



Ricerca di Sistema elettrico

## Analisi delle prestazioni di un sistema di ricarica ibrido per TPL

Fernando Ortenzi, Giovanni Pede, Silvia Orchi

## ANALISI DELLE PRESTAZIONI DI UN SISTEMA DI RICARICA IBRIDO PER TPL

Fernando Ortenzi, Giovanni Pede, Silvia Orchi (ENEA)

Settembre 2016

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area: Trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica

Progetto: Sistemi di accumulo di energia per il sistema elettrico

Obiettivo: Studi sulla realizzazione di sistemi ibridi

Responsabile del Progetto: Pier Paolo Prosini, ENEA

## Indice

SOMMARIO .....	4
1 CENNI SULLE TECNOLOGIE PER LA RICARICA ELETTRICA E PER GLI ACCUMULI .....	7
1.1 ACCUMULO MISTO, SCHEMI E TOPOLOGIE .....	7
1.2 LA RICARICA RAPIDA NEL TRASPORTO PUBBLICO LOCALE .....	11
1.3 L'ACCUMULO ELETTRICO STAZIONARIO ALLE STAZIONI DI RICARICA VELOCE AL CAPOLINEA .....	15
<i>Caso con rete elettrica + batteria</i> .....	16
1.4 IL SISTEMA DI RICARICA CON RICARICHE DISTRIBUITE LUNGO LA LINEA .....	17
1.5 SCELTA DEL SISTEMA DI ACCUMULO, SUPERCONDENSATORI O BATTERIE LITIO-IONE.....	19
2 IL CASO DI STUDIO .....	21
2.1 IL PROFILO DI MISSIONE .....	21
2.2 IL MINIBUS .....	22
3 LA STAZIONE DI RICARICA .....	23
4 IL MODELLO DI SIMULAZIONE .....	26
4.1 RETE ELETTRICA .....	26
4.2 BATTERIE.....	26
4.3 SUPERCONDENSATORI.....	29
5 CONVERTITORI .....	31
5.1 GESTIONE DELLE SORGENTI DI ENERGIA.....	32
6 RISULTATI .....	34
6.1 RICARICA AL CAPOLINEA.....	34
6.1.1 <i>Caso di riferimento: solo rete elettrica</i> .....	34
6.1.2 <i>Caso con rete elettrica + Batteria</i> .....	35
6.1.3 <i>Batterie Second Life</i> .....	38
6.2 RICARICA ALLA FERMATA.....	39
6.2.1 <i>Caso A</i> .....	42
6.2.2 <i>Caso B</i> .....	44
6.2.3 <i>Caso C</i> .....	45
6.2.4 <i>Caso D</i> .....	47
6.2.5 <i>Caso E</i> .....	47
7 ASPETTI ECONOMICI DELLE SOLUZIONI PROGETTUALI .....	50
7.1 GLI INVESTIMENTI INFRASTRUTTURALI .....	51
7.2 I COSTI OPERATIVI ANNUALI .....	54
7.3 ESITO DELLA VALUTAZIONE ECONOMICA.....	56
7.4 FOCUS SU BATTERIE SECOND LIFE .....	57
8 CONCLUSIONI.....	59
9 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	62

## Sommario

L’ottimizzazione delle prestazioni e dei costi dei sistemi di accumulo passa anche attraverso soluzioni tecnologiche volte ad integrare dispositivi con funzioni diverse. È questo il caso dell’ibridizzazione di batterie elettrochimiche innovative, quali ad esempio quelle litio-ione, con supercondensatori (SC) elettrochimici dalle elevate prestazioni in potenza (vari kW per kg di peso) ed una vita utile prossima ad un milione di cicli completi.

Nel caso della rete di distribuzione elettrica, l’introduzione di carichi non previsti in sede di progettazione, quali ad esempio i dispositivi di ricarica rapida per i veicoli elettrici, può creare effetti non desiderati o può addirittura non essere realizzabile a causa di grandi richieste di potenza per tempi dell’ordine delle decine di secondi. Questi gradienti di potenza possono essere livellati utilizzando per l’appunto sistemi di accumulo ibridi che ne smussano i picchi, evitando fattori di squilibrio o di non utilizzabilità locale della rete.

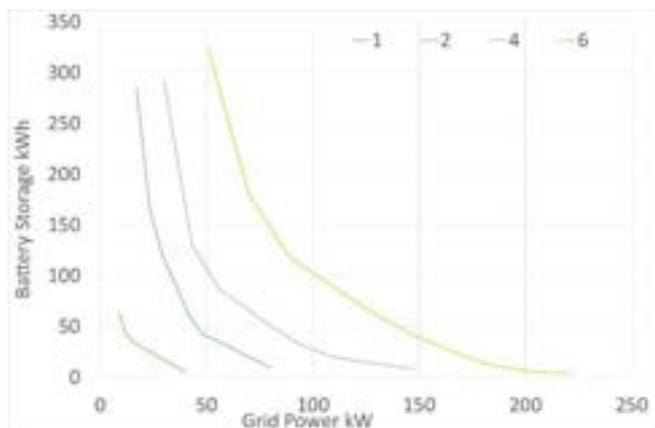
L’obiettivo di questa attività nel primo anno è la verifica di fattibilità tecnico-economica, la simulazione e la progettazione di un sistema di accumulo stazionario ibrido batteria-super condensatori con relativa elettronica di potenza, gestione e controllo, riferito ad un caso reale, allo scopo di ottimizzarne il dimensionamento tecnico-economico, per diverse, possibili condizioni di esercizio.

A tale scopo è stato realizzato un simulatore della stazione di ricarica, comprendente i sottosistemi accumulo (modello batteria Li-Ione e modello supercondensatori), interfaccia verso la rete (AC/DC converter), interfaccia verso il veicolo (DC/DC converter, di differenti tipologie).

E’ stato quindi individuato un servizio di trasporto pubblico, quello già analizzato nel rapporto RdS/PAR2013/102 ovvero la linea 12A di trasporto pubblico dell’Aquila. Nell’ottica di una elettrificazione di tale servizio di trasporto si è analizzata la possibilità di aumentare il numero di corse simulando scenari con 1,2,4,6 veicoli/ora. Per il servizio suddetto, che prevede in alcuni momenti della giornata la presenza contemporanea al capolinea di tutti gli autobus, sono stati individuate 2 tipologie di stazione di ricarica: una per il capolinea ed una da collocare in alcune delle fermate del bus, con l’obiettivo di ottimizzare nei due casi il sistema di accumulo necessario a garantire la ricarica con un minore e più livellato prelievo da rete.

### Stazione di ricarica al capolinea, per servizi da 1 a 5 veicoli/ora.

La stazione di ricarica al capolinea può essere realizzata con o senza un accumulo stazionario in aggiunta alla rete elettrica. Le ricariche, avendo durate abbastanza lunghe e di conseguenza energie considerevoli in gioco, rendono non convenienti i supercondensatori, di conseguenza ci si è limitati al dimensionamento della batteria stazionaria; i benefici dell’accumulo si notano subito, vedi figura, la potenza massima richiesta dalla rete è, infatti, inversamente proporzionale alla capacità del sistema di accumulo.



Andamento della Potenza richiesta alla rete con la dimensione del Sistema di accumulo per una ricarica al capolinea

Nel caso della linea servita con un veicolo/ora la potenza passa da 43.5 kW (senza accumulo) a 9 kW nel caso in cui la potenza erogata dalla rete sia esattamente quella media; occorre evidentemente un pacco batterie molto grande. In tutti i casi (per tutte le frequenze di servizio richieste) si può avere una riduzione della potenza richiesta alla rete di circa l'80%. Una soluzione che preveda solo ricariche brevi e molto frequenti (ad ogni fermata al capolinea), diversamente dal servizio individuato all'Aquila, richiederebbe però accumuli elettrici molto più piccoli, ed è illustrata a parte.

### Stazioni di ricarica alle fermate

Per quanto riguarda la ricarica alla fermata, nota la lunghezza del percorso (10 km) ed il numero di fermate (30), si è stimata una distanza media fra di esse (0.33 km) e le stazioni di ricarica sono state posizionate ogni 3 fermate.

La distanza, ridotta, tra le stazioni di ricarica consente di prevedere la possibilità per gli autobus di disporre di un accumulo di bordo costituito da soli supercondensatori<sup>1</sup> per la trazione, ed in aggiunta un accumulo con batterie per i servizi di bordo. Tali servizi, pur prelevando potenze molto più basse di quelle di trazione, comportano consumi energetici elevati, ormai dell'ordine del 20-25% di quelli totali (condizionamento).

