei condizionatori.

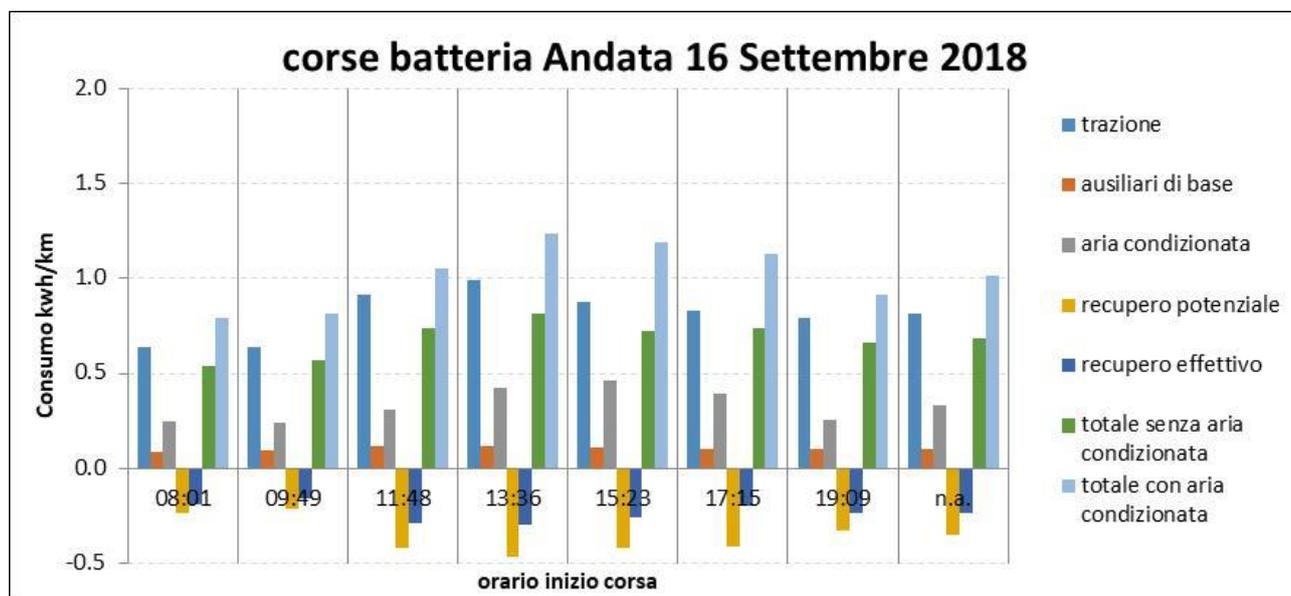
Infatti, se si analizzano i rapporti dei valori delle 13:00 con quelli delle 5:00 del mattino o delle 22:00, si osservano dei valori intorno a 1,63; una tale differenza non si giustifica solo in relazione al diverso carico del veicolo. Infatti, pur ammettendo che nell'ora di punta il peso totale al terra fosse quello massimo consentito dalla normativa (19 t), in rapporto con il peso a vuoto (13.5 t circa) sarebbe pari solo a 1.4; l'ulteriore 20% aggiuntivo di consumo deve essere attribuito a traffico ed assorbimento degli ausiliari che, nel periodo estivo considerato, può risultare estremamente rilevante.

### 1.2.3 Analisi dei consumi di corsa mediante l'impiego delle misure di potenza meccanica ed elettrica

Per verificare l'incidenza delle diverse componenti di consumo, è stata effettuata un'analisi di maggiore dettaglio, prendendo in esame anche i dati misurati di tensione e corrente e di coppia e n° di giri del motore, da cui è stato possibile ricavare la potenza assorbita dalla trazione; inoltre, dall'analisi dei consumi durante le soste ai capolinea ed alle fermate sono stati ricavati gli assorbimenti degli ausiliari di base (3 kW ca.) mentre quelli per condizionamento d'aria (AC) sono stati ricavati puntualmente per differenza.

Per ridurre il più possibile l'effetto delle variabili di contesto, l'analisi è stata effettuata scomponendo le corse in andata e ritorno e, all'interno di ogni corsa bidirezionale, sono state individuate le tratte in batteria e quelle in bifilare; in particolare queste ultime sono state depurate delle tratte in cui, per qualche motivo, si fosse verificata una disconnessione dal bifilare costringendo il veicolo ad utilizzare la batteria anche dove non previsto.

I risultati dell'analisi per le tratte in batteria sono riportati nei due grafici seguenti.



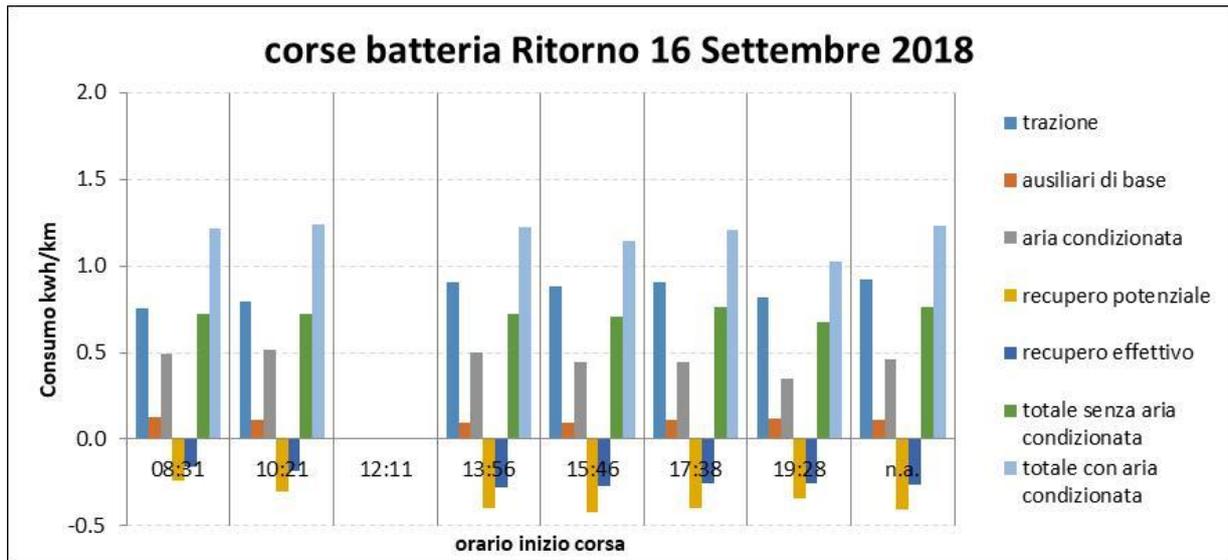


Figura 12: Consumi specifici medi disaggregati in batteria

Gli assorbimenti per trazione, al lordo dei recuperi, sono sempre al di sotto della soglia di 1 kWh/km.

A questi valori di consumo vanno sottratti i recuperi di energia cinetica per frenatura (le tratte in batteria sono caratterizzate da pendenze molto basse, per cui il recupero di energia potenziale può essere ritenuto trascurabile); mediamente l'energia recuperata durante la frenatura è pari a circa 0,25 kWh/km, corrispondente a poco meno del 70% dell'energia di recupero potenziale prodotta dal motore in fase di generazione.

Per contro, sono da aggiungere ai consumi per trazione quelli degli ausiliari minimi che, da un'analisi effettuata sui consumi a veicolo fermo, assorbono potenze dell'ordine dei 3 kW; nel complesso, il consumo specifico netto del veicolo nella tratte in batteria, comprensivo di trazione e ausiliari minimi varia fra 0,6 e 0,8 kWh/km, collocandosi mediamente a circa 0,7 kWh/km; ricordiamo che si tratta di un consumo in condizioni di piano, basso carico e scarso traffico.

L'aria condizionata, consuma mediamente 0,40 kWh/km, rappresentando così circa il 35% dei consumi totali netti nella situazione specificata; considerando questo assorbimento il consumo specifico medio netto risulta pari a circa 1,15 kWh/km.

Durante il ritorno si osserva una maggiore uniformità dei consumi per trazione e per condizionamento dell'abitacolo rispetto all'andata, risultato ascrivibile in parte ad una velocità media più costante e leggermente più bassa, a causa delle diverse caratteristiche planimetriche del percorso; è proprio questa velocità più bassa a determinare un maggiore consumo specifico medio rispetto al percorso di andata.

La velocità commerciale è mediamente pari a 28 km/h per l'andata e a 26km/h per il ritorno. Durante il percorso in batteria mediamente l'autobus si ferma solo il 38% delle volte programmate ed il tempo medio di sosta alle fermate è pari a 18".

Non sarà sfuggita l'evidente differenza del valore di consumo specifico in batteria precedentemente calcolato per l'intera giornata del 16 settembre utilizzando i dati energetici calcolati dal computer di bordo, pari a 1,63 kWh/km contro gli 1,15 kWh/km stimati attraverso i valori di misura. Tale differenza, alla luce di uno specifico approfondimento, è da ascrivere soprattutto all'incidenza, nel primo calcolo, del consumo che si registra durante le fasi di trasferimento a/dal deposito, il quale risulta essere molto più elevato, in termini specifici, dei valori calcolati per le tratte di servizio di linea. Vista la disomogeneità del valore di consumo specifico dei trasferimenti rispetto a quello durante il servizio, si ritiene opportuno non considerare questo dato nell'analisi delle performance energetiche del veicolo, sebbene a conclusione dello studio si renderà necessario aggiungere gli oneri energetici di trasferimento a/dal deposito per il calcolo del consumo specifico medio.

L'analisi di dettaglio dei percorsi effettuati utilizzando l'alimentazione da bifilare (vedi grafici seguenti) conferma sostanzialmente i valori di consumo specifico calcolati precedentemente in forma più aggregata (1,7 kWh/km); rispetto alle tratte in batteria, si osservano valori più elevati di consumo specifico per tutte le componenti, in parte dovuti ad una minore velocità commerciale e, per quanto riguarda la trazione, ad un profilo altimetrico molto più ondulato rispetto al percorso in batteria. Un'altra importante differenza con l'alimentazione a batteria è nella percentuale di recupero energetico effettivo rispetto a quello potenziale; in realtà il valore di recupero effettivo in bifilare è sottostimato, mancando nei dati di corrente la quota di energia che finisce in batteria piuttosto che in rete.

Per la tratta in bifilare la velocità commerciale è molto più bassa di quella calcolata nella parte in batteria ed è pari a 17km/h sia per l'andata che per il ritorno. Il numero medio di fermate effettuate nella parte di percorso in bifilare è di 22 su 30 (72%) all'andata, di 18 su 27 (67%) al ritorno; l'autobus si ferma molto più frequentemente che nella tratta in batteria, sebbene per un tempo di fermata mediamente un po' più basso (17 secondi).

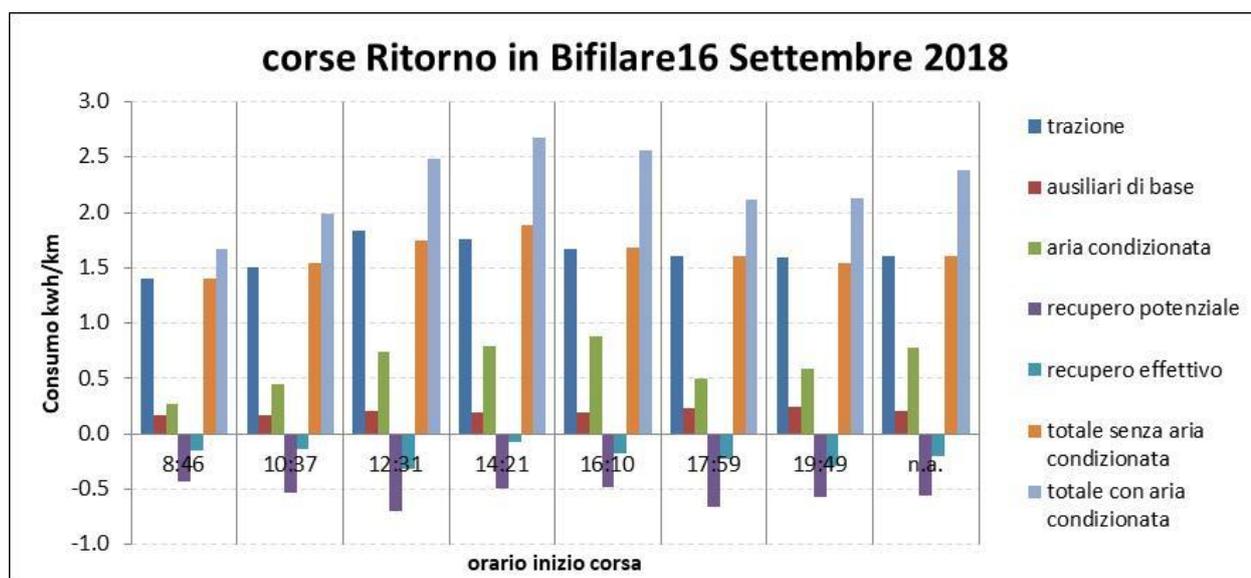
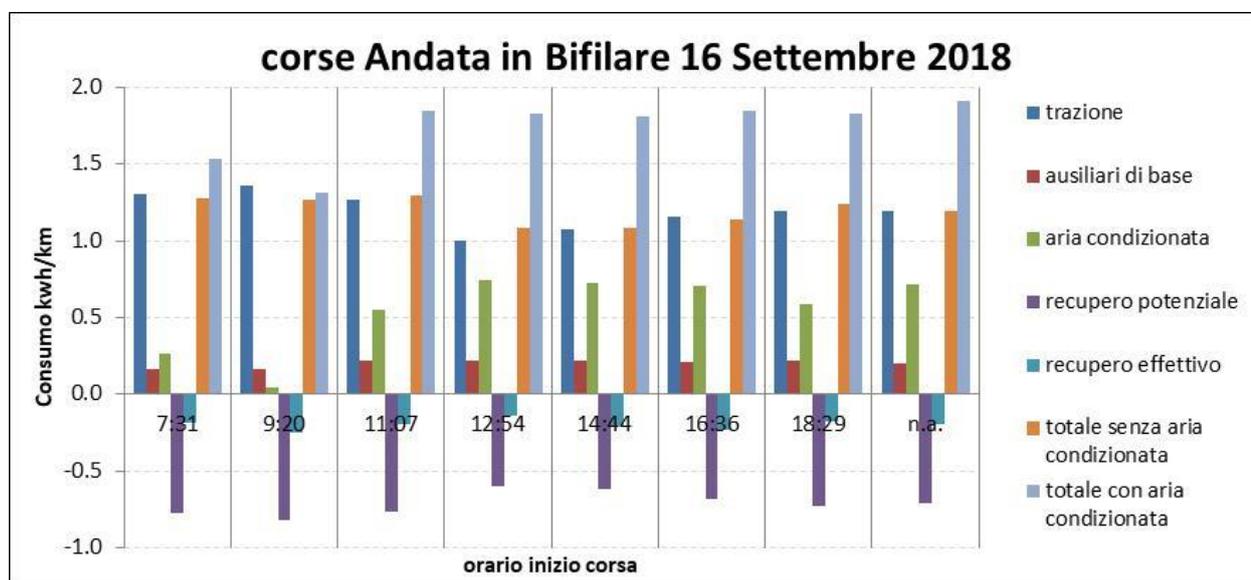


Figura 13: Consumi specifici medi disaggregati in bifilare

Nella figura seguente sono riportati i valori dei consumi specifici complessivi per l'intera giornata di servizio. I consumi specifici totali senza aria condizionata globalmente sono pari a 1.3 kWh/km, mentre quelli comprensivi di aria condizionata sono pari a 1.7 kWh/km.

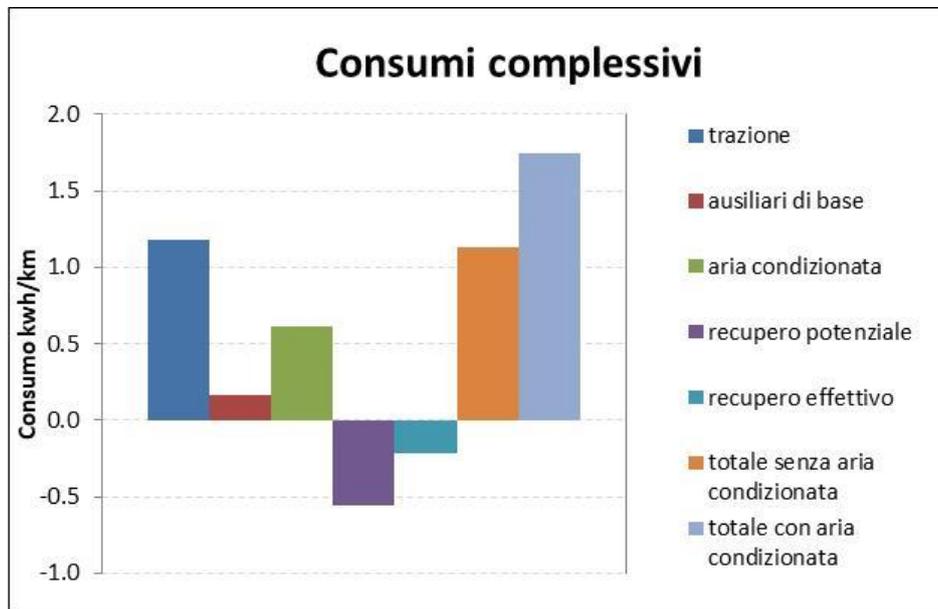


Figura 14: Consumi specifici intera giornata bifilare e batteria

#### 1.2.4 Riorganizzazione ed analisi dei dati per tratta da fermata a fermata

Essendo l'attività ENEA principalmente focalizzata sull'estrapolazione di curve di consumo in funzione della velocità media di tratta, la prima importante attività è stata quella di individuare, sulle sequenze secondo per secondo dei dati di misura, i momenti di fermata per servizio o il passaggio attraverso le fermate, ancorché non effettuate.

Allo scopo si è fatto uso di applicazioni GIS, impiegando i dati di georeferenziazione forniti dall'Azienda.

Alla fine di questa onerosa attività, si sono ottenuti dei file contenenti le tratte fra due fermate di servizio realmente effettuate e, per ciascuna di esse, il valore di lunghezza e pendenza media, di velocità media commerciale (che tiene conto dei tempi di sosta alle fermate), di carico passeggeri (ove disponibile), lo stato di accensione degli ausiliari per condizionamento, il tempo effettivo di fermata, il valore delle grandezze di consumo fornite in input ricadenti all'interno del tempo di percorrenza della tratta per le quali avviene una fermata.

Questo nuovo formato dati è stato utilizzato per l'estrapolazione delle curve di consumo specifico in funzione della velocità commerciale su base statistica.

In particolare sono stati utilizzati i dati della giornata del 16 settembre per la quale si dispone del carico del veicolo da fermata a fermata, rilevato dall'Azienda di trasporto.

Questo dato è assolutamente prezioso per poter fare un'analisi di separazione dei diversi fattori che influenzano il consumo dei veicoli, fra i quali il carico è sicuramente uno dei più importanti.

Utilizzando l'elaborazione dei dati per tratta, di cui si è detto in precedenza, oltre al carico disponiamo del valore di pendenza media di ogni tratta e, dai dati di misura, sappiamo se gli ausiliari per condizionamento siano in funzione o meno.

L'analisi di influenza dei diversi fattori sul consumo del veicolo è stata compiuta attraverso una preliminare clusterizzazione dei dati di misura.

Sono stati raggruppate le tratte in funzione dei seguenti range di pendenza:

<-5%, [-5%,-3%), [-3%,-1%), [-1%,+1%), [+1%,+3%), [+3%,+5%), >=5

Di questi range è risultata statisticamente significativa soltanto la classe di pendenza [-1%,+1%) che sostanzialmente rappresenta le condizioni di pianura con pendenza media pari a 0% e numerosità dei punti di misura pari a 195.

All'interno di tale classe, particolarmente rilevante ai fini di una analisi sui consumi, in quanto rappresenta una situazione di riferimento, sono state analizzate le diverse condizioni di carico ed è risultato sufficientemente rappresentato solo il range di carico compreso tra 0 e 3 passeggeri con una numerosità dei punti di misura pari a 45.

Nel seguito si riporta quindi l'analisi dei consumi per il sottoinsieme delle tratte a pendenza compresa fra -1% e +1% e per carico compreso fra 0 e 3 passeggeri.

L'analisi è stata effettuata depurando i valori di consumo dell'assorbimento degli ausiliari di condizionamento quando presente.

Sono stati messi in relazione i consumi specifici e le velocità commerciali delle tratte fra due fermate effettivamente effettuate, ottenendo le curve interpolanti indicate nel grafico seguente (Best fit: potenza)

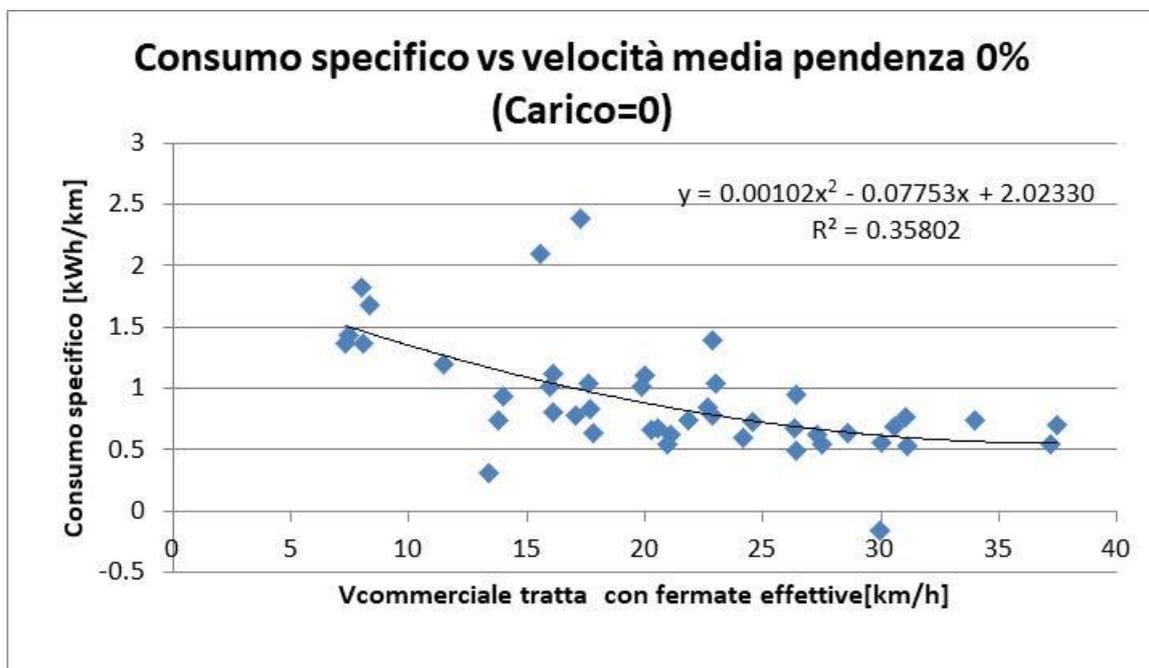


Figura 15: Curve di consumo a carico nullo e a pendenza 0% su base sperimentale

	Pendenza 0%
$\alpha$	0.00102
$\beta$	-0.07753
$\gamma$	2.0233

La curva sembra credibile nonostante il coefficiente di correlazione sia basso. Questa situazione era del tutto attesa ben sapendo che, a parità di velocità commerciale, i profili di velocità istantanea possono essere molto differenti nei diversi casi, a causa delle diverse condizioni di circolazione e di traffico.

Si è più volte affermato, infatti, che solo una simulazione su un preciso profilo di missione (peraltro rappresentativo esclusivamente di una situazione "tipo" fra le svariate che si verificano nella realtà) è in grado di fornire un valore sufficientemente accurato dei consumi di esercizio per effettuare il dimensionamento dell'accumulo di bordo e del sistema di ricarica.

E infatti, il DSS messo a punto nel corso del triennio è dotato anche di un modulo di simulazione dei consumi e delle emissioni degli autobus di diversa alimentazione e powertrain, che rappresenta lo strumento di elezione per la stima dei consumi delle linee di cui si vuole verificare la fattibilità e la convenienza di un'alimentazione elettrica a batteria.

Tuttavia, l'utilizzo di curve di consumo in funzione della velocità media ricostruite su base statistica è un approccio molto speditivo e, riteniamo, sufficientemente approssimato per effettuare delle analisi di pre-fattibilità.

Peraltro, questo è proprio l'approccio utilizzato per la realizzazione degli inventari di emissione e consumo del trasporto su strada a partire dalle curve di consumo specifico in funzione della velocità media fornite dal modello COPERT, che è posto alla base di moltissime valutazioni di fattibilità di interventi nel settore dei trasporti. Si osserva che anche le curve COPERT soffrono di coefficienti di regressione molto bassi, per la stessa natura ondivaga del fenomeno della circolazione veicolare su strada.

La campagna di misure posta in essere in questo periodo di ricerca, quindi, oltre a consentire, prima di tutto, la validazione del modulo di simulazione dei consumi sui profili di missione puntuali, di fatto va anche a coprire una notevole carenza della metodologia COPERT che ancora non fornisce i valori delle curve di consumo dei veicoli puramente elettrici. Si confida, per il futuro, di disporre di ulteriori dati in modo da migliorare la significatività statistica dei dati e dei risultati dell'analisi.

A partire da queste doverose premesse, si ritiene utile proseguire con l'estrapolazione, attraverso considerazioni teoriche, delle curve di consumo per le situazioni di cui, per il momento, non si disponga di dati statistici significativi.

### 1.2.5 Estrapolazione delle curve di consumo specifico a partire da quelle sperimentali

La curva sperimentale a pendenza nulla e carico nullo è statisticamente abbastanza solida. In attesa di disporre di nuovi dati di misura, possiamo quindi considerarla rappresentativa dei consumi del bus elettrico da 12 m monitorato, a climatizzatore spento.

Per verificare questa assunzione, la curva in questione è stata applicata per calcolare i consumi sulle tratte di partenza, ottenendo un piccolo scostamento negativo, utilizzando il quale è stata ridefinita una nuova curva base "calibrata".

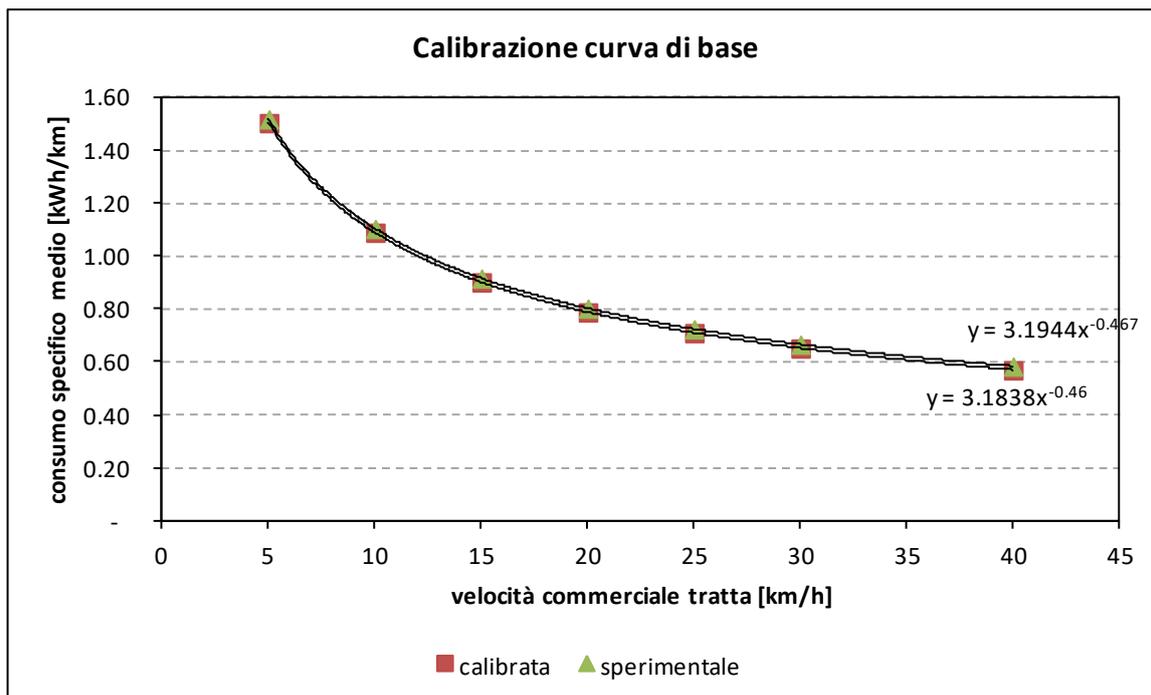


Figura 16: Calibrazione della curva di consumo di base

A partire dalle curve sperimentali precedentemente esaminate e da considerazioni di carattere teorico circa l'influenza della pendenza e del carico sui consumi, sono state estrapolate le curve mostrate nei grafici seguenti, relativi a situazioni di gradiente positivo (sino a +4%) e negativo (sino a -4%), per carico nullo e per carico massimo (84 passeggeri).

In particolare nel calcolo del consumo aggiuntivo legato ad un gradiente positivo è stato considerato un rendimento complessivo dalle ruote alla batteria pari a 65% mentre nel calcolo dei recuperi energetici durante la marcia con gradiente negativo è stato considerato un rendimento dalle ruote al motore pari al 70% ed una percentuale di recupero di energia in batteria pari ad un ulteriore 70% (come peraltro rilevato dai dati di misura mediamente), che considera la quota di energia dissipata.

Si osserva un'ampia variabilità dei valori di consumo specifico, che vanno dai quasi 6 kWh/km in condizioni di pieno carico, basse velocità e gradiente positivo pari a + 4% a valori addirittura negativi, per pendenze negative e velocità più elevate. A questo proposito si fa notare che valori di consumo specifico complessivamente negativo sono stati effettivamente registrati su alcune delle tratte monitorate a Cagliari, sia pure con una bassa incidenza statistica.