La durata della ricarica, di circa 15 secondi, comprensivi dell'avvicinamento ed allontanamento del pantografo di ricarica, insieme alle potenze in gioco, elevatissime, esclude la possibilità di utilizzare le batterie stazionarie come sorgente principale di energia. Si sono analizzati quindi i supercondensatori in congiunzione alla rete elettrica ed eventualmente una batteria tampone che risulta di supporto nella fase di ricarica dei supercondensatori, dopo che il veicolo si sia allontanato.

Sono stati simulati 5 differenti scenari di ricarica alla fermata e se ne riportano le caratteristiche di seguito:

- A. Il caso A, di riferimento, con ricarica da rete da 375 kW con un solo convertitore AC/DC da 300 kW richiede potenze dalla rete troppo elevate per poter essere utilizzato, a maggior ragione in zone a bassa disponibilità di potenza; il rendimento globale di ricarica è comunque il più alto di tutti (0.8); non esistono limiti sul numero di mezzi da ricaricare in quanto non c'è bisogno di ricaricare nessun accumulo (15 secondi).
- B. Il caso B, con ricarica da rete da 21 kW e banco di supercondensatori da 0.92 kWh, con un convertitore AC/DC da 21 kW (per la rete) e un convertitore DC/DC da 300 kW (per la ricarica) ha il vantaggio, rispetto al caso A di richiedere una potenza molta minore, a scapito però del rendimento (0.59) e di un tempo di ricarica della stazione di 220 secondi.
- C. Il caso C con ricarica da rete da 10 kW, banco di supercondensatori da 0.92 kWh e pacco batterie da 4 kWh, un convertitore AC/DC da 10 kW (per la rete), un convertitore DC/DC da 21 kW (per le batterie) ed un convertitore DC/DC da 300 kW (per la ricarica) ha il vantaggio rispetto al caso B di richiedere dalla rete ancora meno potenza e di avere un tempo di ricarica ancora più basso (133 secondi). L'aggiunta delle batterie e del suo inverter ne fanno abbassare ancora il rendimento (0.566)
- D. Il caso D differisce dal caso C solo per il fatto che anche i supercondensatori hanno un DC/DC (da 300 kW), mantenendo fissa la tensione di link a vantaggio dei rendimenti di tutti i convertitori. Il rendimento globale è di 0.666. Lo svantaggio è che c'è un convertitore in più che ha un costo non trascurabile.
- E. Il caso E, è composto da supercondensatori disposti in serie da 1.025 kWh, da una alimentazione da rete da 21 kW e da un convertitore AC/DC da 21 kW. Non c'è il convertitore stazione/veicolo, la ricarica avviene per travaso, mitigato da una grossa induttanza. Ha il vantaggio di non avere convertitori ad alta potenza e quindi è certamente la soluzione più economica, ma ha delle criticità dovute alle alte correnti di scarica, alle temperature dei condensatori che salgono e a problemi di inquinamento elettromagnetico che non è stato analizzato in questa sede. C'è bisogno quindi di

---

<sup>1</sup> L'accumulo di bordo costituito da supercondensatori è l'unica soluzione possibile nel caso E (vedi di seguito) per le particolari, innovative modalità di realizzazione della stazione di ricarica, "per travaso".

una accurata indagine di mercato su prodotti (connessioni elettriche di potenza, induttanze, isolamenti ecc.) non propriamente di tipo automotive per verificare la fattibilità di una soluzione di questo tipo.

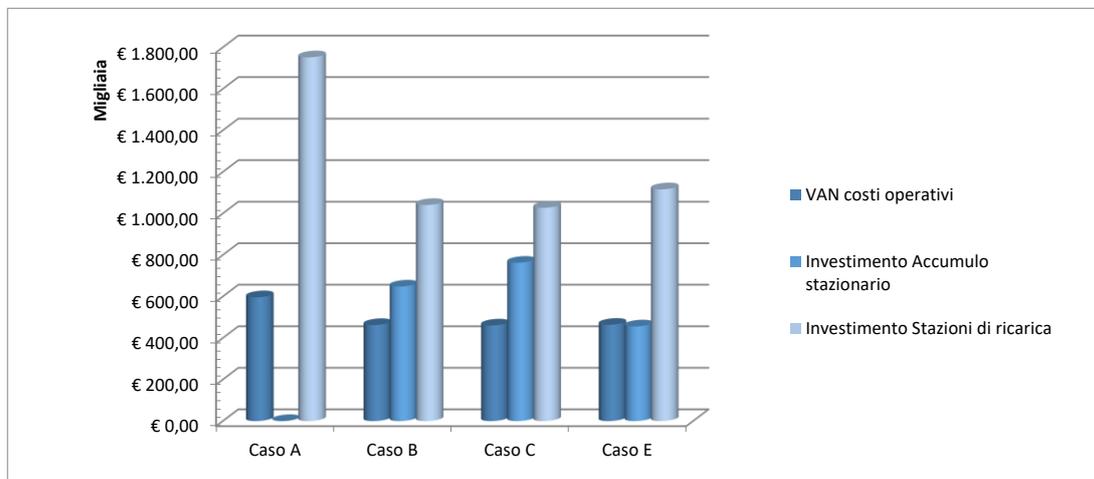
Si riporta anche una tabella riepilogativa dei risultati della simulazione per una migliore comprensione.

**Riepilogo risultati per una ricarica alla fermata**

	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D	Caso E
Potenza rete massima kW	375	21	10	10	21
Tempo di ricarica	15	220	133/492	126/439	261
Moduli SC serie/parallelo	0/0	3/3	3/3	3/3	A terra: (8/2); a bordo: (8/2)
Energia SC in kWh (Vmin=VMax/2)	0	0.92	0.92	0.92	A terra: 1.64 A bordo: 1.43
Induttanza in serie in H	0	0	0	0	0.1
Scarica % max SC	0	0.906	0.839	0.84	0.6
Potenza massima SC in kW	0	315.7	310	308	1350
Energia batteria in kWh	0	0	4.096	4.096	0
Scarica % massima batteria	0	0	0.19	0.181	0
Potenza massima batteria in kW	0	0	22.7	22.4	0
Energia rete in kWh per ricarica	0.962	1.302	1.361	1.156	1.455
kWh ricaricati al veicolo	0.77	0.77	0.77	0.77	0.79
Rendimento	0.8	0.59	0.566	0.666	0.56
DeltaT Max supercondensatori	0 °C	5.5 °C	5.5 °C	5.5	19 °C

Il lavoro si conclude con una analisi economica, nella quale si mette a confronto lo scenario di base, Caso A, con gli scenari alternativi previsti nell’ipotesi di ricariche alle fermate. Quest’ultime caratterizzate, appunto, da una richiesta di potenza alla rete molto alta, configurano la situazione preferibile da sottoporre all’analisi economica. Sono stati esaminati, quindi, i Casi A, B, C ed E, escludendo il caso D per la presenza di un convertitore aggiuntivo che ne avrebbe compromesso la convenienza. Si è proceduto con la stima degli investimenti iniziali e dei costi operativi osservati su un periodo di 10 anni. Infine, è stato elaborato un indicatore sintetico proprio dell’analisi costi-benefici, ossia il Valore Attuale Netto, sulla base del quale sono stati operati i confronti dei risultati economici ottenuti per i vari casi.

La soluzione A, in cui la richiesta di potenza viene soddisfatta totalmente dalla rete, si è rivelata la meno conveniente, mentre l’ipotesi degli accumuli stazionari costituiti da supercondensatori, sembrerebbe in certe condizioni, economicamente fattibile e conveniente; la figura di seguito ne riporta brevemente i risultati.



Durata: ottobre 2015-settembre 2016

# 1 Cenni sulle tecnologie per la ricarica elettrica e per gli accumuli

## 1.1 Accumulo misto, schemi e topologie

Nel campo dell'accumulo dell'energia, alcune applicazioni, sia mobili che stazionarie, richiedono una specifica combinazione di energia e potenza ("risposta rapida e di breve periodo" e "risposta lenta e di più lungo periodo"), che non può essere soddisfatta in maniera "esatta" da un singolo dispositivo. Per implementare queste applicazioni, sono stati quindi proposti dispositivi di accumulo di energia ibridi o misti, che combinano, in parallelo secco o in maniera controllata, due o più dispositivi con caratteristiche complementari. Inoltre, come si è verificato sperimentalmente, la vita di sistemi complessi come le batterie dipende anche dal profilo di scarica (stazionario, semistazionario o dinamico), per cui, assegnando a dispositivi diversi le due diverse funzioni energia e potenza il costo a fine vita di un sistema d'accumulo misto può anche essere competitivo rispetto altri tipi di accumulo.

Tutti gli HESD (Hybrid Energy Storage System Device) condividono una caratteristica comune, sono costituiti da dispositivi ad alta potenza specifica (dispositivi con risposta rapida) e dispositivi ad alta energia specifica (dispositivi con risposta lenta). Tra i diversi HESDs proposti sono elencati di seguito quelli principali, (il dispositivo a risposta lenta è elencato per primo, seguito dal dispositivo a risposta rapida):

batteria e SC [47] - [53];

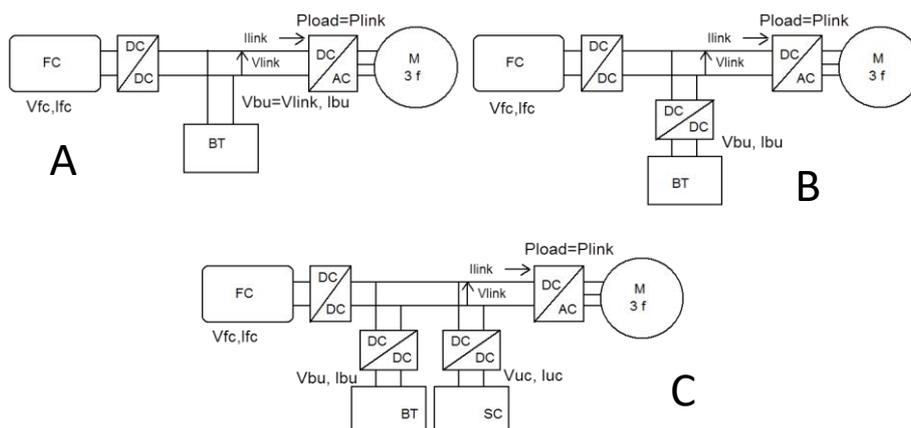
FC e batterie e/o SC [54] - [56];

Batterie e volani [57];

Nelle applicazioni HESD, le batterie possono servire sia come erogatori di energia, ove accoppiati a dispositivi "più rapidi" come i SC, o, nel caso contrario, come buffer di potenza, ad esempio quando usati insieme ad una FC.

Al fine di combinare due o più dispositivi di accumulo che agiscano come unica fonte di alimentazione, è necessaria un condizionamento più complesso dei flussi di potenza. Sono state quindi proposte numerose topologie per realizzare questo compito, che vanno dal molto semplice al molto flessibile.

In generale, le topologie proposte possono essere raggruppate in tre categorie, come mostrato in Figura 1, con riferimento agli schemi di alimentazione di un azionamento veicolare.



**Figura 1** Possibili configurazioni di accumulo misto a) con FC e batterie b) b con FC, batterie e convertitore c) con FC, batterie, supercondensatori e n. 2 convertitori

Di seguito una discussione dei meriti ed usi tipici di ogni topologia.

Figura. 1 (a) mostra la connessione parallela diretta di due dispositivi. Questa topologia richiede che le uscite in tensione delle due fonti di alimentazione siano uguali ( $V_1 = V_2$ ), il che, nel caso della FC, ha richiesto l'uso di un convertitore cc/cc. Il collegamento parallelo diretto di batterie e SC è stato proposto

per [51] - [53] sistemi a bassa tensione ed a basso costo, come ad esempio il sistema brevettato in ENEA da 12 V [52] per le batterie d'avviamento.

Il sistema realizzato è in grado di erogare un impulso ad alta potenza (all'avviamento del motore) seguito da un'erogazione costante a bassa potenza per un periodo di tempo più lungo per l'alimentazione dei servizi di bordo. Il collegamento in parallelo diretto di batterie e SC è reso possibile dalla diversa impedenza dei due dispositivi utilizzati, perché il basso valore dell'impedenza dei SC (più basso di quello delle batterie) consente loro di anticipare l'erogazione l'alimentazione durante gli impulsi di potenza elevati, mentre la batteria fornisce l'energia richiesta a lungo termine. La tensione in uscita ( $U_a$ ) cambia durante la carica e la scarica del sistema.

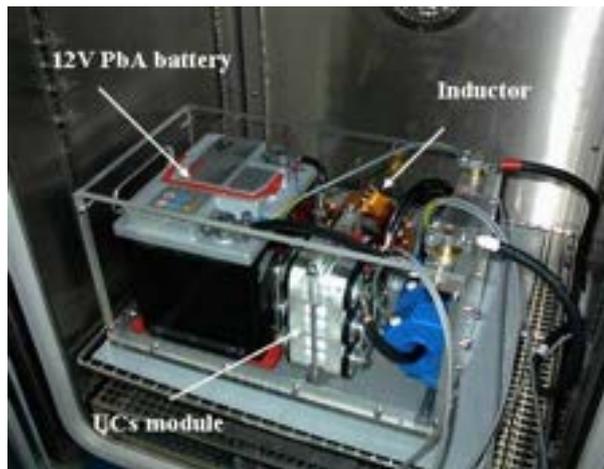


Figura 2

Nel prototipo illustrato in figura, Figura 2, l'induttanza del "ramo batteria" è stata opportunamente incrementata in maniera da esaltare l'effetto dei SC.

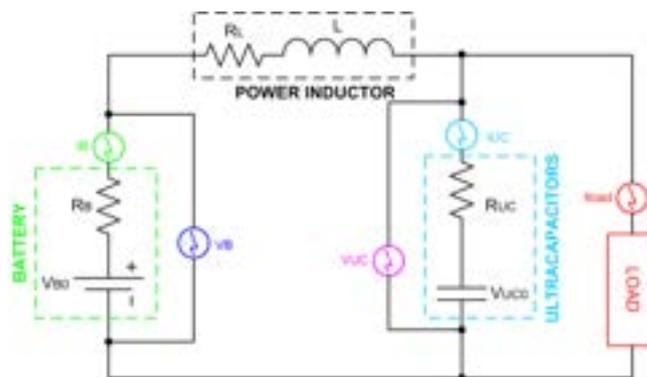


Figura 3

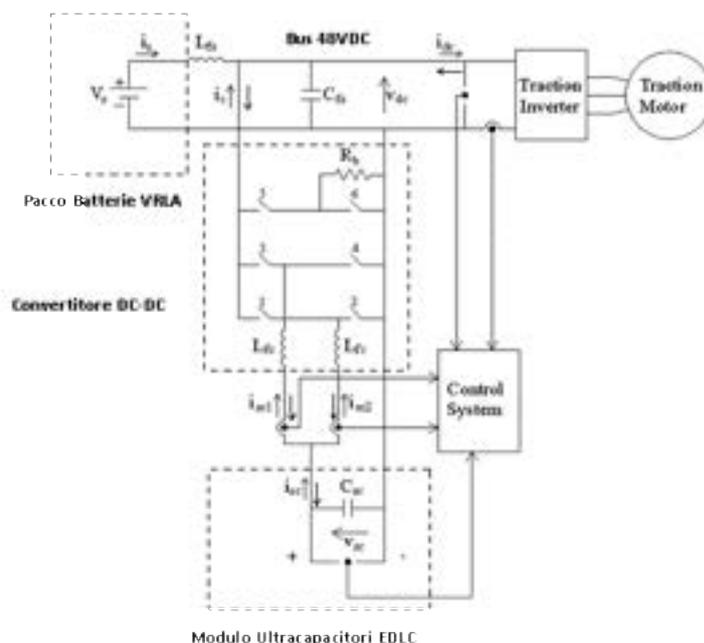
La particolarità della disposizione circuitale adottata, Figura 3, che prevede l'induttore di potenza disposto in serie alla batteria ed a monte del modulo SCs, permette di ripartire in modo differenziato i flussi di potenza ed energia che si manifestano durante i transitori di scarica/carica, corrispondenti rispettivamente alle operazioni di stop&start del motore a combustione interna e di recupero energetico in decelerazione del veicolo. Il risultato ottenuto è una riduzione delle perdite per effetto Joule e di un aumento della capacità della batteria a parità di carica estratta ovvero accumulata, con effetti positivi sulla stessa vita utile della batteria e sull'affidabilità del sistema di accumulo.