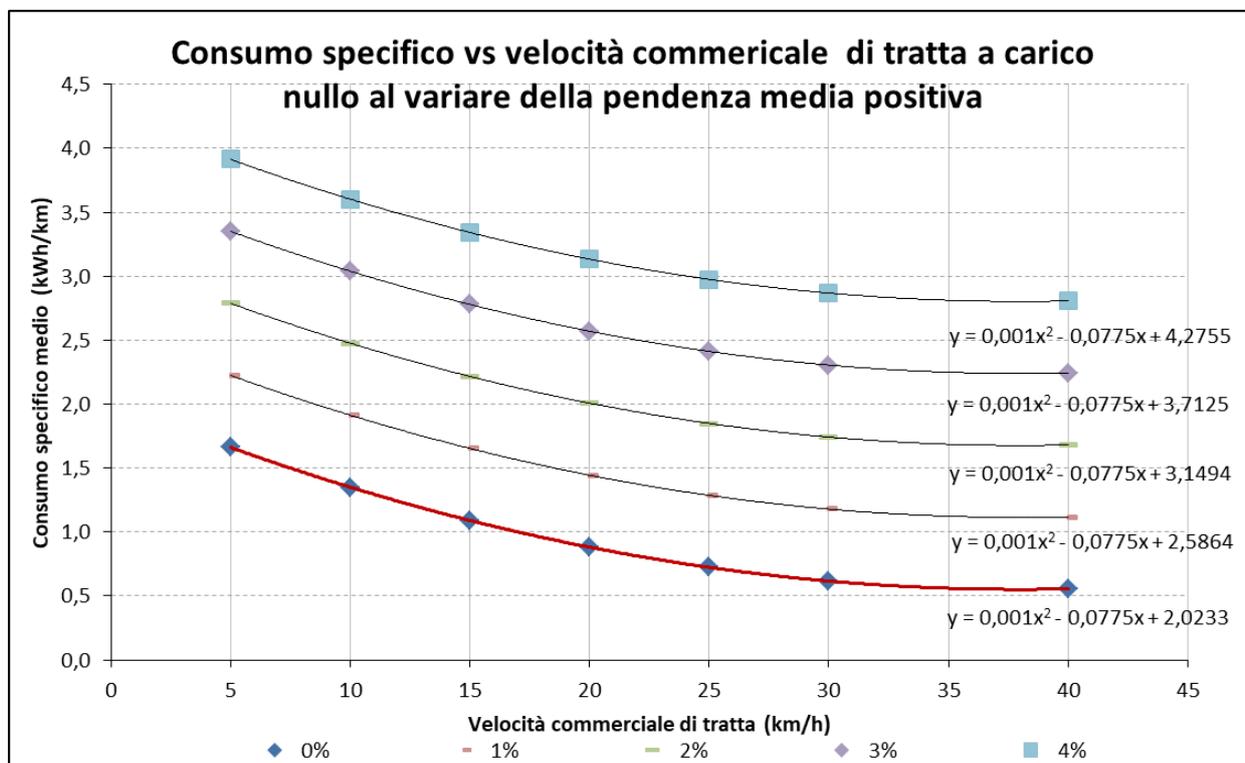


Figura 17: Curve di consumo a carico nullo estrapolate per pendenze positive

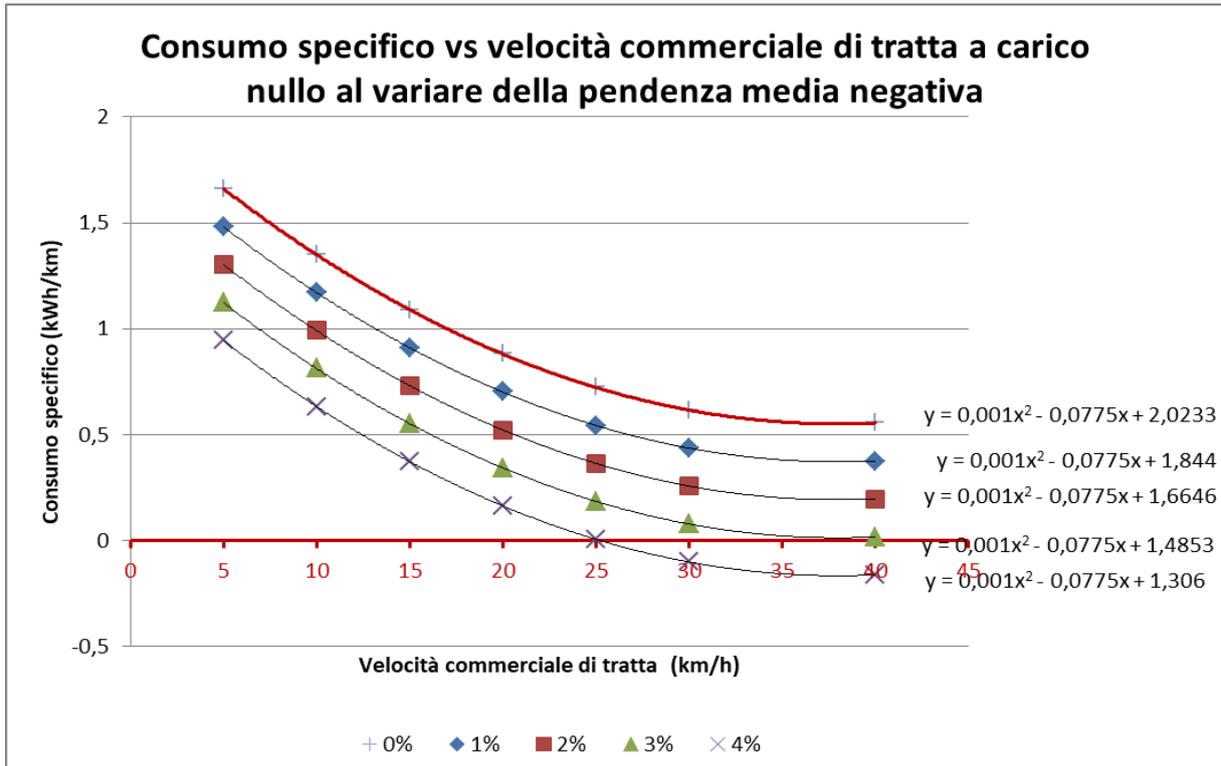


Figura 18: Curve di consumo a carico nullo estrapolate per pendenze negative

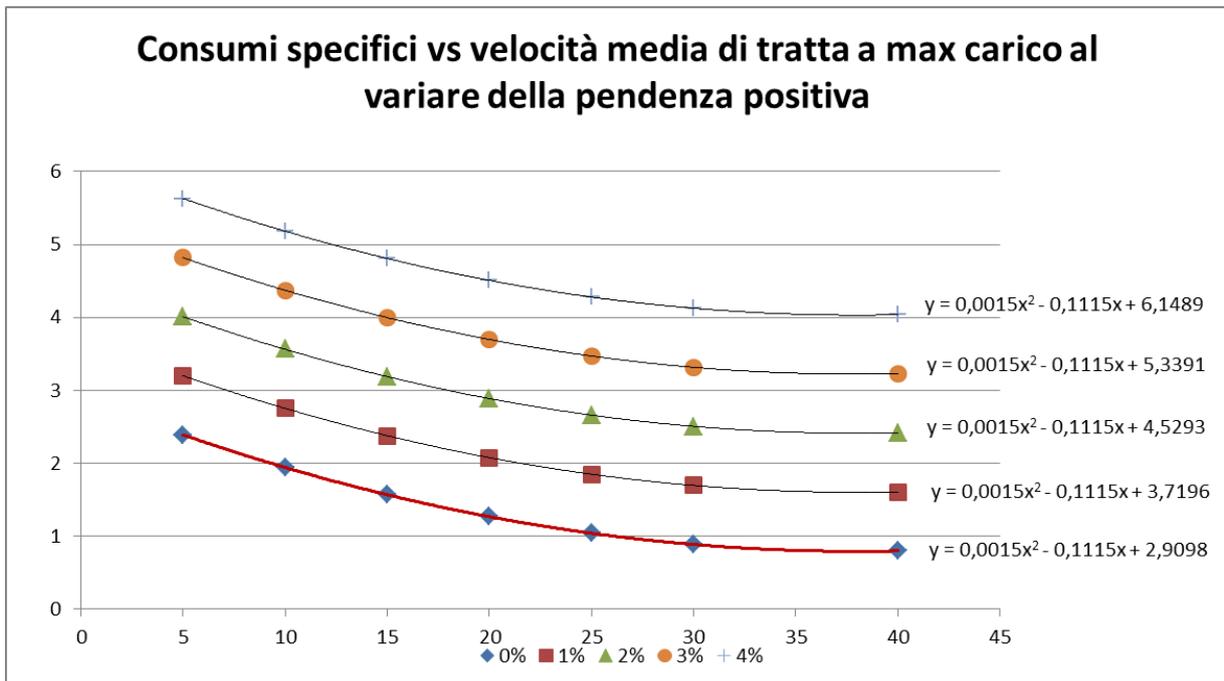


Figura 19: Curve di consumo a carico massimo (84 pax) estrapolate per pendenze positive

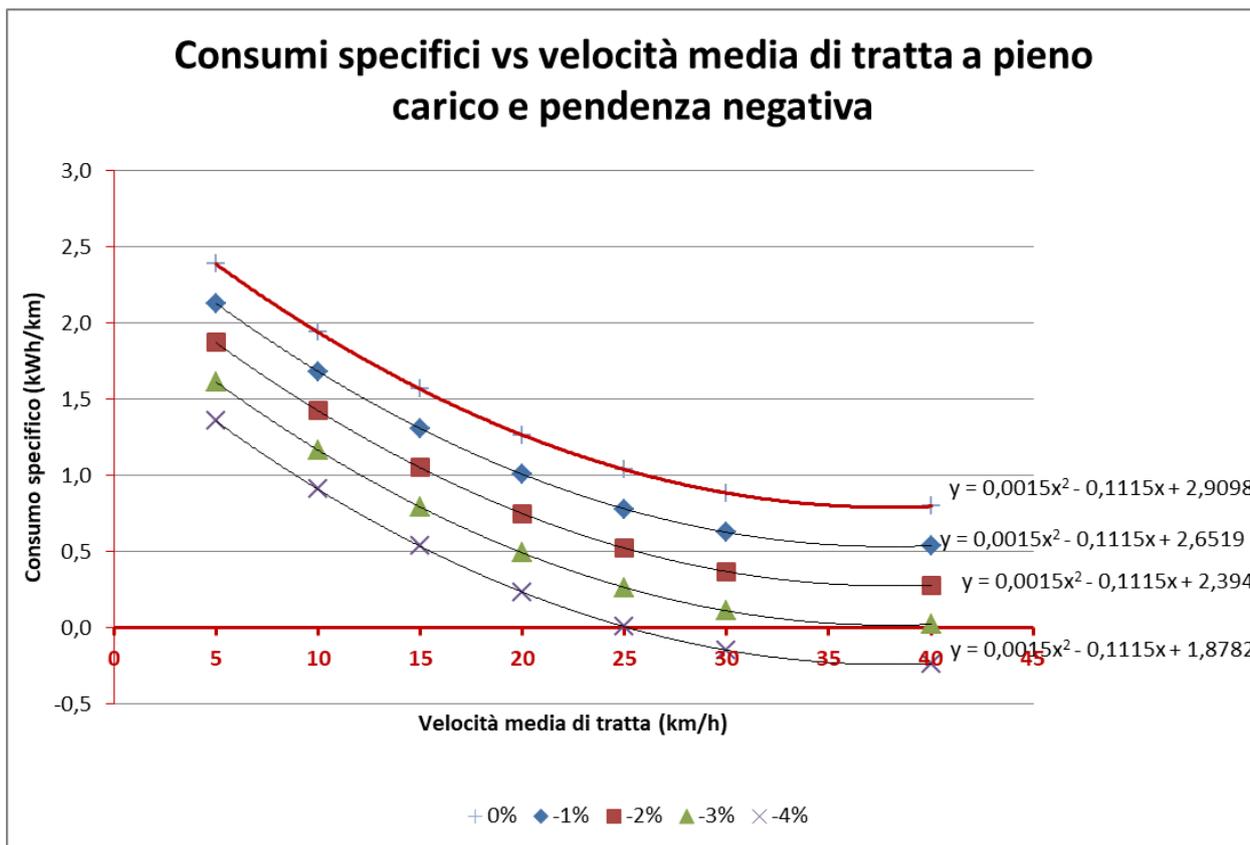


Figura 20: Curve di consumo a carico massimo (84 pax) estrapolate per pendenze negative

Si osserva che i valori di consumo mostrati nelle curve, ed in generale in tutta l’analisi, sono al netto delle perdite dal punto di prelievo dell’energia elettrica (contatore) all’immissione in batteria; secondo le indicazioni dei tecnici della CTM, tali perdite incidono mediamente per un 10% sui consumi del veicolo.

### 1.3 Osservazioni conclusive

Le curve di consumo in funzione della velocità media di tratta sono, per loro stessa impostazione, soggette ad un’ approssimazione molto elevata e rappresentano esclusivamente un valore indicativo da utilizzare con cautela; tale valore infatti, può subire nella realtà variazioni molto elevate in relazione alle diverse condizioni di circolazione e di traffico che si registrano per medesimi valori di velocità media.

Tuttavia siffatte curve sono uno strumento molto utilizzato per le analisi di fattibilità di interventi nel settore del trasporto stradale; lo studio effettuato vuole cominciare a colmare il gap di conoscenza relativo ai veicoli elettrici, in attesa di poter approfondire l’argomento con nuovi dati di misura relativi ad altri veicoli ed altri situazioni al contorno.

E’ bene sottolineare nuovamente che la ricerca condotta nel triennio ha messo contemporaneamente a punto un modulo di simulazione dei consumi degli autobus urbani che utilizza in input uno specifico profilo di missione per il calcolo dei consumi di una linea modulo che è stato calibrato e validato sugli stessi dati forniti dalla CTM di Cagliari e di altre Aziende (cfr. RdS/PAR 2017/233 e RdS/PAR 2018/127) .

## 2 Confronto di alcune tecnologie per accumulo stazionario per sistemi di ricarica flash

### 2.1 Introduzione

L'accumulo di energia elettrica attraverso gli Electrical Energy Storage, (EES) è riconosciuto, tra tutte le possibili opzioni, come una delle soluzioni più promettenti a supporto delle sfide poste dalla decarbonizzazione dell'economia e dall'integrazione nella rete di distribuzione, dell'energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili intermittenti e non programmabili. L'attività di ricerca illustrata in questo lavoro indaga dal punto di vista tecnico ed economico le tecnologie più promettenti ad oggi per un'applicazione stazionaria di diverse tipologie di sistemi di accumulo, che per le loro numerose peculiarità si prestano a soddisfare specifiche tipologie di applicazioni piuttosto che altre. Le soluzioni oggetto dello studio sono i sistemi di accumulo di tipo meccanico come le flywheel o FES o volani, quelli elettrici come i supercondensatori (SC) e quelli elettrochimici come le batterie, in particolare le litio-ferro-fosfato (LFP) e quelle al litio titanato (LTO). La prima parte del lavoro analizza le specificità tecniche, individuando le applicazioni più adatte per ciascuna categoria di accumulo in funzione della durata della vita utile, del tasso di auto scarica, del Coste accettato e delle componenti energetiche e di potenza specifiche. Un aspetto molto importante è il comportamento degli accumuli quando vengono sottoposti a cariche/scariche di diverse volte superiori alla loro capacità nominale. Nell'ambito della Ricerca di Sistema sono state effettuate apposite prove sulle batterie al litio, i cui risultati, oggetto anche di altri lavori svolti negli anni passati, sono commentati di seguito. Nella parte seconda viene presentata la situazione di mercato per le tecnologie di accumulo esaminate e nella parte terza si riporta l'analisi economica da cui emerge la potenziale convenienza economica dei volani come sistema di accumulo stazionario presso i capolinea e dei SC per le applicazioni presso le fermate.