La ripartizione dell'energia erogata dalle due fonti è limitata dalla variazione della tensione dell'altro. In altre parole, la tensione dei SC, all'equilibrio, non può scendere sotto quella delle batterie, e nemmeno

durante i transitori può ridursi più di tanto, per cui i SC non possono erogare tutta la potenza richiesta, ma solo una parte, ed è necessario un certo loro sovradimensionamento. L'assenza di dispositivi elettronici aggiuntivi di regolazione e di interfaccia tra sistema di accumulo misto e l'impianto elettrico del veicolo, rendono però la soluzione ideata efficiente ed affidabile, nonché economicamente interessante

Una soluzione più complessa ma flessibile è quello di utilizzare un convertitore tra le due sorgenti di alimentazione come mostrato in Figura 1 (b). Un DC/DC controlla la corrente di uscita dalla batteria, permettendo il variare della sua tensione, mentre la FC fornisce il fabbisogno di potenza residua al carico. Pertanto, questo sistema permette di disaccoppiamento delle due sorgenti di alimentazione. Tipicamente, viene controllato attivamente il dispositivo di accumulo dell'energia che tollera una maggiore fluttuazione di tensione. Nel caso batteria-SC, questo è il supercondensatore, che può essere (teoricamente) scaricato completamente senza danneggiarsi. In realtà, non lo si fa mai, perché ciò comporterebbe un inaccettabile aumento del valore della corrente erogata. I sistemi che fanno uso di questa topologia includono batteria e SC [49], [50]; FC e la batteria o SC [55], [56]; e volano e batteria [57].

Un tipico schema di questa tipologia di sistema di accumulo misto è mostrato in Figura 4:



**Figura 4**

Riguardo al funzionamento del sistema di accumulo misto, la sorgente di energia è costituita da un pacco batterie al piombo del tipo Valve Regulated Lead Acid (VRLA) accoppiato in parallelo elettrico, via un convertitore bidirezionale DC-DC, ad un modulo supercondensatori (SCs) del tipo Electric Double Layer Capacitor (EDLC) avente la funzione di limitare i picchi di corrente erogati, ovvero assorbiti, dalle batterie durante il funzionamento del veicolo. La batteria segue allora un funzionamento a regime costante corrispondente alla potenza media richiesta dal veicolo, il modulo UCs interviene nei soli transitori di funzionamento del veicolo fornendo, ovvero accettando, la frazione variabile di potenza.

Il convertitore DC-DC è realizzato con un invertitore del tipo Intelligent MOSFET Power Module. Il convertitore DC-DC formato dai mosfet switches 1, 2, 3 e 4 è bidirezionale e innalza la tensione dei SC al valore della tensione di batteria, ovvero del DC Bus, nelle fasi di scarica del modulo SC (convertitore boost), inoltre abbassa la tensione dal valore di tensione di batteria, ovvero del Bus DC, al valore della tensione del modulo SC nelle fasi di ricarica degli stessi supercondensatori (convertitore buck). La topologia utilizzata è del tipo interleaved per ridurre le sollecitazioni nei dispositivi ed il ripple di corrente nei SC.

Il convertitore realizzato dai mosfet switches 5 e 6 è unidirezionale, alimenta la resistenza Rb ed è attivo nel caso che la tensione Vdc del Bus superi il valore di tensione massimo prefissato (per esempio durante una frenatura prolungata del veicolo in condizioni di batteria e supercondensatori completamente carichi).

Le induttanze Lfc sono funzionali all'azione di boost e di buck. Il filtro Lfs e Cfs sul DC-Bus attenua le armoniche di corrente prodotte dalla modulazione del convertitore DC-DC e circolanti in batteria.

Il sistema di controllo del convertitore DC-DC ed il Power Management del sistema di accumulo misto è realizzato con un DSP Texas ed utilizza 3 sensori di corrente e 2 sensori di tensione (sonde LEM). Il DC-Bus è a 48 V nominali.

Una variante molto semplice della tipologia di accoppiamento sopradescritto prevede che batteria e SC siano collegati al carico uno alla volta, consentendo al controller di sistema di scegliere quale sorgente dovrebbe alimentare il carico, ad esempio i supercondensatori per accelerare e recuperare in frenata, le batterie per l'alimentazione dei servizi di bordo.

Avere, infine, convertitori dedicati per ciascuna fonte di energia, Fig. 1c, consente una vasta gamma di topologie e strategie di controllo. Di seguito, se ne riporta un esempio sviluppato in ENEA in collaborazione con l'Università ROMA TRE – Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Ind.le.

**Il sistema realizzato, denominato MIPEC Multi Input Power Electronic Converter,**

Figura 5, prevede come generatore una cella a combustibile Proton Exchange Membrane (PEM) alimentata direttamente ad idrogeno e da un accumulo elettrico misto, a sua volta costituito da batterie al piombo di ultima generazione ed un modulo ultracapacitori.



Figura 5

Grazie alla flessibilità dell'architettura, che permette configurazioni differenti, sono state sviluppate e sperimentate realizzazioni anche a sole due sorgenti secondo uno schema generatore + accumulo elettrico (Figura 6).

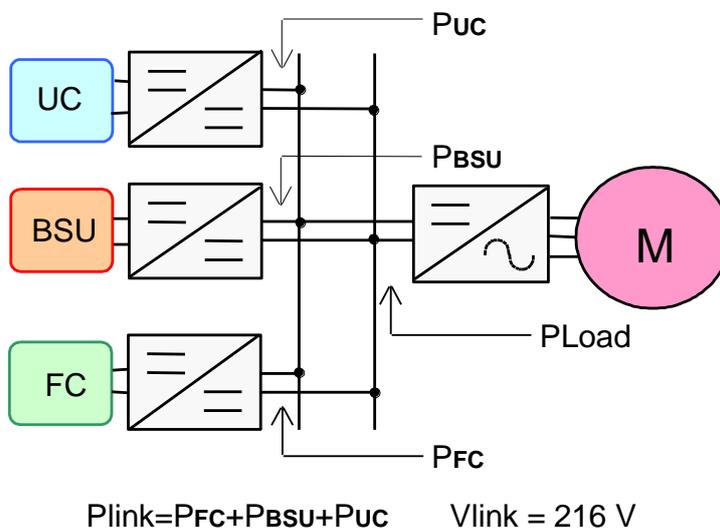
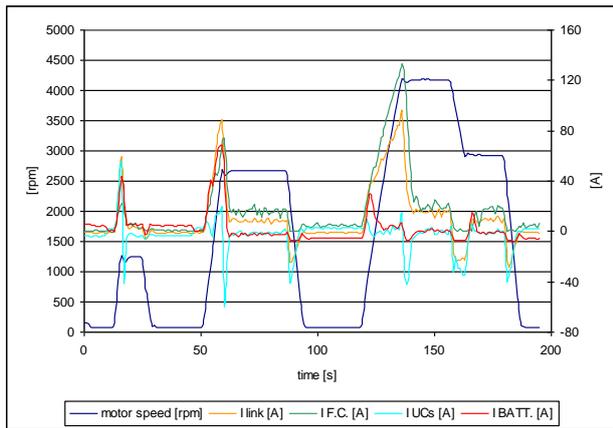
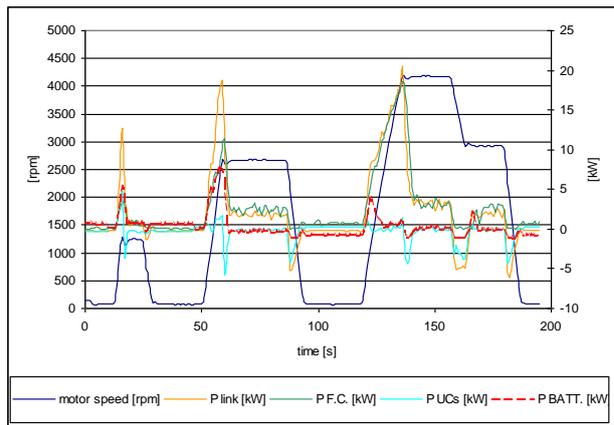


Figura 6



**Figura 7 MIPEC – Gestione dei flussi di corrente**



**Figura 8 MIPEC – Gestione delle potenze**

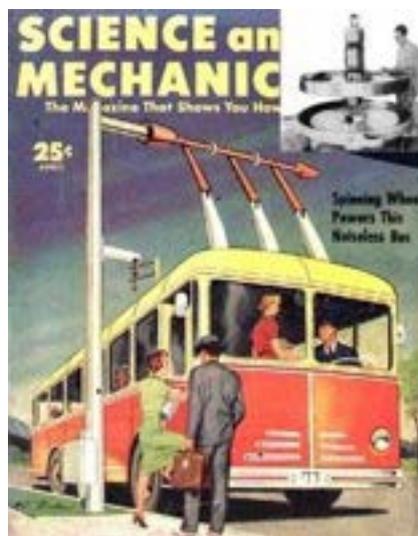
Le figure 7 e 8 precedenti sono relative rispettivamente ai flussi di corrente ed alle potenze in ingresso/uscita dalle sorgenti, durante la marcia del veicolo. I profili registrati evidenziano la gestione ottimizzata delle sorgenti reversibili, batterie e modulo UCs, e del generatore, PEM fuel-cell, realizzata dal Convertitore MIPEC secondo le richieste di carico, nelle fasi di accelerazione e durante le percorrenze a velocità costante del veicolo. Nelle stesse fasi di decelerazione la dinamica degli UCs garantisce elevata efficienza di conversione durante le operazioni di recupero.

La stessa logica di gestione del MIPEC realizza il mantenimento dello stato di carica (SOC) delle batterie e degli ultracapacitori ai valori di riferimento, limitando inoltre le variazioni di potenza erogata da batteria e generatore nei transitori di carico Pload secondo gli stessi gradienti caratteristici, con vantaggi in termini di affidabilità e vita utile del sistema.

Naturalmente sono possibili anche applicazioni stazionarie degli accumuli misti, di seguito si esaminerà il caso delle stazioni di ricarica di autobus elettrici dedicati al trasporto pubblico locale.

### 1.2 La ricarica rapida nel trasporto pubblico locale

Negli anni '50 venne sviluppato in Belgio un particolare tipo di autobus a trazione elettrica, all'apparenza un filobus, ma che in realtà non prevedeva la presenza della catenaria, sostituita da un particolare sistema di ricarica. L'autobus viaggiava silenziosamente a trolley abbassato e lo risollevava per la ricarica solo in alcuni punti del percorso, equipaggiati con una terna di conduttori elettrici.



**Figura 9 Gyrobus**

Un filobus senza fili quindi, che aveva tutti i vantaggi del filobus (marcia pulita e silenziosa ed utilizzo di un vettore energetico universale come l'elettricità) senza i costi ed i vincoli della linea aerea.

Il **GyroBus** (Figura 9, questo era il suo nome, prodotto in una ventina di esemplari dalla Oerlikon, grande azienda elettromeccanica svizzera, aveva però un difetto fondamentale, che ne decretò la scomparsa nello spazio di un decennio, dalla sua introduzione nel 1953 al ritiro dal servizio nei primi anni 60: la tecnologia impiegata per l'accumulo elettrico di bordo era un volano, una macchina ad induzione a velocità e frequenza variabile, che veniva accelerato ad ogni fermata e generava poi energia elettrica durante la successiva decelerazione, spingendo il mezzo fino alla fermata successiva.

Il concetto è nato a nuova vita con lo sviluppo ed il successo commerciale di una nuova tecnologia, quella dei sistemi di accumulo ad elevata potenza specifica anche in fase di ricarica, come i supercondensatori e le batterie litio-ione. I supercondensatori hanno già avuto un'importante applicazione commerciale nel nostro paese a Milano, con i filobus recentemente acquistati dalla ATM, Figura 10.

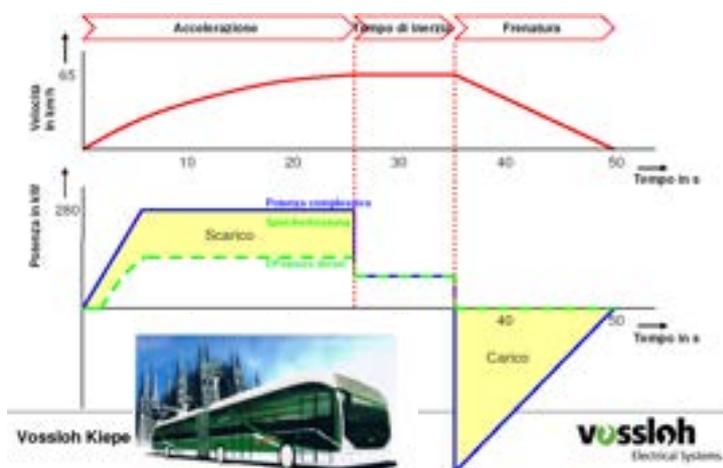


Figura 10

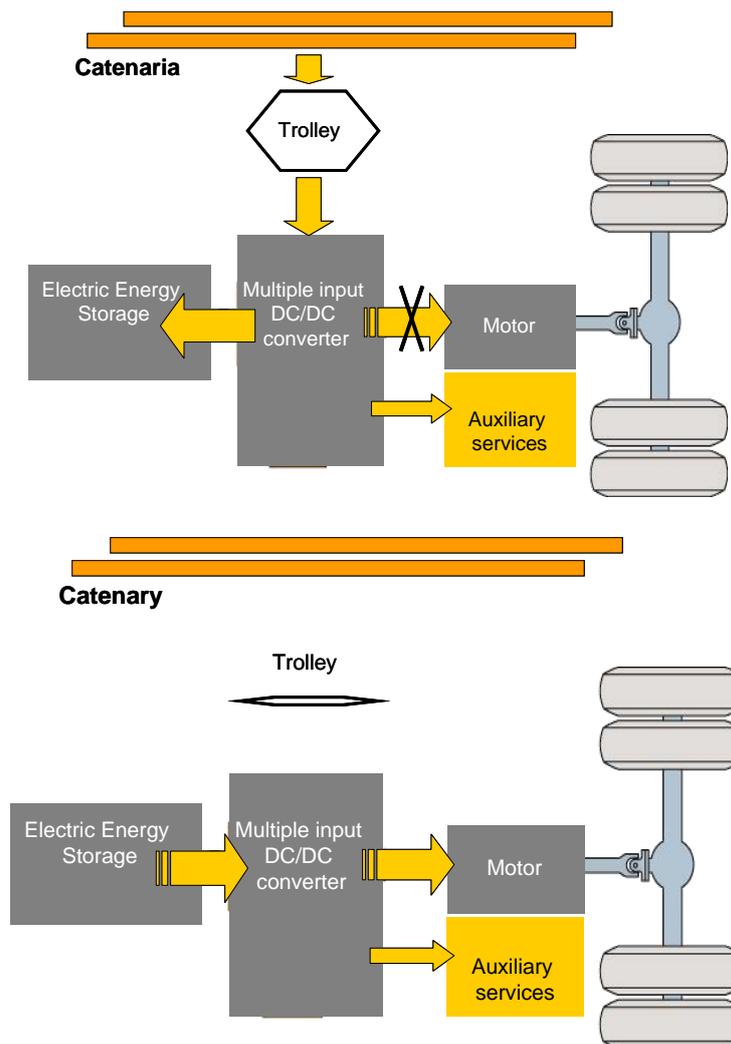
Questi mezzi sono utilizzati come normali filobus, ma l'accumulo elettrico di bordo garantisce sufficiente energia da consentire la movimentazione autonoma per brevi tratti (3-400 m) in caso di guasto sulla linea aerea di alimentazione e consente, con il recupero in frenata possibile in ogni condizione, un risparmio energetico del 24%, dato dichiarato da Vossloh.

Il concetto di ZeroFilo-Bus, brevettato dall'ENEA nel 2008, nasce invece ripensando modalità d'uso simili al Gyrobus (alimentazione di bordo con accumulo elettrico, ricaricato in punti fissi lungo la rete) e sostituendo al volano i supercondensatori, per ridurre pesi e volumi impegnati.

Il vero passo rispetto al vecchio GyroBus (ma anche rispetto ai filobus di recente generazione, anch'essi provvisti di supercondensatori) si ha introducendo nel sistema intelligenza concentrata (nella centrale operativa) e distribuita (su ogni singolo mezzo).

Come è chiaro, infatti, con un mezzo di questo tipo è necessario un approccio di sistema "veicolo/strutture di ricarica/gestione linea" che garantisca l'utilizzo ottimale della limitata energia del sistema di accumulo e ne eviti il rapido deterioramento.