## 2.2 Aspetti tecnici di alcune tecnologie di accumulo

L'ampia varietà di opzioni e le caratteristiche complesse dei sistemi di accumulo, rendono difficile valutare quale tecnologia EES specifica sia più adatta a una particolare applicazione. Quindi, nonostante siano ampiamente riconosciuti i potenziali benefici dell'installazione di EES sul funzionamento del sistema elettrico, esistono alcune questioni operative da affrontare, prima di operare una scelta di investimento. Tali questioni possono essere riconducibili principalmente alla rispondenza degli aspetti tecnici ed economici della tecnologia EES rispetto all'applicazione interessata. I sistemi EES possono, distinguersi in base a diversi parametri, come ad esempio in funzione del modo in cui l'energia viene stoccata, la figura di seguito ne riassume il quadro.

Kinetic energy			Potential energy		
Thermal technologies	Electrical technologies	Mechanical technologies	Electrochemical technologies	Chemical technologies	
Hot water	Supercapacitors	Flywheels	Pumped hydro	Lithium Ion	Hydrogen
Molten salt	Superconducting magnetic energy		Compressed air energy	Lead acid	Synthetic natural gas
Phase change material				Redox flow	
				Sodium sulfur	

Source: "Electricity Storage Fact Book," SBC Energy Institute, September 2013.

Figura 21: Tecnologie per l'accumulo di energia

Fonte: Deloitte, "Electricity Storage – Technologies, impacts and prospects, Settembre 2015

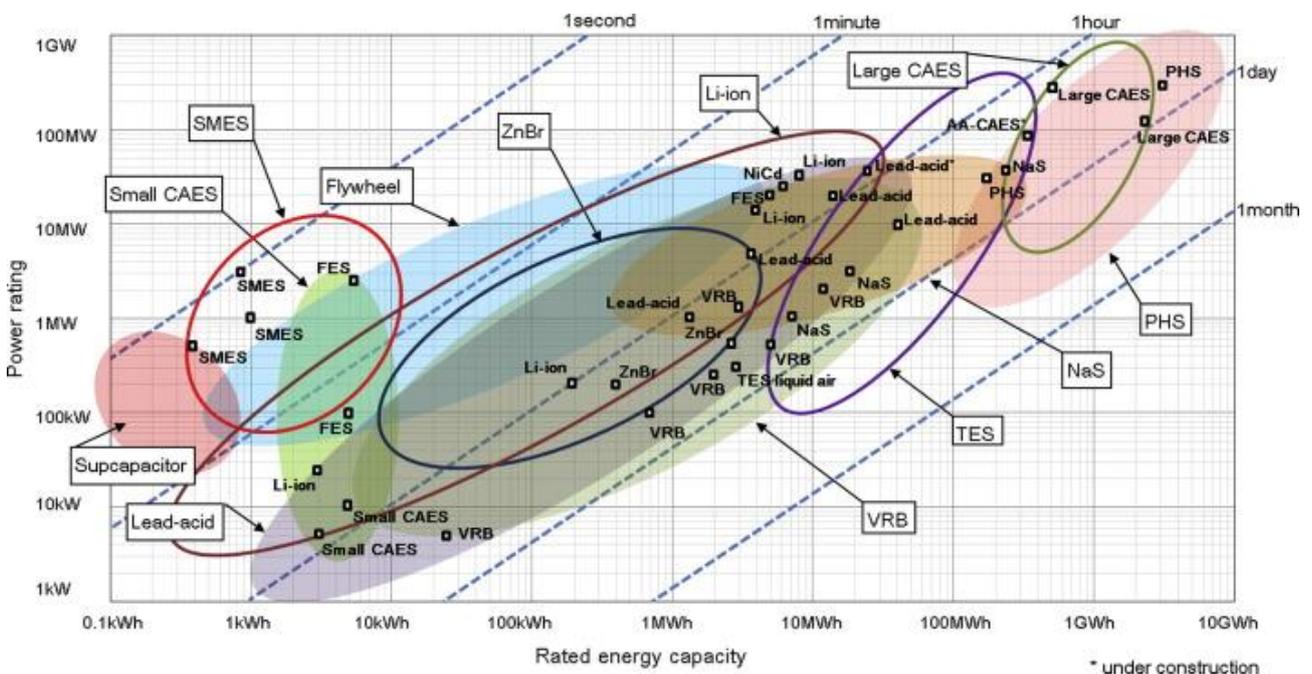


Figura 22: Confronto tra potenze e capacità e tempi di scarica delle tecnologie di accumulo

Fonte: Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation (op. cit [6])

I sistemi di accumulo devono sempre soddisfare almeno due requisiti fondamentali: quello relativo all'energia da immagazzinare/trasferire e quello della massima potenza. La Figura 22 mostra un confronto tra le potenze e le capacità energetiche nominali delle tecnologie EES, nonché i tempi di risposta, ossia la durata nominale della scarica ad una data potenza nominale. Lo spazio temporale viene indicato nell'intervallo che va dai secondi ai mesi. Nella classificazione si possono distinguere gli EES con tempi di scarica inferiore a 1 minuto come i volani ed i supercondensatori; quelli con tempi di scarica inferiore ad una ora come le batterie Li-ion, ecc.

Il livello di autoscarica di un sistema EES è altro fattore da considerare nel momento della scelta in quanto dovrà essere compatibile con il tipo di applicazione al quale è destinato. Ad esempio, nell'angolo in alto a destra del grafico si trovano i sistemi di accumulo che hanno rapporti di autoscarica giornalieri molto bassi, quindi è tecnicamente possibile che l'energia venga immagazzinata a lungo termine (fino a mesi); le batterie più convenzionali, nella parte centrale della figura, hanno indici di autoscarica giornalieri, oscillanti tra lo 0,03% al 5%, che consentono una durata dell'accumulo nel medio termine (giorni); gli accumuli che si concentrano nella zona sinistra del grafico, come i volani o flywheel (FES), i condensatori e i supercondensatori (SC), hanno un rapporto di autascarica giornaliero molto elevato, dal 10% al 100%, cioè, potrebbero completamente rilasciare l'energia immagazzinata dopo alcune ore o meno, quindi, possono essere utilizzati solo per applicazioni per le quali l'accumulo rimane stoccato per brevi periodi (fino ad alcune ore).

La Figura 23 riporta un confronto tra i livelli di efficienza e la durata, in termini di cicli di carica/scarica. In base alla forma di energia immagazzinata nel sistema, si nota che i sistemi meccanici come le flywheel e quelli elettrici come i supercondensatori, hanno tempi di ciclaggio molto elevati, in funzione delle loro componenti meccaniche, mentre i sistemi EES con immagazzinamento elettrochimico dell'energia come le batterie, hanno durate relativamente inferiori a causa del deterioramento chimico attraverso l'uso dell'accumulo, nonostante in generale, l'efficienza sia stata continuamente migliorata nel tempo attraverso attività di ricerca dedicata.

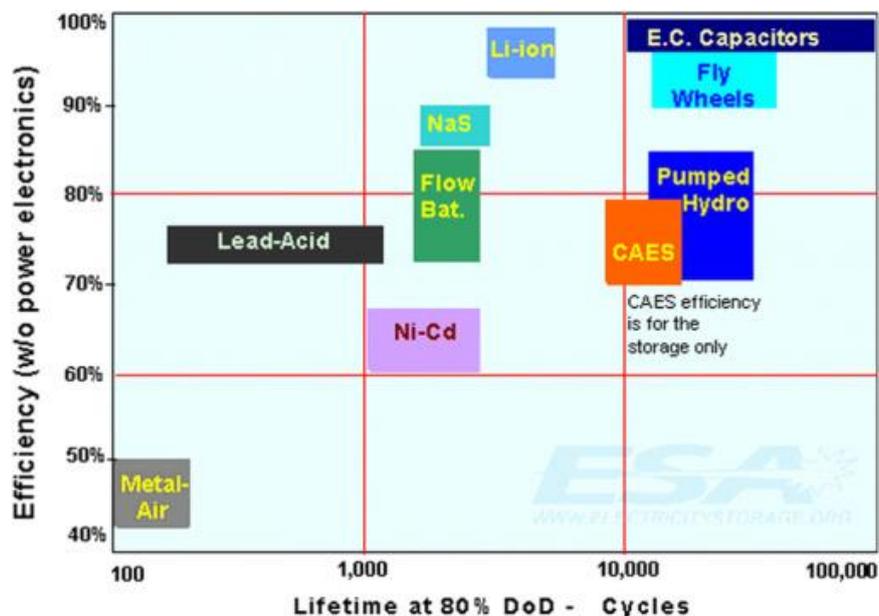


Figura 23: Confronto tra le durate e l'efficienza dei vari accumuli

L'analisi del presente lavoro verte sui sistemi di accumulo stazionari posti a integrazione dei sistemi di ricarica flash. Questo tipo di ricarica richiede potenze molto elevate (centinaia di kW) e tempi molto ristretti (dell'ordine dei secondi). I sistemi di accumulo ad esse associati dovranno essere, quindi, dimensionati non tanto per fornire l'energia necessaria, quanto piuttosto sulla potenza da erogare, in quanto questo

rappresenta il parametro più stringente. Le tipologie di accumulo che più si prestano a questo tipo di applicazioni possono essere:

1. Accumulo con supercondensatori;
2. Accumulo con volani.
3. Accumulo con batterie

I supercondensatori, le cui caratteristiche sono riportate, a titolo di esempio per un prodotto specifico, nella Tabella 7, hanno una elevatissima potenza specifica e possono essere scaricati in pochi secondi. L'applicazione naturale di questi dispositivi sono proprio quelle in cui si devono scaricare e ricaricare con i tempi paragonabili a quelli di una ricarica alla fermata di un autobus (20 secondi). Anche la vita utile (1 milione di cicli o 10 anni) è un altro fattore che ne incentiva l'impiego.

**Tabella 7: Specifiche Supercondensatori Skeleton**

**SKEL+ON**  
TECHNOLOGIES

DATA SHEET  
**SkelMod 170V**  
53F

- + Ultra-low ESR
- + Long lifetime - 1 million duty cycles
- + Integrated Ultracapacitor Management System for effective cell balancing
- + CAN bus communication
- + Liquid cooling
- + High Power output
- + IP66 Protection

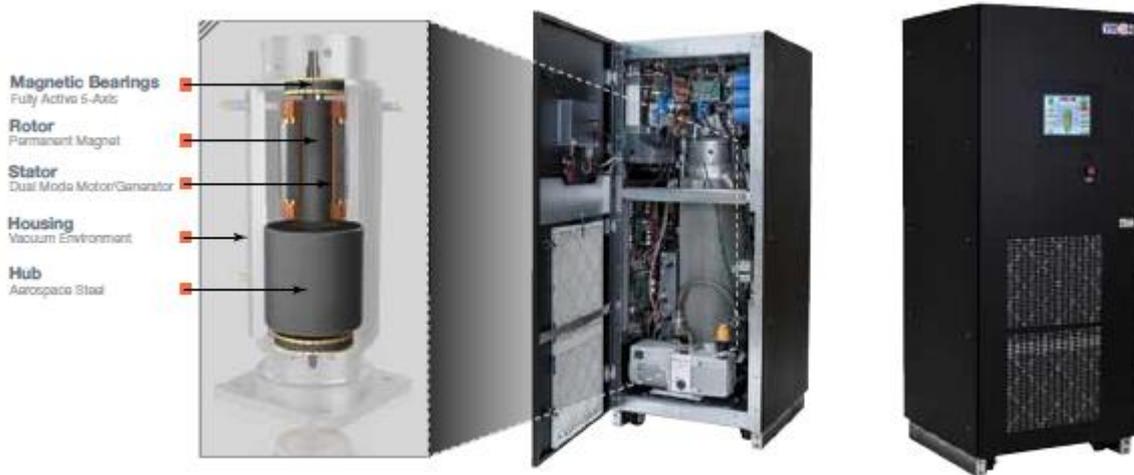


SMA170V53FAA TECHNICAL SPECIFICATIONS	UNIT	VALUE
<b>Electrical</b>		
Rated voltage $V_R$	V	170
Surge voltage	V	180
Minimum monitoring voltage	V	30
Rated capacitance	F	53
ESR (10 ms DC), rated	mΩ	9.4
ESR (AC 0.1 Hz), rated	mΩ	10.6
ESR IEC (IEC 62391-1B), rated	mΩ	10.0
Maximum series voltage	VDC	1000
Maximum peak current (for 1 s duration) <sup>1</sup>	A	2944
Short circuit current	kA	17.0
Maximum stored energy <sup>2</sup>	Wh	212.7
Cells in total	pcs.	60
Cell type		SCA3200
<b>Life</b>		
Life at 170 V and maximum operating temperature	1500 h	
Shelf life @ 23 °C, uncharged	10 years	
Projected cycle life at 23 °C between 170 V and 85 V	1 000 000 cycles	
<i>Capacitance decrease 20% from rated value; resistance increase 100% from rated value</i>		

Per potenze specifiche più basse mostrano invece i limiti di una tecnologia che ha una bassissima energia specifica, 3.4 Wh/kg contro i 90-150 delle batterie al litio-ferro-fosfato, ad esempio. Ulteriore elemento sfavorevole ai supercondensatori è anche rappresentato dall'elevato costo specifico e l'ampio spettro di oscillazione dello stesso (vedi Tabella 13) che ne impedisce l'uso per applicazioni ad alto contenuto energetico.

L'accumulo con volani è una tecnologia molto matura anche se non ha mai avuto un grande successo nel settore automotive. L'energia elettrica viene convertita da una macchina elettrica in energia meccanica facendo ruotare un volano con un suo momento di inerzia. I volani possono essere distinti in due categorie: quelli a bassa velocità ossia con velocità di rotazione inferiore a 10.000 giri al minuto (rpm) e quelli ad alta velocità, con una velocità di rotazione superiore a 10.000 giri al minuto (rpm). I volani a bassa velocità offrono un periodo di stoccaggio più breve dell'energia con capacità di potenza elevata, mentre i volani ad alta velocità sono l'opposto. Una recente applicazione di questa tecnologia è il Kinetic Energy Recovery System (KERS) utilizzato nelle monoposto della Formula 1. Nel caso di una applicazione stazionaria, il volano viene

messo in rotazione acquisendo energia elettrica e, durante la ricarica di un bus, questa energia cinetica viene riconvertita in energia elettrica.



**Figura 24: Schema di un accumulo basato su volani**

(Fonte: Mathew Aneke, Meihong Wang, Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review, Applied Energy, Volume 179, 1 October 2016, Pages 350-377 [2])

Per ridurre le perdite dovute agli attriti vengono utilizzati dei cuscinetti magnetici ciò consente a questa tecnologia di raggiungere alti livelli di efficienza. Applicazioni di questo tipo esistono negli Uninterruptible Power Supply (UPS) in cui risultano essere particolarmente performanti.