Il funzionamento è sinteticamente illustrato in figura, relativa alle fasi di ricarica e di scarica del sistema di accumulo. A titolo esemplificativo, il sistema di captazione è di tipo tradizionale, un trolley (Figura 11).



**Figura 11**

La ricarica al capolinea è comunque riconducibile al concetto di biberonage, ben noto, e vede anche delle applicazioni avanzate tecnologicamente, come su gli autobus ELFO della EPT, equipaggiati con sistemi di ricarica rapida di tipo induttivo, prodotti dalla Wampfler, Figura 12.

Infatti, due tipologie di connessione sono state proposte durante i 2-3 decenni in cui si è discusso e sperimentato di veicoli elettrici:

- connessione di tipo induttivo. Questo tipo di connessione si realizza attraverso un accoppiamento induttivo fra il mezzo e la terra. Presenta un alto livello di sicurezza verso le persone, in quanto non sono presenti parti conduttive che, se toccate quando in tensione potrebbero costituire pericolo per le persone. Per contro il sistema è complesso e costoso
- connessione di tipo conduttivo. Per la ricarica lenta l'accoppiamento è un normale accoppiamento presa-spina, simile a quello utilizzato per usuali applicazioni civili ed industriali, per quella rapida ed extra-rapida un accoppiamento strisciante-conduttore studiato appositamente

Il sistema induttivo è l'unico proponibile, per motivi di sicurezza, se la captazione deve avvenire a terra o ad altezza d'uomo ed è infatti utilizzato anche nella realizzazione di sistemi di trasporto industriale.. Appartiene a questa categoria anche il sistema della Bombardier ad induttore lineare, studiato per l'alimentazione dei tram.

Nel sistema Wampfler, che ha una lunga esperienza di movimentazione industriale, la connessione, ai capolinea, è stabilita da un primario, annegato sotto il manto stradale ed alimentato ad alta frequenza, ed un secondario a bordo del mezzo, che viene abbassato sul primario dall'autista.

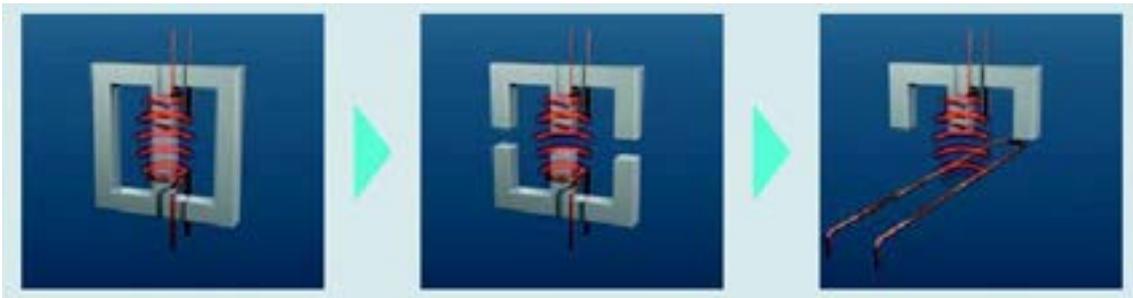


Figura 12

La fase di ricarica dura una decina di minuti, con la cessione alla batteria di 18 Ah circa, il che comporta un recupero del 7-8% dello stato di carica della stessa. La stazione di ricarica ha una potenza di 70 kW, ed il rateo di trasferimento della carica è quindi di circa 0.6 kWh/1', limitato dalle caratteristiche delle batterie al piombo usate dalla EPT.

Appartengono alla seconda categoria i classici trolley o sistemi semplificati da esso derivati. Si osservi che rispetto ad un filobus il sistema di contatto per la ricarica può essere molto più semplice, perché lavora da fermo. La necessità di disporre di grandi potenze (quindi correnti) di ricarica rende interessante la possibilità di realizzare la ricarica direttamente in corrente continua, ponendo in connessione elettrica un alimentatore, ad esempio attrezzato per una carica I-U, con la sbarra del veicolo a cui è collegato l'accumulatore elettrochimico. In tutti i casi è ovviamente importante prevedere il transito terra/bordo non solo di energia elettrica, ma anche di informazioni che consentano l'uso delle tecniche di carica più adatti alla batteria presente a bordo, nonché una corretta contabilizzazione ed altre funzioni.

Il sistema di gestione dell'energia deve quindi:

1. Assicurarsi dell'approssimarsi di una fermata ed essere informato dello stato della stessa (operativa/non operativa)
2. Misurare lo stato di carica dell'accumulo
3. Valutare le necessità energetiche nel tratto successivo alla fermata
4. Valutare quindi il grado di necessità della ricarica
5. Indicare la durata consigliabile della ricarica

Il sollevamento del captatore deve però rimanere sotto il controllo dell'autista, che potrà decidere se effettuare la fermata anche in assenza di persone in attesa.

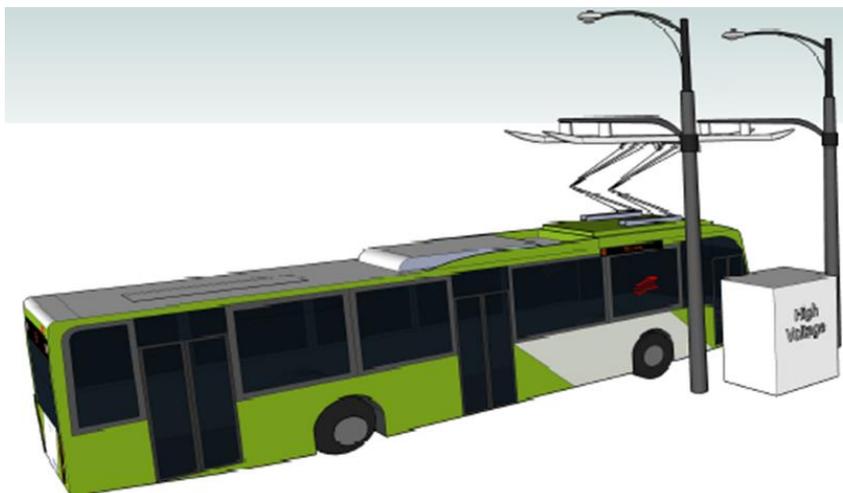


Figura 13

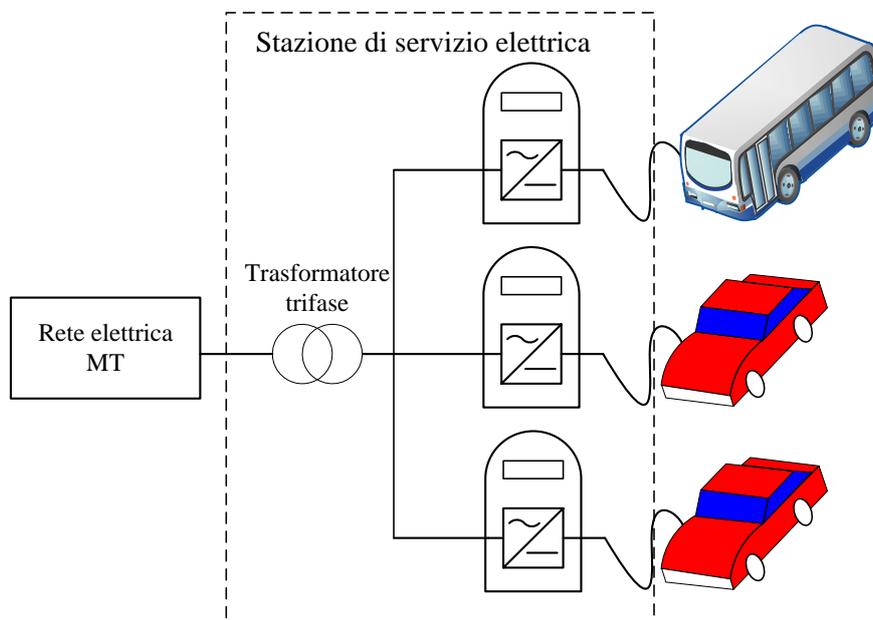
Un esempio di tale sistema ci è offerto dalla OPBRID<sup>2</sup>, Figura 13, e differisce dagli schemi precedentemente considerati per l'utilizzo a bordo del mezzo di batterie al titanato di litio, ad alta potenza specifica (P/E elevato), vedi la tabella<sup>3</sup>. Le stazioni di ricarica sono previste di potenza pari a 250 kW ciascuna (EVS-24, Stavenger 2009).

Il rateo di trasferimento di potenza sale rispetto al sistema induttivo di quasi un ordine di grandezza, portandosi a 4-5 kWh/1', e la ricarica di 7' assicura una percorribilità maggiore di 15 km.

Rimane da verificare la possibilità per il captatore di trasferire le correnti indicate con la potenza necessaria. A quest'ultimo proposito, giovano le esperienze maturate in Giappone con l'esercizio di una tranvia secondo una modalità della ricarica distribuita, seppure con distanza maggiore tra le fermate. In queste prove si è verificata la possibilità di arrivare a correnti di 1000 A, per tempi di ricarica dell'ordine del 1', senza la fusione dei contatti, di tipo rigido.

### 1.3 L'accumulo elettrico stazionario alle stazioni di ricarica veloce al capolinea

Consideriamo una configurazione tradizionale senza accumulo stazionario, Figura 14,



**Figura 14 Stazione di servizio elettrica senza accumulo di energia**

Nella stazione di tipo convenzionale che ricarica i veicoli con la sola rete elettrica, tutta la potenza sarà fornita da un certo numero di caricabatteria collegati alla rete elettrica.

L'energia richiesta alla rete è la somma delle energie di ogni veicolo, mentre la potenza è funzione del numero di veicoli contemporaneamente in ricarica.

E' evidente come la diffusione di sistemi di ricarica "automatici", di potenze elevate (fino a 400 kW) impone l'uso di accumuli stazionari che sollevino la rete dai picchi di carico che altrimenti potrebbero verificarsi.

<sup>2</sup> "Rapid Charged Hybrid: A Practical, 70-90% Electric Bus without Overhead Wires", Roger Bedell Opbrid Transporte Sostenible S.L.Granada, Spain

<sup>3</sup> Performance Characteristics of Lithium-ion Batteries of Various Chemistries for Plug-in Hybrid Vehicles", A. Burke, M. Miller, UCD, Institute of Transportation Studies, EVS-24, Stavanger 2009. Si osservi che il valore del rapporto P/E riportato in tabella è relativo a batterie per ibridi, e per quelle per trazione elettrica tale valore è più basso

Il sistema di accumulo dell'energia permette, infatti, di limitare notevolmente la potenza di corto circuito della rete nel punto di consegna, con un vantaggio economico da parte del gestore della rete stessa. Potendo erogare potenza in rete, è inoltre possibile contribuire a coprire i picchi di carico giornalieri, ricaricando poi le batterie fisse durante le ore di basso carico della rete, come, ad esempio, le ore notturne. Ovviamente, da un punto di vista prettamente energetico, è necessario considerare il rendimento del ciclo di carica e scarica delle batterie, è innegabile, però il vantaggio dovuto al fatto di poter contare su riserve di energia elettrica distribuite sul territorio. Dal punto di vista del costo dell'impianto, inserendo un accumulo si ottiene il vantaggio di poter notevolmente diminuire la potenza nominale del trasformatore e del convertitore AC/DC. La potenza nominale di queste due macchine è, infatti, inferiore a quella di picco e il suo valore dipende dalla capacità delle batterie fisse e dal diagramma temporale del carico.

In aggiunta ai vantaggi illustrati, raggiungibili in tempi relativamente brevi, è possibile prevederne un altro se, come è opinione comune, nel futuro si passerà da un sistema centralizzato a un sistema distribuito di produzione dell'energia elettrica, con microproduzione da fonti rinnovabili. In tal caso il sistema di accumulo della stazione di servizio elettrica può essere parte integrante e fondamentale di reti di piccola potenza; esso può funzionare da collettore locale di energia elettrica nelle ore in cui la produzione sia in esubero rispetto ai carichi, per poi metterla a disposizione per coprire i picchi di carico. Ciò permetterebbe inoltre di ridurre la distanza di trasmissione dell'energia elettrica e le relative perdite negli elettrodotti

### Caso con rete elettrica + batteria

L'aggiunta di un pacco batterie ad un sistema di ricarica come quello presentato, aggiunge perciò un grado di libertà al sistema, richiedendo quindi delle strategie per poter essere realizzato.

Le ipotesi che si fanno sono:

- La giornata di lavoro delle batterie viene fissata a 16 ore, al termine del quale le batterie devono essere completamente cariche per poter essere messe in funzione la giornata successiva;
- La stazione di ricarica è dotata di un convertitore AC/DC per prelevare dalla rete elettrica e convertire la corrente in continua; di un pacco batterie composto da celle di Litio-Ferro-Fosfato, dotato di un convertitore DC/DC per essere collegato al link e di un convertitore DC/DC per effettuare la ricarica. Quest'ultimo può anche essere direttamente l'inverter di trazione qualora il veicolo sia equipaggiato di un inverter bidirezionale.
- Il link della stazione è a 400 V
- Il sistema di accumulo avrà fissato la sua tensione massima (attorno ai 400V) e nelle simulazioni, per simulare diverse capacità delle batterie, verrà cambiata soltanto la capacità in Ah delle celle)

In Figura 15 lo schema d'impianto sopra descritto, dimensionato per la ricarica (parziale, 7') contemporanea di n. 2 autobus da 6 m ( $P_{max} = 2 \times 43 \text{ kW}$ ):

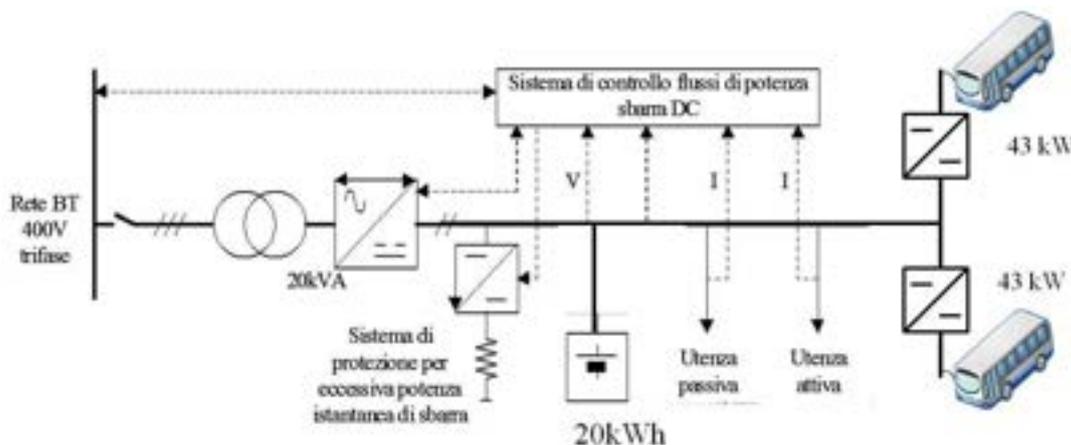


Figura 15.

Dalla Tabella 1 si può osservare come l'investimento iniziale sia comparabile nei due casi, grazie all'uso di convertitori DC/DC derivati da azionamenti "auto motive". Riducendosi per quanto sopra detto i costi di dell'energia nel caso della soluzione con accumulo, il costo di gestione annuo (per veicolo) o per chilowattora erogato non potrà che essere minore.

**Tabella 1. Confronto dei costi di primo impianto.**

<i>N. 2 autobus in esercizio continuo con ricarica rapida al capolinea</i>	<i>Soluzione senza accumulo</i>	<i>Soluzione con accumulo</i>
<b>Costo stimato</b>	50.000 € (n.2 colonnine da 50 KW)	20.000 € (compensatore da 20 kVA) +10.000 € (accumulo da 20 kWh, 500 €/kWh) + 12.000 € (n. 2 DC/DC da 43 kW ciascuno, costituiti da inverter bidirezionale, 150 €/kW)

Si può quindi concludere che l'uso dell'accumulo elettrico in ambito trasportistico risulta non solo utile ai fini di aggiungere flessibilità alla gestione del servizio, ma può risultare addirittura conveniente in termini economici.

#### 1.4 *Il Sistema di Ricarica con ricariche distribuite lungo la linea*

In questo caso il sistema a terra si compone di due sottosistemi,

1. quello di monitoraggio e controllo
2. quello di potenza, le stazioni o punti di ricarica + la rete di alimentazione elettrica

Mentre il primo andrà sviluppato in coerenza con lo sviluppo del sistema info-telematico di bordo, la struttura del secondo dipenderà anche dalle scelte fatte per la realizzazione del captatore di bordo.