Infine, tra le batterie elettrochimiche più idonee ad essere integrate con un sistema di ricarica di tipo flash per le applicazioni a terra, dove non ci sarebbero limitazioni di peso e volume, possono annoverarsi le batterie ad alta potenza specifica. Nel presente studio si considerano due tipologie afferenti alla famiglia del litio, ossia le Litio-Ferro-Fosfato (LFP) in quanto molto diffuse e relativamente più economiche e le più recenti batterie al Titanato di litio (LTO). Una panoramica generale sulle caratteristiche tecniche delle batterie della famiglia del litio viene riportata nella Tabella 8 di seguito.

**Tabella 8: Caratteristiche di alcune tipologie di batterie al Litio per applicazioni automotive**

	Cell level specific energy (Wh/kg)	Cell level energy density (Wh/l)	Typical power (C-rate)	Approx. safety thermal runaway onset	Typical nominal potential (V)	Typical temp. range (ambient)	Year of introduction into market
LCO	175-240	400-640	-1C	150°C	3.6	-20 to 60°C	1991
NCA (EV)	130-240	490-670	2-3C	150°C	3.6	-20 to 60°C	1999
LFP (EV/PHEV)	90-150	190-300	5C cont 10C pulse	270°C	3.2	-20 to 60°C	1996
LFP (HEV)	70-110	100-170	30C cont 40C pulse	270°C	3.2	-30 to 60°C	1996
NCM (EV/PHEV)	100-200	260-400	3C cont 6C pulse	210°C	3.7	-20 to 60°C	2008
NCM (HEV)	70-100	150-200	10C cont 40C pulse	210°C	3.7	-20 to 60°C	2008
LTO	90-130	170-230	10C cont 60C pulse	Not susceptible	2.4	-30 to 75°C	2008
LMO (EV/PHEV)	150-240	240-360	3-10C	250°C	3.8	-20 to 60°C	1996

Le batterie LFP sono molto utilizzate come sistema di accumulo a bordo degli autobus oltre che per la loro economicità soprattutto per la maggiore sicurezza offerta anche se, fra le chimiche esistenti, non sono fra quelle più performanti. Le massime correnti di scarica si aggirano attorno ai 5C (ossia accettano fino a 5 volte

la capacità nominale, ovvero possono essere scaricate completamente in 1/5 di ora, vale a dire in 12 minuti), mentre le massima corrente in ricarica vengono di norma dichiarate a 1C (ricarica in un'ora). Hanno una tensione nominale di circa 3.2 V e una energia specifica compresa tra 90 e 150 Wh/kg. In precedenti PAR [3] sono state testate con correnti di ricarica a 3C e si è reso necessario un sistema di raffreddamento per convezione forzata ed accettando anche una riduzione della vita utile in quanto durante le prove si è osservata una riduzione della potenza specifica.

Le batterie al titanato di litio LTO sono attualmente quelle a maggiore potenza specifica in commercio e quelle che meglio delle altre possono rispondere a questo tipo di applicazione. Sono in grado di erogare correnti fino a 10C continuativamente e hanno, a livello operativo nominale, una vita più lunga rispetto alle altre chimiche. La tensione nominale è di 2.4 V, quindi hanno una energia specifica minore rispetto alle altre tipologie di celle, richiedendo maggiori volumi a parità di energia. Per una applicazione "a terra" questo non rappresenta un problema a differenza di quanto potrebbe invece verificarsi per un eventuale equipaggiamento a bordo di un veicolo.

La Tabella 9 di seguito raccoglie le principali caratteristiche delle tecnologie sopra descritte e per dare una idea del dimensionamento dei sistemi di accumulo esaminati. Nella Tabella 10 sono riportati gli output calcolati per un accumulo stazionario, nelle varie composizioni tecnologiche, a sostegno di un sistema di ricarica flash alla fermata relativamente a due tipi di e-bus, un minibus di 5.25 m e un bus articolato di 18 m. Si può notare come per le batterie, limitate in potenza, siano necessari grandi quantità di energia per aggirare tale limite e conseguentemente il pacco batteria dovrà essere sovradimensionato, anche di svariate volte, rispetto all'energia da erogare.

**Tabella 9: Caratteristiche dei sistemi di accumulo esaminati**

	Batterie	Supercondensatori	Volani [1]
Energia Specifica Wh/kg	90-150	3.4	10-30
Potenza Specifica W/kg	450-750	12.200	400-1.500
Vita utile	1.500-5.000	1.000.000 (10 anni)	>20.000 (15 anni)

I dati di input sono quelli già esaminati nel PAR2017 [1] per il minibus e per il bus articolato sono quelli dichiarati da ABB per il sistema TOSA ossia una ricarica da 600 kW per 20 secondi. Tenendo conto di un'efficienza di circa il 90% ed un dimensionamento maggiore del 20% per tener conto che anche per batterie a fine vita (perdita del 20% della capacità) il servizio deve ancora poter essere effettuato.

**Tabella 10: Esempio di 2 tipologie di bus con i diversi sistemi di accumulo a terra con le loro capacità**

	Minibus (Tecnobus Gulliver)	Bus 18 m
Energia da rifornire kWh	0.3	3
Tempo di ricarica s	20	20
Potenza massima kW	54	600
Capacità Litio LFP @5C kWh	15	160
Capacità Litio LTO @10C kWh	7.5	80
Volani kWh	1.2	12
Capacità Supercondensatori kWh	0.4	4

Per ricaricare 0.3 kWh a bordo di un minibus servono 15 kWh a terra di Litio-LFP e circa 7.5 di LTO, mentre per un bus da 18 m rispettivamente 160 e 80 kWh. Un accumulo basato su volani soffre di meno questa limitazione tanto da avere 1.2 kWh di energia a terra per il minibus e 12 per il 18 m. I supercondensatori, non soffrendo di alcuna limitazione in potenza, hanno meno bisogno di sovradimensionare il sistema di accumulo. Dal punto di vista tecnico quindi, la soluzione che meglio si sposa con una applicazione a terra a integrazione

di un sistema di ricarica flash sono nell'ordine: i supercondensatori per bassi quantitativi energetici, i volani per quantitativi energetici più consistenti e a metà strada stanno le batterie elettrochimiche al litio.

L'aspetto economico è l'altro aspetto che condiziona la scelta d'investimento e le caratteristiche tecniche che incidono sulle grandezze economiche sono individuate, in termini relativi rispetto al costo specifico della tecnologia stessa, nel tempo di vita utile o numero di cicli di carica scarica, nell'efficienza del sistema, nei tempi di risposta e nel grado di autoscarica. Quindi a fronte delle diverse caratteristiche tecniche delle tecnologie a confronto si rende necessaria una specifica valutazione economica, in grado di stabilire quale sia la tecnologia più conveniente e a quali condizioni.

### 2.2.1 Test preliminari su celle NMC- LTO

Sono stati effettuati test preliminari di carica e scarica a correnti simmetriche con  $C_{rate} > 1$  su celle NMC-LTO (a cui ci riferiremo in seguito semplicemente come LTO). Nello specifico, si tratta di celle ai polimeri di litio con chimica NMC-111 al catodo e titanato di litio (LTO) all'anodo, con collettori in alluminio e elettrolita composto da 1M Litio esafluorofosfato in carbonato di etilene: dimetil carbonato (1:1 vol.%) con 2% vinil carbonato, che sono state costruite su apposita commissione. Le specifiche elettrico-energetiche sono riportate in Tabella 11.

I principali vantaggi di un anodo LTO sono la capacità di sostenere correnti di scarica maggiori, l'ampio intervallo di temperature di funzionamento, una resistenza interna intrinseca bassa e una durata di vita lunga. Questa tecnologia è più sicura rispetto alla grafite in quanto più stabile nei confronti di fenomeni di sovraccarica. Tuttavia, le celle con questo anodo hanno una densità di energia minore rispetto ai sistemi basati sulla grafite e un potenziale di lavoro più basso.

**Tabella 11: Specifiche delle celle LTO/NCM utilizzate**

<b>Tensione nominale</b>	2.5 V
<b>Tensione massima</b>	2.8 V
<b>Tensione minima</b>	1.7 V
<b>Capacità</b>	18 Ah

Il protocollo del costruttore prevedeva di eseguire un ciclo iniziale di carica e scarica della batteria a  $C_{rate} = C/10$ , dopo del quale è stato eseguito un test per valutare la capacità e la resistenza interna.

I test hanno evidenziato una visibile variabilità fra i valori iniziali della capacità per le cinque celle analizzate, riportati in Tabella 12. In particolare, si può notare che i risultati per la cella 3 si discostano notevolmente dagli altri valori. Ulteriori indagini e test effettuati sulla cella hanno dato esito negativo riguardo la possibilità di essere utilizzata e quindi è stata scartata.

**Tabella 12: Valori iniziali delle capacità per le celle LTO/NCM analizzate.**

Batteria	C0 C/2	C0 1C
1	17.83867	17.127
2	15.743	14.937
3	12.73833	6.4525
4	16.17633	15.012
5	17.33467	16.4825
6	16.557	15.7035
7	17.577	16.798
8	18.00733	17.27
9	16.85267	16.0035
10	17.128	16.329

In ogni caso, i risultati ottenuti evidenziano che la variabilità delle celle LTO è molto ampia: a titolo esemplificativo, il valore dello scarto quadratico medio campionario corretto è circa doppio rispetto a quello ottenuto per delle celle commerciali analoghe (sebbene con differente tecnologia all’anodo) in nostro possesso. Inoltre, i risultati preliminari per la durata di vita di ciclo di una delle celle LTO (#1), condotti per un’altra attività della RSE [1], non risultano essere in linea con quanto riportato nella letteratura esistente. Queste evidenze pongono dubbi sulla qualità delle celle LTO e quindi ci portano a considerare tutti i risultati con estrema cautela.

Data questa premessa, abbiamo comunque deciso di verificare quale sia l’efficienza energetica di queste celle quando ricaricate con correnti maggiori di 1C. La ricarica avviene a corrente costante (carica CC) e si interrompe quando la tensione arriva al limite superiore di funzionamento.

Poiché le schede tecniche delle celle non riportavano le correnti massime in carica e scarica consentite, abbiamo adottato un approccio conservativo, iniziando con correnti di carica e scarica pari a 2C. In Figura 25 è riportato l’andamento della carica cumulativa per una cella completamente carica (cella n. 8) scaricata e caricata a 2C per 4 volte e successivamente sottoposta a un test standard per la capacità (carica 0.5C-scarica 1C seguito da carica 0.5C-scarica 0.5C, con carica di tipo CC-CV<sup>2</sup>). Il test è stato compiuto sotto cappa, ad una temperatura ambiente compresa fra i 16 e i 18 gradi centigradi.

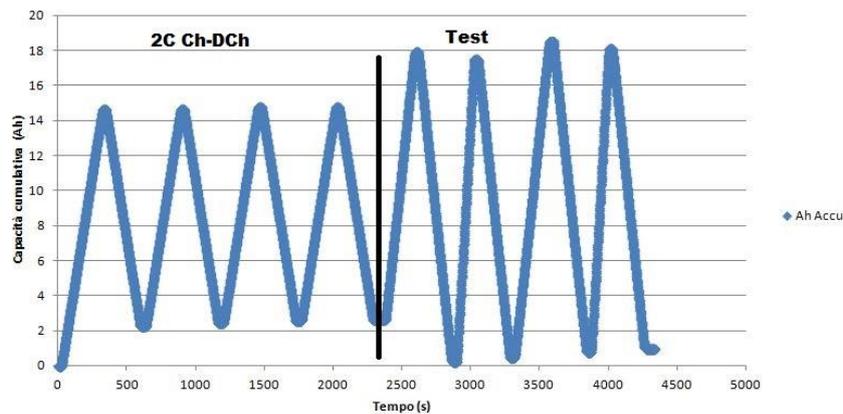
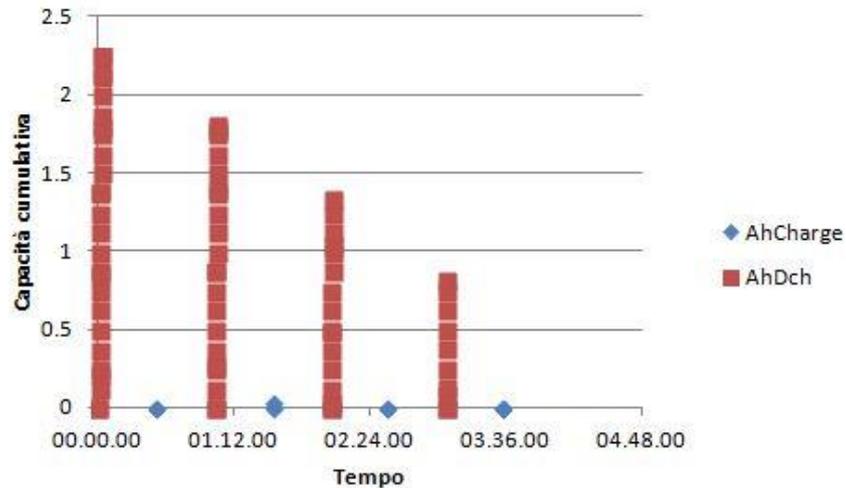


Figura 25: Andamento della capacità al variare del tempo per la cella numero 8.

Con cicli di carica e scarica a 2C la carica cumulativa che viene erogata è pari a circa il 73% della capacità misurata con cicli standard, come si può vedere dalla Figura 25. Per quanto riguarda il rendimento energetico, per i cicli a 2C il rendimento medio è del 77%, mentre per i cicli standard otteniamo un rendimento energetico medio pari al 92%.

Abbiamo quindi proceduto ad applicare alla cella una serie di cariche e scariche a 5C. I risultati per la carica cumulativa sono riportati in Figura 26. Come si può vedere, la quantità di carica cumulativa ottenuta in scarica è molto piccola (in media, meno di 1/10 della capacità disponibile), mentre in ricarica la batteria raggiunge immediatamente la condizione di fine carica sulla tensione e non riesce a caricare nessuna quantità di carica.

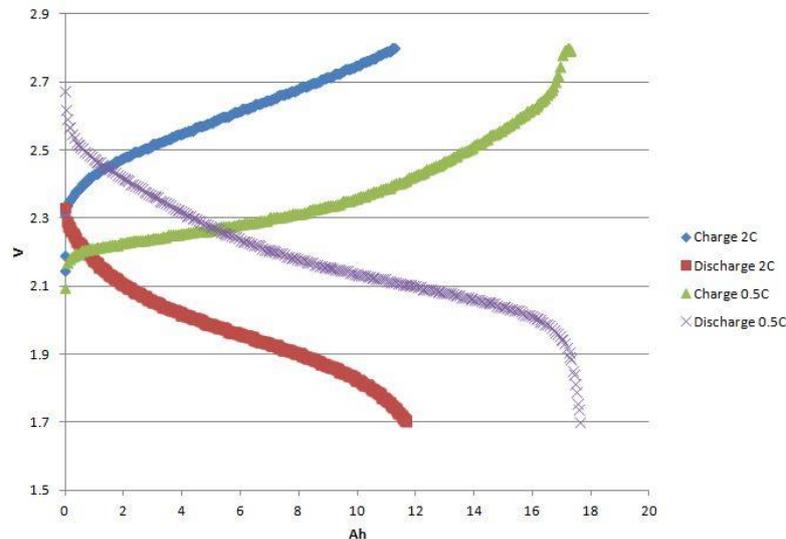
<sup>2</sup> Carica CC-CV prevede una prima fase di carica a corrente costante fino al raggiungimento del valore limite di tensione, seguita da una carica a tensione costante in cui la corrente diminuisce gradualmente fino al raggiungimento di un limite inferiore e/o di una tensione limite di sicurezza.



**Figura 26: Capacità cumulativa in carica e scarica della cella numero 8 per correnti pari 5C**

Il test di capacità eseguiti su questa cella hanno però evidenziato il malfunzionamento della stessa. Questo malfunzionamento potrebbe essere anche dovuto ad un superamento dei limiti di funzionamento per le correnti, che però non sono stati forniti dal fabbricante. Abbiamo quindi provveduto a ripetere le prove con un'altra cella (numero 7), mantenendo però cautelativamente la corrente massima delle prove a 4C.

Anche in questo caso, la prima prova vita è stata fatta con un ciclo vita a 2C. La curva caratteristica di carica-scarica, che rappresenta l'andamento della tensione in funzione della carica cumulativa durante i cicli, è riportata in Figura 27. Il rendimento energetico che si ottiene è simile al caso precedente (77% per il ciclo a 2C e 91% per il ciclo standard), così come pure il rapporto fra la carica cumulativa del ciclo a 2C e del ciclo standard (71%).



**Figura 27: Curva caratteristica di carica e scarica per la cella 7**

È interessante notare che il comportamento della cella durante il ciclaggio dipende dalla temperatura esterna. Per verificarlo, abbiamo eseguito il test vita a 2C in camera climatica ad una temperatura  $T=35^{\circ}\text{C}$ . I risultati dei test sono riportati in Figura 28. Come si può vedere, i valori di capacità ottenuti quando la cella è immersa in un bagno termico a  $35^{\circ}\text{C}$  risultano molto vicini ai valori nominali di capacità. Inoltre, questo aumento della capacità cumulativa è più spiccato per correnti di carica e scarica più alte [4].

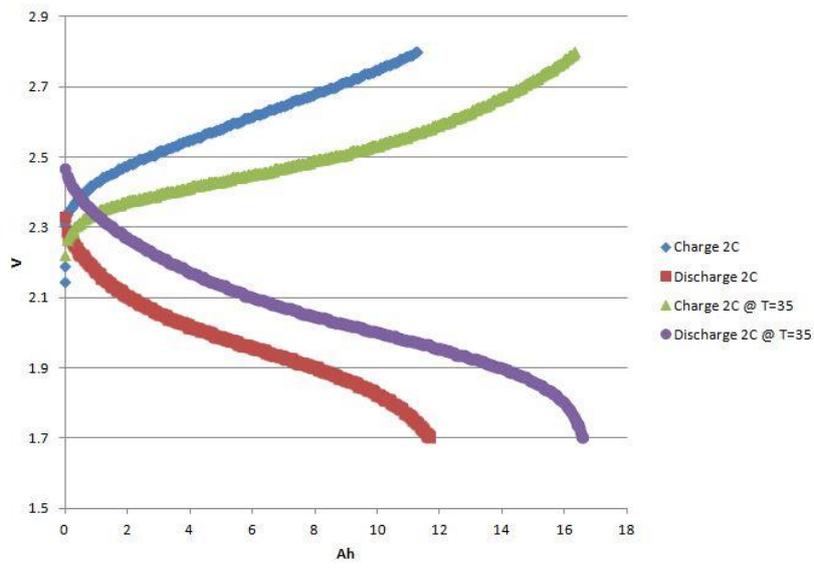


Figura 28: Curva caratteristica per la cella 7 a diverse temperature.

L'effetto della temperatura si ripercuote anche sul rendimento energetico, che passa dal 71% all'83% per cicli a 2C, e dal 91% al 95% per i cicli standard, mentre la carica cumulativa erogata a 2C è circa l'89% di quella erogata rispetto al ciclo standard (rispetto al 71% del caso a temperatura non controllata).

La cella è stata successivamente sottoposta a cicli vita con correnti di carica e di scarica pari a 4C. La curva caratteristica è riportata in Figura 29. Come è possibile notare, la tensione di inizio carica a 4C è notevolmente più alta rispetto a quella a 0.5C, mentre avviene l'inverso per la tensione iniziale di scarica. Questo è dovuto al fatto che la batteria è in grado di scambiare solo una frazione limitata della quantità di carica potenzialmente disponibile quando viene sollecitata con correnti di 4C.

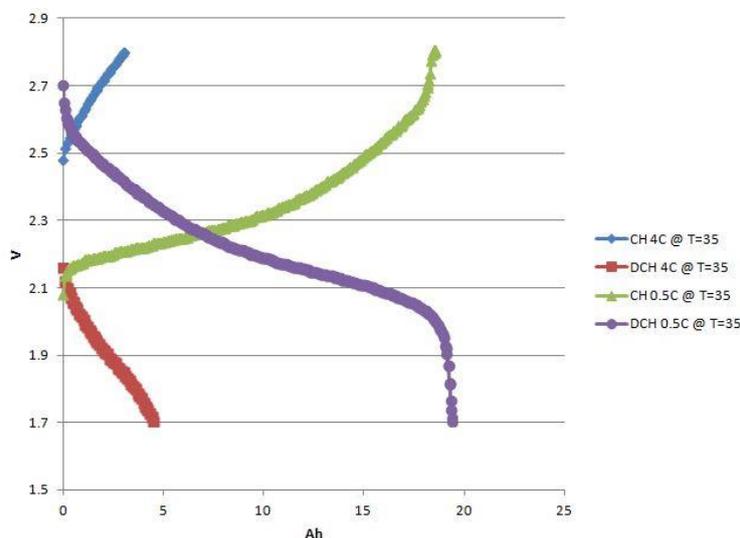


Figura 29: Curva caratteristica per la cella 7 a T=35C

Per quanto riguarda il rendimento energetico, per i cicli a 5C otteniamo un rendimento dell'88%. Tuttavia questo valore è presumibilmente dovuto al fatto che la batteria è carica solo parzialmente e il ciclatore riesce quindi ad erogare sufficiente carica prima del raggiungimento della tensione limite. La quantità di carica erogata durante un ciclo a 5C, tuttavia, è solo il 28% di quella erogata durante un ciclo standard.

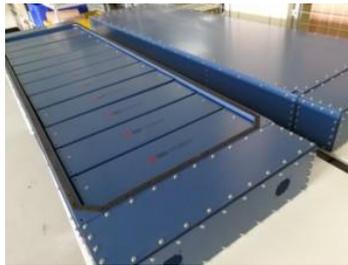
Sono necessarie ulteriori prove su celle commerciali per approfondire il comportamento delle celle LTO sottoposte a cicli di carica e scarica con correnti superiori a 5C.

### 2.3 Aspetti di mercato delle tecnologie di accumulo esaminate

L'ipotesi di equipaggiare una stazione di ricarica su un nodo (capolinea o fermata) lungo una linea di trasporto pubblico locale con un accumulo stazionario a terra, è stata indagata dal punto di vista economico, ponendo a confronto diverse soluzioni tecnologiche e applicando l'analisi su una ipotetica linea di trasporto pubblico elettrificata con l'architettura C (ricarica al deposito, al capolinea e alle fermate). Il confronto pone l'accento tra accumuli elettrochimici LTO, accumuli elettrici di tipo SC e meccanici di tipo Flywheel Energy Storage (FES) o volani.

In termini di costi operativi e di operatività, i volani sono considerati un modello perfetto di dispositivo di accumulo di energia grazie al basso costo di manutenzione, al lungo ciclo di vita, all'elevata efficienza, all'ampio intervallo di temperatura accettata e all'aspetto ecologico. A causa delle perdite per attrito, i volani non sono adatti per l'accumulo di energia a lungo termine e la presenza di forze di attrito ne riduce l'efficienza durante il funzionamento.

I supercondensatori iniziano ad essere considerati come valida alternativa alle batterie per applicazioni nei servizi di trasporto pubblico locale filoviario o tranviario, dove consentono di poter far a meno della linea aerea ricaricando oltre che con il recupero di frenata, anche presso le stazioni di potenza posizionate ai nodi e non necessariamente ad ogni fermata. Ciò è quanto ad esempio è stato realizzato in Cina<sup>3</sup> dove è stato costruito un sistema prototipale per la gestione dell'energia che prescinde dalla linea catenaria. Per la realizzazione di questo progetto, sono stati testati piccoli prototipi di diversi tipi di accumulo di energia fino a che la scelta non è caduta sul prototipo con supercondensatori per le caratteristiche di lunga vita, ingombro, peso e costo, comparato naturalmente al sistema di riferimento con linea aerea.



**Figura 30: Un sistema di gestione dell'energia costruito da CRRC in Cina, basato sulla tecnologia prototipale fornita da CSIRO**

I paesi maggiormente avanzati nel campo dei supercapacitori sono la Corea del Sud, gli Stati Uniti, il Giappone e la Cina dove ad oggi circolano regolarmente autobus con supercapacitori a bordo e esistono a livello mondiale solo una dozzina di industrie in grado di produzioni su larga scala. Il trend attuale vede molte industrie collaborare con l'azienda produttrice cinese CSR Zhuzhou per sviluppare tram senza linea aerea e autobus equipaggiati con SC e ricarica ultrafast. Il voltaggio più alto che i moduli riescono a raggiungere è pari a 1.500 V.



**Figura 31: Supercapacitor CSRCAP 7500 Farads (sinistra) e CSRCAP 60V supercapacitor module(destra)**

I bus elettrici con supercondensatori sono molto comuni in Cina dove ad esempio la società cinese Sunwin, una joint venture tra Volvo e la più grande casa automobilistica cinese SAIC, aveva fornito nel 2010, 61

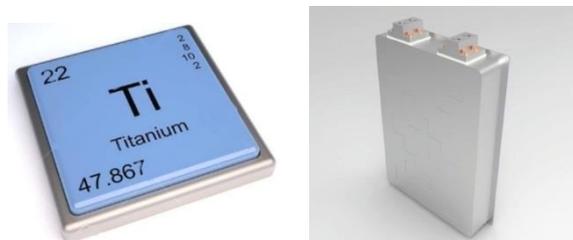
<sup>3</sup><https://infrastructuremagazine.com.au/2018/09/12/the-energy-technology-that-could-overhaul-tram-systems/>

autobus elettrici che utilizzavano i supercondensatori per servire l'Expo mondiale 2010 di Shanghai. Questi bus avevano un'autonomia da 3 a 6 km e venivano ricaricati ad ogni fermata per 30-80 secondi per ricaricare dal 50% al 100% dell'energia accumulata. Sempre in Cina, nel 2015 sono entrati in operatività altri bus equipaggiati con supercapacitori che in 10 secondi ricaricano totalmente l'accumulo. Questi bus viaggiano su una linea di 11 km e 24 fermate e ogni ricarica consente di percorrere fino a 5 km consumando dal 30% al 50% di energia in meno rispetto agli altri veicoli elettrici.



**Figura 32: Super Capacitor Buses in Shanghai**

Le batterie LTO sono significativamente più costose rispetto alle altre tipologie di accumulo afferenti alla famiglia del litio, a causa di un processo di produzione più impegnativo e al materiale usato nell'anodo: il titanato. Tuttavia, tendono ad essere longeve (nella maggior parte dei casi a durare 10.000 cicli o più) e accettano livelli di carica/scarica, C-Rates, molto alti rendendoli adatti per applicazioni che richiedono alti impulsi di potenza con cicli frequenti, offrono il più alto rapporto tra energia e peso rendendosi utile in applicazioni che richiedono una batteria leggera. La bassa densità di energia, però le rende meno adatte per equipaggiare veicoli per le lunghe percorrenze. Per ovviare a questo limite, la ricerca sta indagando altre soluzioni, ad esempio un team del Centro di Ricerca e Sviluppo Aziendale di Toshiba a Kawasaki, in Giappone, ha sviluppato un elettrodo composito ad alta densità all'ossido di niobio di titanio,  $TiNb_2O_7$  (HD-TNO). Come riportato in un articolo sul Journal of Power Sources<sup>4</sup>, gli anodi hanno evidenziato una densità energetica elevata, una lunga durata del ciclo e un'alta capacità volumetrica, maggiore anche rispetto agli anodi compositi LTO. Oltre alla bassa densità, un altro inconveniente è individuabile nella dipendenza del ciclo di vita rispetto alla temperatura che possono raggiungere, per la quale spesso richiedono uno speciale circuito di protezione per evitare sovraccarichi, che richiede investimenti aggiuntivi. Questi elementi, insieme al costo del capitale seppur in fase discendente, ne limitano l'uso per le applicazioni di grande capacità.



**Figura 33: Titanium used for Lithium Titanate Oxide anodes (sinistra) e Example of a LTO cells for high current applications (destra)**

I principali produttori di LTO includono Toshiba, Microvast, Altairnano, Leclanche e Liacon. Altairnano è stata la prima ad annunciare la svolta della tecnologia nano-strutturata della batteria al litio titanato nel febbraio

<sup>4</sup> [https://www.researchgate.net/profile/Ryoji\\_Inada/publication/268819313\\_Characterization\\_of\\_mixed\\_titanium-niobium\\_oxide\\_Ti2Nb10O29\\_annealed\\_in\\_vacuum\\_as\\_anode\\_material\\_for\\_lithium-ion\\_battery/links/5a6576baaca272a1581f2be9/Characterization-of-mixed-titanium-niobium-oxide-Ti2Nb10O29-annealed-in-vacuum-as-anode-material-for-lithium-ion-battery.pdf?origin=publication\\_detail](https://www.researchgate.net/profile/Ryoji_Inada/publication/268819313_Characterization_of_mixed_titanium-niobium_oxide_Ti2Nb10O29_annealed_in_vacuum_as_anode_material_for_lithium-ion_battery/links/5a6576baaca272a1581f2be9/Characterization-of-mixed-titanium-niobium-oxide-Ti2Nb10O29-annealed-in-vacuum-as-anode-material-for-lithium-ion-battery.pdf?origin=publication_detail)

2005<sup>5</sup>. Sostituendo questo materiale al carbonio ha ottenuto migliori prestazioni e aumentato notevolmente il potenziale di impiego per le applicazioni di accumulo dell'energia. Leclanché è uno storico produttore svizzero di batterie e nel 2014 ha lanciato il "TiBox" sul mercato. Il contenuto di potenza del "TiBox" è 3.2kWh con 15.000 cicli<sup>6</sup>. Microvast è un produttore di batterie fondato a Houston, in Texas nel 2006. LpTO è una batteria LTO modificata da Microvast. A partire dal 2011, la prima flotta di bus di ricarica ultraveloce al mondo è stata lanciata a Chongqing, in Cina. Un sistema di batterie LpTO da 80 kW è installato su 37 unità di bus elettrici da 12 metri e possono essere caricate completamente in 10 minuti con un caricabatterie da 400 kW. A partire dal 2014, un autobus Wrightbus OEM britannico ha iniziato a utilizzare batterie Microvast LpTO per 1000 unità di Double Routemaster. A partire dal 2015, è stato lanciato il progetto europeo ZeEUS (sistema di trasporto urbano a emissioni zero) e la VDL ha impiegato il sistema di batterie LpTO da 62,5 kWh di Microvast come sistema di ricarica rapida per il suo progetto dimostrativo. A partire dal 2016, il più grande porto automatizzato del mondo - PSA TUAS ha iniziato a utilizzare Microvast LpTO per 22 AGV puramente elettrici come prima fase del progetto per il trasporto orizzontale di container. Gli analisti ipotizzano che le batterie basate sul LTO domineranno il mercato dei veicoli elettrici nel prossimo futuro. Sia le aziende produttrici di batterie sia i produttori di veicoli hanno iniziato a investire enormi somme di denaro su questa nuova tecnologia quindi è molto probabile doversi aspettare che le batterie al litio titanato rivoluzioneranno il mercato al pari delle batterie agli ioni di litio. La Cina sta assistendo a un mercato in crescita di batterie al litio titanato, guidate dagli investimenti nei principali produttori cinesi del settore. Le aziende, come Hitachi High Technologies, offrono macchine di assemblaggio di batterie agli ioni di litio a diversi prezzi e con diverse capacità di produzione e possono arrivare a produrre fino a 1-2 milioni di pezzi al mese.

Ad oggi occorre sottolineare che nonostante gli sviluppi della ricerca e del mercato, la maggior parte delle tecnologie di accumulo dell'energia è ancora molto onerosa dal punto di vista economico. Ciò è vero a maggior ragione se si considera il fatto che queste tecnologie sono utilizzate per l'accumulo di un bene relativamente economico come è l'energia elettrica. Diversi studi [2,5,6] come ad esempio quelli riportati nella Tabella 13 e nella Figura 34 di seguito mostrano i risultati economici dell'analisi per le varie tipologie di accumulo in termini di potenza (\$/kW) e per unità di capacità energetica (\$/kWh) evidenziando anche una notevole variabilità a seconda delle fonti di letteratura oltre che per la tecnologia stessa. Un altro studio del 2016 [6], come riportato nella Tabella 14, mostra la gamma di prezzi della batteria a livello di cella per le principali chimiche in uso oggi. In linea di massima, il volano, in particolare quelli più sofisticati e i supercondensatori hanno un basso costo capitale per unità di potenza al contrario hanno elevati investimenti in capacità energetica che li rende adatti per applicazioni che richiedono un'elevata potenza per brevi periodi, mentre le batterie sono probabilmente la soluzione più economica quando il numero di cicli è basso. Anche per quanto riguarda i costi operativi la variabilità può essere un elemento importante e dipendente da numerose variabili, ad esempio i sistemi di accumulo su larga scala possono richiedere alti costi di manodopera mentre un sistema di batterie su piccola scala potrebbe non necessitare di alcun intervento. Ma oltre all'aspetto economico, un altro elemento ostacolo allo sviluppo del settore è relativo all'indisponibilità di standard per le connessioni fisiche di diverse soluzioni di accumulo di energia alla rete elettrica. In base ad un recente studio della McKinsey<sup>7</sup>, la maggior parte degli esperti del settore concorda sul fatto che i prezzi per lo stoccaggio di energia cadrà nei prossimi anni, ma non sono d'accordo su quanto lontano e quanto rapidamente. Questo è un dibattito importante perché un calo significativo dei prezzi dei sistemi di accumulo potrebbe avere effetti di ampia portata sui settori industriali direttamente e indirettamente interessati e sulla collettività in generale.

<sup>5</sup> <https://altairnano.com/solutions/>

<sup>6</sup> [http://www.leclanche.com/fileadmin/user\\_upload/markets\\_solutions/home\\_small\\_business/leclanche\\_tibox\\_en\\_2014-11-03.pdf](http://www.leclanche.com/fileadmin/user_upload/markets_solutions/home_small_business/leclanche_tibox_en_2014-11-03.pdf)

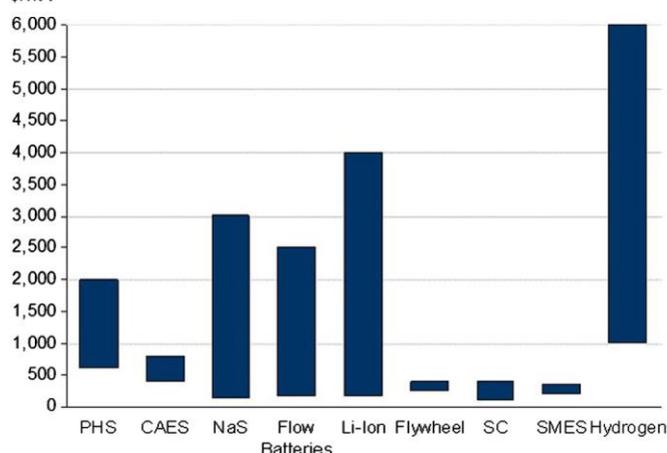
<sup>7</sup> Battery technology charges ahead, McKinsey, 2012.

**Tabella 13: Aspetti economici e di maturità tecnologica per le alternative esaminate**

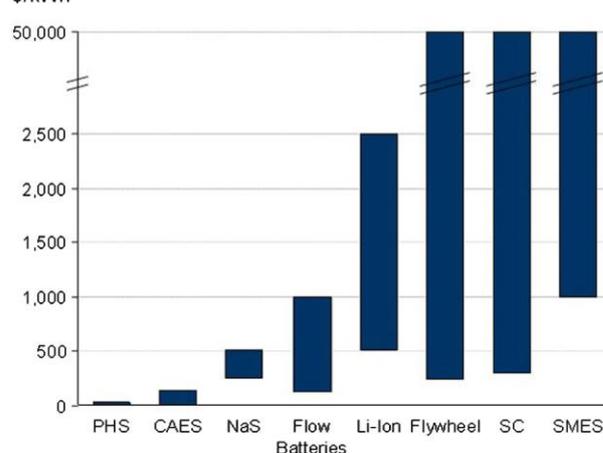
		Flywheel	Li-ion	SMES
<b>Power capital costs</b>	\$/kW	250–350	1.200–400, 900–1.300, 1.590	200–300, 300,380–489
<b>Energy capital cost</b>	\$/kWh	1.000–5.000, 1.000–14.000	600–2.500, 2.770–3.800	1.000-10.000; 500-72.000
<b>Maturity*</b>	2014	Early commercialized	Demonstration	Developing/demo.
<b>Maturity**</b>	2016	Commercial	Demonstration	Developed
<b>Application area</b>		Promising: Transportation applications	Transportation applications	Transportation applications

Fonte: Elaborazione ENEA di op. cit [2,5]

**CAPITAL COSTS\* OF POWER**  
\$/kW



**CAPITAL COST \*\* OF ENERGY**  
\$/kWh



**Figura 34: Costo di investimento specifici per unità di potenza e di capacità per EES**

**Tabella 14: Range di costo delle batterie elettrochimiche**

	Cell-Level \$/KWh in 2015	Cell-Level \$/KW in 2015	Expected Deep Discharge Cycle Life	Average Capital Cost per KWh Delivered Over Lifetime of System
Advanced Lead Acid	450-600	113-150	1200	0.44
Deep Cycle Lead Acid	280-400	70-100	400	0.85
LFP Lithium Ion	290-550	145-275	1500	0.28
LTO Lithium Ion	1280-2000	427-500	15000	0.11
NMC Lithium Ion	245-500	123-250	2000	0.19
Vanadium Redox Flow	800-1200	134-200	12000	0.08
Aqueous Zinc	220-250	55-63	2500	0.07
Zinc Bromine Flow	600-900	150-225	1500	0.50

Source: Cairn ERA

*Figure 3 – Battery Chemistry Technology Choices and cell level pricing ranges. Prices are listed on a US Dollar per KWh range based on nameplate capacity. Prices are stated in \$/kWh (energy capacity) and on \$/KW (power capacity), based on maximum C-Rate capability of each battery. Average Capital Cost per KWh Delivered is based on the average capital cost for the battery on the cell level, divided by the expected number of cycles the battery cell will be able to perform in its lifetime before 20% of the energy capacity experiences degradation.*

Fonte: Copper Alliance (op. cit [6])

## 2.4 Analisi economica integrazione della ricarica al capolinea e alle fermate con diversi sistemi di accumulo stazionari

L'ipotesi di equipaggiare una stazione di ricarica su un nodo lungo la linea (capolinea o fermate) con un accumulo stazionario a terra è stata indagata dal punto di vista economico, ponendo a confronto diverse soluzioni tecnologiche e applicando l'analisi su una ipotetica linea di trasporto pubblico elettrificata con l'architettura C (ricarica al deposito, al capolinea e alle fermate). In particolare per questo tipo di architettura di elettrificazione, le potenze impegnate alle fermate per la ricarica autobus elettrici sono potenzialmente molto onerose per la rete di distribuzione di energia elettrica e ciò si ripercuote in termini di costi per l'utente finale. La convenienza economica dell'integrazione con EES di tipo LFP dei sistemi di ricarica ai nodi è stato affrontato per le architetture di elettrificazione di tipo A e B in un report specifico del programma di Ricerca di Sistema, dal quale è emersa la non economicità dell'operazione dato i costi ancora elevati della realizzazione dei sistemi di accumulo stazionario, il più alto consumo di energia per la maggiore inefficienza del sistema e per l'assenza di sistemi di incentivazione o di remunerazione per il servizio reso alla rete. In questo lavoro si intende indagare invece la possibilità di supportare la ricarica dei nodi capolinea e fermate dell'architettura di elettrificazione di tipo C di una linea di trasporto servita da bus di 18 metri, con diverse tecnologie di accumulo stazionario. Il confronto pone l'accento tra accumuli elettrochimici LTO, accumuli elettrici di tipo SC e meccanici di tipo Flywheel Energy Storage (FES) o volani. L'accumulo a bordo degli autobus è costituito da batterie LTO. I principali dati di input tecnici ed economici che riguardano indistintamente tutti i casi analizzati, sono riportati nella Tabella 15. Il consumo del bus di 18 metri è stato derivato in maniera proporzionale al rapporto della massa limite complessiva a pieno carico di un veicolo come individuata dal nuovo codice della strada<sup>8</sup>, tra i veicoli fino a 19 t, categoria nella quale rientrano gli autobus di 12 metri e veicoli articolati con peso fino a 25 t, categoria nella quale rientrano gli autobus di 18 metri. Il rapporto tra le due masse veicolari indica un maggior peso dei bus articolati rispetto agli altri pari al 32%. Questa relazione è ragionevolmente applicabile anche al rapporto tra i consumi energetici dei veicoli stessi. A riprova del dato, è stato calcolato il rapporto tra la massa dei veicoli di 12 e 18 metri, assunti a riferimento nel software BEST nel quale viene ipotizzato un tasso di carico pari al 70%. In questo caso e a parità di condizioni, dal rapporto si desume che il consumo dei veicoli di 18 metri sono maggiori del 27% rispetto a quelli di 12 metri, dato del tutto compatibile con il precedente e applicato al caso in esame.

**Tabella 15: Dati tecnici ed economici di input**

Dati tecnici generali di input		
Consumo specifico	<i>kWh/km</i>	1,65
Lunghezza linea	<i>km</i>	16
Frequenza oraria	<i>bus/h</i>	3
Ore di servizio al giorno	<i>h</i>	16
Tempo disponibile ricarica del bus al capolinea	<i>minuti</i>	8
Tempo disponibile ricarica accumulo di terra al capolinea	<i>minuti</i>	4
Tempo disponibile ricarica del bus a fermate	<i>secondi</i>	20
Tempo disponibile ricarica accumulo di terra alle fermate	<i>minuti</i>	3
Giorni di servizio all'anno	<i>n.</i>	330
Rendimento ricarica da rete	<i>%</i>	90
Rendimento accumulo terra volani e SC	<i>%</i>	83
Rendimento accumulo terra LTO	<i>%</i>	72
Potenza max ricarica a capolinea	<i>kW</i>	50
Potenza massima di ricarica a fermate	<i>kW</i>	600

<sup>8</sup> <http://www.aci.it/i-servizi/normative/codice-della-strada/titolo-iii-dei-veicoli/art-62-massa-limite.html>

Rate massimo ricarica LTO	C	10
Rate massimo ricarica LFP	C	5
Rate massimo ricarica SC	C	indefinito
Rate massimo ricarica volani	C	50
n. cicli in v.u. Volani	n.	50.000
n. cicli in v.u. LTO (effetto Crate)	n.	3.500 <sup>a</sup>
n. cicli in v.u. LTO (effetto sovradimensionamento alla fermata)	n.	5.000 <sup>b</sup>
n. cicli in v.u. SC	n	1.000.000
Dati economici generali di input		
Costo accumulo bordo LTO	€/kWh	650 <sup>3</sup>
Costo accumulo a terra LTO	€/kWh	980 <sup>4</sup>
Costo accumulo SC	€/kWh	15.000 <sup>5</sup>
Costo accumulo a terra FW	€/kW	340 <sup>4</sup>
Tasso di sconto	%	5
Periodo osservazione	anni	12

<sup>a</sup>a titolo precauzionale la durata della batteria LTO sottoposta a elevati stress di carica/scarica viene assunta pari a 3.500

<sup>b</sup>si assume che nel caso in cui l'accumulo a terra sia sovradimensionato per il doppio la vita utile delle celle LTO possa arrivare a 5.000 cicli.

<sup>1</sup> <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/#toc-download>

<sup>2</sup> Elaborazione ENEA su dati dell'International Renewable Energy Agency (IRENA), 2017

<sup>3</sup> Elaborazione ENEA su dati: [https://copperalliance.org/wordpress/wp-content/uploads/2017/03/Cu0242\\_AN\\_Behind-Meter-Energy-Storage-Systems\\_v1.pdf](https://copperalliance.org/wordpress/wp-content/uploads/2017/03/Cu0242_AN_Behind-Meter-Energy-Storage-Systems_v1.pdf) (2016) e BNEF 2018

<sup>4</sup> Elaborazione ENEA su dati: Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review[op. cit. [2]]

Quindi partendo da un consumo specifico di 1,3 kWh/km del bus da 12 metri (vedi BEST), in base al rapporto sopra indicato, il consumo del bus da 18 metri è di 1,7 kWh/km nel caso del rapporto tra i limiti massimi delle masse veicolari e di 1,65 kWh/km nel caso di un load factor pari al 70% come ipotizzato nel software BEST. L'analisi economica viene sviluppata sul una ipotetica linea di 16 km per senso di marcia, con una frequenza oraria di 3 bus/h per 16 ore di servizio.

Per quanto riguarda la durata della vita utile delle batterie LTO, l'assenza di dati specifici sugli effetti di Crate elevati sulle batterie, come nel caso in esame, inducono per ragioni di prudenza esaminare due casi: il primo nel quale a titolo precauzionale viene considerato un abbattimento della vita utile dell'accumulo LTO del 50%, il che fa scendere il numero di cicli da 7.000 previsti normalmente per questo tipo di chimica a 3.500, il secondo nel quale in più viene sovradimensionato l'accumulo a terra alla fermata per il doppio della capacità prevista e si assume che ciò consenta alla vita utile delle celle LTO di estendersi fino a 5.000 cicli.

**Tabella 16: Dati tecnici al capolinea**

	n cicli equivalenti all'anno AccStz	Durata	Energia lorda trasferita dall'AccStz a bordo	Totale energia netta trasferita a bordo	Capacità AccStz	Potenza nodo
<b>Volani</b>	7.513	6,7	2,5	6,5	5	40
<b>LTO (Crate)</b>	6.034	0,6	2,6	6,5	7	40
<b>SC</b>	7.513	Indefinito	2,5	6,5	5	40

**Tabella 17: Dati tecnici alla fermata**

	n cicli equivalenti all'anno AccStz	Durata	Energia lorda trasferita dall'AccStz a bordo	Totale energia netta trasferita a bordo	Capacità AccStz	Potenza nodo
<b>Volani</b>	3.927	13	3,6	3	14	72
<b>LTO (Crate)</b>	773	5	4,1	3	83	80
<b>LTO (sovradimensionato)</b>	386	13	4,1	3	167	80
<b>SC</b>	7.513	Indefinito	3,6	3	8	72

Da questi dati di base, sono stati quindi derivati, con le formule di seguito elencate, i primi output (vedi Tabella 16 e Tabella 17) relativi al numero di cicli annui, alla durata dell'accumulo, ai numeri di cambi all'anno e complessivamente nel periodo, l'energia trasferita a bordo dall'accumulo stazionario sia al capolinea che alle fermate e le rispettive potenze in gioco. Sono stati ipotizzati 330 giorni di operatività annua degli impianti.

$$[1] C_c/s_{anno} = L_{linea} * h * G_{anno}$$

Dove

$C_c/s_{anno}$  = il numero di cicli di carica/scarica all'anno [n.]

$L_{linea}$  = lunghezza della linea [km]

$h$  = ore di servizio al giorno [h/g]

$G_{anno}$  = giorni di servizio all'anno [n]

L'analisi dell'integrazione delle ricariche con accumuli stazionari a terra riguarda solo i capolinea e le fermate, quindi, in base all'energia da ricaricare, in funzione dei tempi disponibili e con le potenze indicate nella tabella precedente, sono state derivate le nuove potenze in presenza degli EES a terra ai capolinea e alle fermate, come mostrato nella successiva formula.

$$[2] P_{AccStz} = (P_{rete} * t_{ric}) / (t_{ric} * \eta_{rete} + \eta_{AccStz} * t_{non\ ric})$$

Dove

$P_{AccStz}$  = potenza richiesta alla rete dal nodo in presenza dell'accumulo stazionario [kW]

$P_{rete}$  = potenza massima della ricarica al nodo nell'ipotesi solo da rete [kW]

$t_{ric}$  = tempo previsto per la ricarica dell'accumulo di bordo al nodo

$t_{non\ ric}$  = tempo previsto per la ricarica dell'accumulo stazionario al nodo

$\eta_{rete}$  = efficienza rete [%]

$\eta_{AccStz}$  = efficienza accumulo stazionario [%]

per il calcolo dell'energia trasferita a bordo al nodo, in presenza di accumulo stazionario, si è proceduto in base alle seguenti formule,

$$[3] E_{bordo} = E_{rete} + E_{AccStz}$$

$$[4] E_{rete} = (P_{AccStz} * t_{ric} * \eta_{rete})$$

$$[5] E_{AccStz} = (P_{AccStz} * t_{non\ ric} * \eta_{rete} * \eta_{AccStz})$$

dove

$E_{bordo}$  = energia totale netta trasferita all'accumulo di bordo dalla rete e dall'accumulo stazionario [kWh]

$E_{rete}$  = energia trasferita dalla rete all'accumulo di bordo [kWh]

$E_{AccStz}$  = energia trasferita dall'accumulo di terra all'accumulo di bordo [kWh]

Da cui è possibile derivare anche le capacità degli accumuli di terra per le varie tecnologie in base alla esigenza più stringente tra potenza e energia determinate in base alle successive formule

$$[6_a] AccStz_e = E_{AccStz} * (1 + SOC) / \eta_{AccStz}$$

$$[6_b] AccStz_p = \frac{P_{max}}{C_{rate}}$$

Dove

$AccStz_e$  = capacità dell'accumulo stazionario comprensivo del SOC e del rendimento per soddisfare l'energia [kWh]

$AccStz_p$  = capacità dell'accumulo stazionario in grado di soddisfare la potenza in funzione del Crate accettato [kWh]

$P_{max}$  = la massima potenza ammessa per la ricarica al nodo

$C_{rate}$  = la velocità con cui la batteria viene caricata o scaricata ossia il rapporto tra la corrente e la capacità nominale dell'accumulo

A questo punto è stata avviata una simulazione su una ipotetica linea di trasporto che necessita di ricaricare al capolinea ed alle fermate, in quest'ultimo caso, la presenza dei sistemi di ricarica e di accumulo a terra dipendono dal limite minimo dello stato di carica dell'accumulo di bordo. Infatti la marcia del bus, a seguito della ricarica al capolinea, proseguirà fino al raggiungimento del SOC minimo dell'accumulo a bordo. Il raggiungimento di questo limite determinerà, ogni volta, la necessità di installare una stazione di ricarica, equipaggiata con accumulo stazionario. In base alle formule precedenti, gli output sono riportati nella tabella di seguito.

Gli accumuli di bordo hanno tutti la stessa capacità quindi lungo la corsa si rileva lo stesso numero di ricariche alle fermate, ossia 2, incidenti sugli stessi nodi, anche le potenze in gioco sono tra loro simili e quindi queste grandezze vengono assunte come delle invarianti. Per le sostituzioni degli accumuli elettrochimici LTO, il prezzo unitario considerato è abbattuto del 40% in quanto viene sostituita solo la cella la cui incidenza sul costo totale è pari al 60% del valore complessivo.

**Tabella 18: Sostituzioni e costi attualizzati degli accumuli a terra al capolinea**

Capolinea anni	Acc Stz - Volano		Acc Stz - LTO		Acc Stz - SC	
	Sostituzioni	€	Sostituzioni	€	Sostituzioni	€
1	-	-	1	2.579	-	-
2	-	-	2	4.913	-	-
3	-	-	2	4.679	-	-
4	-	-	1	2.228	-	-
5	-	-	2	4.244	-	-
6	-	-	2	4.042	-	-
7	1	12.082	2	3.850	-	-
8	-	-	1	1.833	-	-
9	-	-	2	3.492	-	-
10	-	-	2	3.325	-	-
11	-	-	1	1.584	-	-
12	-	-	2	3.016	-	-
<b>Totale VA</b>		<b>12.082</b>	<b>20</b>	<b>39.785</b>	-	-

**Tabella 19: Sostituzioni e costi attualizzati degli accumuli a terra alla fermata**

Fermata anni	Acc Stz - Volano		Acc Stz - LTO effetto Crate		Acc Stz - LTO sovradimensionato		Acc Stz - SC	
	Sostituzioni	€	Sostituzioni	€	Sostituzioni	Acc Stz €	Sostituzioni	€
1	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	1	50.929	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	1	39.904	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Totale VA</b>			<b>2</b>	<b>90.834</b>				

Come mostrano Tabella 18 relativa al capolinea, le sostituzioni dei volani si hanno una sola volta in 12 anni mentre le batterie LTO devono essere sostituite 20 volte, i SC non vanno mai sostituiti. Nella Tabella 19, relativa alla fermata, l'utilizzo solo di una porzione di un accumulo dimensionato in energia consente una durata più lunga degli stessi, infatti nel periodo considerato oltre ai SC non è necessario sostituire né i volani né le batterie LTO sovradimensionate mentre le batterie LTO che risentono in modo completo dell'effetto Crate dovranno essere sostituite ma solo 2 volte.

La Tabella 20 e la Tabella 21 mostrano il risultato economico dell'investimento e dell'attualizzazione delle sostituzioni degli accumuli a terra presso tutti i nodi interessati. Emerge come i SC non siano affatto convenienti come applicazione al capolinea mentre alla fermata nel lungo periodo risultano essere vantaggiosi rispetto alle due soluzioni con batterie LTO. Tuttavia, alla fine del periodo osservato il risultato è nettamente a favore dei volani, in particolare di quelli con velocità inferiore ai 10k rpm, i quali sono compatibili con l'applicazione descritta. Le numerose sostituzioni delle batterie elettrochimiche rendono meno attraente, anche se interessante, tale soluzione, mentre i supercondensatori anche se non devono essere mai sostituiti risultano avere delle possibilità di applicazione alle fermate, dove si richiedono pochi kWh per la ricarica dei veicoli.

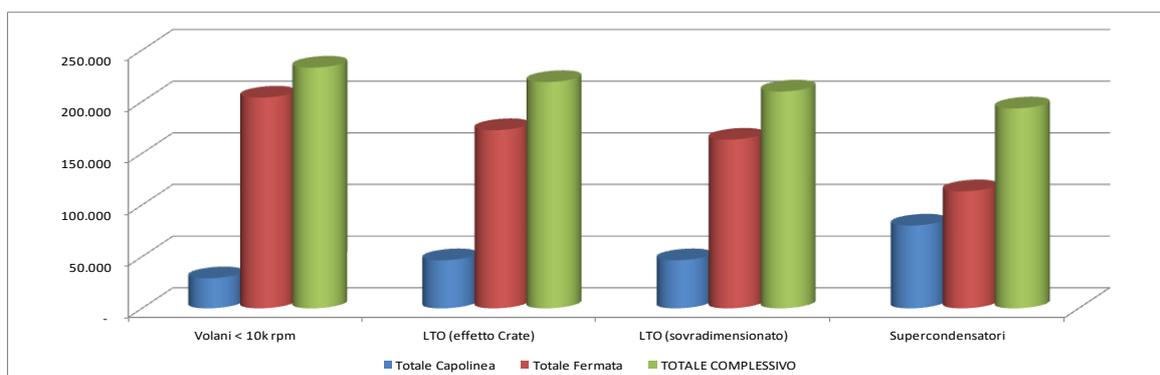
**Tabella 20: Investimenti e valori attuali delle sostituzioni al capolinea**

CAPOLINEA	Investimento AccStz	Valori attuali Sostituz AccStz	Totale Investimenti + VA sostituzioni al Capolinea
<b>Volani</b>	17.000	12.082	<b>29.082</b>
<b>LTO (effetto Crate)</b>	6.806	39.785	<b>46.591</b>
<b>Supercondensatori</b>	80.169	-	<b>80.169</b>

**Tabella 21: Investimenti e valori attuali delle sostituzioni alla fermata**

FERMATA	Investimento AccStz	Valori attuali Sostituz AccStz	Totale Investimenti + VA sostituzioni alla Fermata
<b>Volani</b>	204.000	-	<b>204.000</b>
<b>LTO (effetto Crate)</b>	81.667	90.834	<b>172.500</b>
<b>LTO (sovradimensionato)</b>	163.333	-	<b>163.333</b>
<b>Supercondensatori</b>	113.357	-	<b>113.357</b>

La Figura 35 illustra i risultati complessivi per il capolinea e le fermate afferenti al caso di una ipotetica corsa come è stata qui analizzata, da cui si evince, a conferma di quanto richiamato predcedentemente, che gli accumuli con volano rappresentano la soluzione più conveniente al capolinea, dove sono richieste potenze meno elevate e rabocchi energetici più consistenti rispetto a quelli necessari alla fermata, al contrario, la soluzione con SC sarebbe preferibile lì dove sono richieste alte potenze e piccoli trasferimenti di energia come si verifica al nodo fermata. La soluzione con batterie LTO, salvo verifiche sul degrado per elevati Crate di scarica, è preferibile come seconda scelta rispetto ai volani al capolinea e ai SC alle fermate.



**Figura 35: Risultati dell'analisi economica per le varie tecnologie di accumulo**

### 3 Conclusioni

Il mercato degli accumuli è in continua evoluzione così come le caratteristiche tecniche degli stessi. L'interesse verso queste tecnologie sono al centro di attività di ricerca anche industriale e pertanto i dati di riferimento, in particolare quelli economici, vanno considerati con una certa cautela. Ad esempio i volani, nonostante siano una tecnologia matura, non hanno un mercato molto sviluppato, in particolare in ambito auto motive, l'interesse verso questa tecnologia potrebbe quindi portare a rivalutare questa soluzione con ulteriori effetti positivi per le economie di scala. I supercondensatori sono piuttosto giovani e il loro interesse è recentemente salito alla ribalta grazie all'acquisizione da parte della Tesla di una delle più importanti aziende di produzione di SC, la Maxwell, ciò lascia intravedere nel medio termine possibili riduzioni dei costi specifici ancora molto alti. Le batterie LTO, in fase di sviluppo scontano la assenza di un mercato affermato nonostante le batterie della famiglia del litio abbiano registrato importanti riduzioni nei costi di produzione negli ultimissimi anni, ciò lascia presagire che anche le LTO possano scontare, nel medio periodo gli effetti positivi dello sviluppo del mercato. Tuttavia, come tutti gli accumuli elettrochimici, questa tecnologia soffre degli effetti di degrado imposti dall'uso e in particolare dalle alte velocità di carica/scarica, effetti ancora che devono essere testati per elevati C-rate. Come mostrano le prime prove svolte in ENEA su celle LTO il degrado potrebbe essere molto elevato e questa indagine sarà comunque affrontata in successive attività di ricerca. Il confronto economico ha evidenziato l'interesse per la soluzione con accumuli stazionari a volano in particolare per esigenze di potenza contenute. I supercondensatori sono attualmente la soluzione migliore lì dove sono richieste elevate potenze e piccoli rabbrocchi di energia mentre le batterie LTO potrebbero essere una soluzione per richieste di potenza contenute ma attualmente non sono competitivi né con i volani lì dove si richiedono basse potenze né con i SC, lì dove si richiedono invece alte potenze.

## 4 Riferimenti bibliografici

- [1] F. Orteni, M. Pasquali, F. Sacco, Sperimentazione in scala reale di un sistema di ricarica flash con pantografo, al banco e su strada, Report Ricerca di Sistema elettrico, PAR 2017
- [2] Mathew Aneke, Meihong Wang, Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review, Applied Energy, Volume 179, 1 October 2016, Pages 350-377)
- [3] N. Andrenacci, V. Sglavo, F. Vellucci, “Validazione di un modello stocastico per la predizione del degrado delle celle Litio-ione”, Report Ricerca di Sistema Elettrico PAR 2017
- [4] Florian Hall, Jonas Touzri, Sabine Wußler, Hilmi Buqa, Wolfgang G. Bessler, Experimental investigation of the thermal and cycling behavior of a lithium titanate-based lithium-ion pouch cell, Journal of Energy Storage, Volume 17, Pages 109-117, 2018
- [5] Xing Luo, Jihong Wang, Mark Dooner, Jonathan Clarke “Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation”, Applied Energy Journal, ELSEVIER, ottobre 2014. MIA
- [6] Sam Jaffe, Cairn Energy Research Advisors “Application note behind the meter energy storage system for renewables integration” European Copper Institute, ottobre 2016.