Le Figura 16 mostra una rappresentazione schematica del sistema in due possibili versioni realizzative.

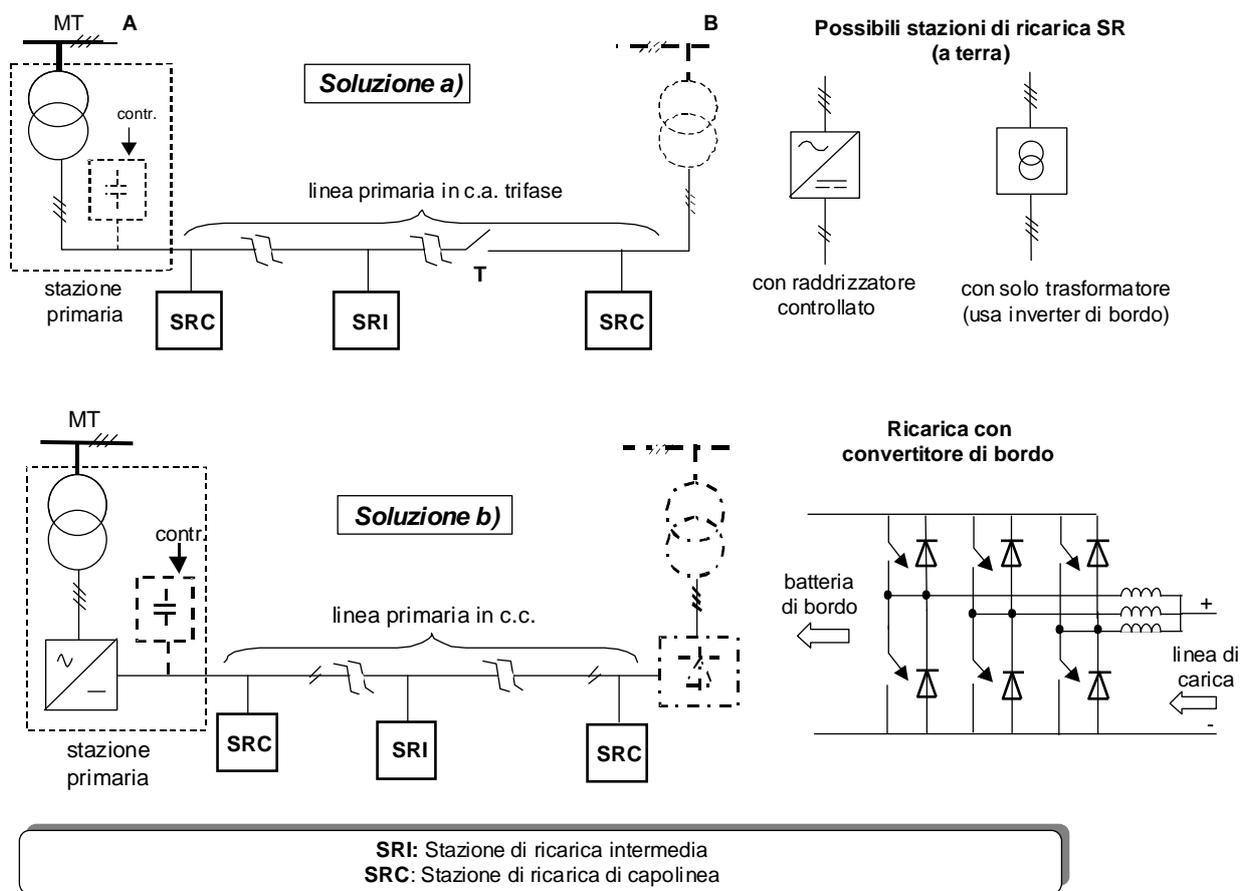


Figura 16 : Possibili schemi di alimentazione di linea ZeroFilobus con linea primaria a freggio.

Nella Figura 16 sono rappresentate due possibili realizzazioni di linea primaria che segue “a freggio” la linea commerciale dell’autobus, e alla quale sono connesse le stazioni di alimentazione del bus stesso.

Le stazioni prelevano energia dalla linea primaria e la trasferiscono all’accumulatore di bordo durante lo stazionamento del bus.

Come si vede la soluzione con linea primaria in corrente alternata può prevedere la ricarica della batteria a bordo o con l’uso di un convertitore AC/DC installato a terra, e connessione diretta al sistema in corrente continua, oppure con l’immissione dell’energia a bordo in corrente alternata trifase e raddrizzamento a bordo, sfruttando l’inverter di trazione.

In tal caso dovranno come prima cosa occorrerà valutare la compatibilità della portata in corrente dell’inverter di trazione con le correnti previste per la ricarica; essere inoltre essere previsti i seguenti dispositivi:

- induttori per garantire un corretto funzionamento dell’inverter. Questi induttori potranno essere nelle stazioni di ricarica di terra ed eventualmente essere sostituiti da adeguato dimensionamento dell’induttanza longitudinale di dispersione del trasformatore della stazione di ricarica. Nel caso di uso di linea primaria in corrente continua appare invece auspicabile che gli induttori siano installati a bordo in quanto questo consente la ricarica a due contatti (corrente continua) invece che a tre (le tre gambe dell’inverter di trazione).
- apparecchiature di commutazione per commutare la connessione trifase dell’inverter dai motori di trazione alla linea di alimentazione e viceversa.

La soluzione con linea primaria in corrente continua prevede il mantenimento della linea a tensione costante, e il controllo della ricarica attraverso l’utilizzo dell’inverter di propulsione come convertitore DC-DC. Anche in questo caso sarà necessario valutare la compatibilità della portata in corrente dei convertitori di bordo con le correnti di ricarica, prevedere degli induttori (visualizzati in figura) che potrebbero essere

installati a bordo o a terra, e apparecchiature di commutazione che disconnettano in fase di ricarica i motori di trazione dai relativi inverter, e li colleghino alla linea di alimentazione. Anche il controllo dell'inverter di bordo andrebbe evidentemente progettato per questa funzione di ricarica.

In tutti i casi l'uso dei convertitori di bordo per il controllo della ricarica riduce considerevolmente il costo della stazione di ricarica a terra.

Nella sua versione priva di linea primaria: le stazioni di alimentazione del bus prelevano energia direttamente dalla rete elettrica del sistema di distribuzione pubblico, eventualmente previa realizzazione di un breve tratto di collegamento.

Anche in questo caso la SR potrà essere attrezzata per l'alimentazione del bus in corrente alternata trifase o in corrente continua.

In questo caso se l'alimentazione del bus è in corrente alternata trifase occorrerà ancora sfruttare gli inverter di trazione per il controllo della carica della batteria, mentre nel caso in cui si preveda nella SR un sistema di conversione AC/DC risulta opportuno che si tratti di un sistema dotato convertitore a commutazione forzata, in modo da utilizzarlo per sostenere, con l'immissione di potenza reattiva, la tensione della rete pubblica di alimentazione durante le fasi di alimentazione del bus, che prevedono l'assorbimento di considerevoli correnti per brevi durate.

Di conseguenza se l'alimentazione del bus è in corrente continua, essa verrà realizzata con l'immissione di energia direttamente sulla sbarra della batteria, senza quindi utilizzare gli inverter di trazione.

La soluzione "b" di Figura 16 presenta, rispetto a quella "a", il vantaggio di una considerevole riduzione dei costi di realizzazione della linea primaria, da confrontarsi però, caso per caso, con il maggior costo dovuto al fatto che occorrerà impegnare verso il distributore dell'energia l'intera potenza di ricarica per ogni stazione di ricarica, e con il fatto che in molte situazioni pratiche può non risultare disponibile da parte del distributore pubblico l'elevata potenza necessaria alla ricarica.

Nel caso di utilizzo di linea primaria le connessioni con la rete pubblica possono essere dotato di sistema di accumulo dell'energia che può portare l'impegno di potenza ad una frazione della potenza necessaria alla singola ricarica. Il sistema può anche essere bidirezionale, scambiando energia con la rete, e si entra allora nel campo delle "smart grid".

In tutti i casi il bus è dotato di un sistema di accumulo di modesta entità, che viene ad essere caricato molte volte durante il servizio giornaliero, sfruttando le pause ai capolinea (più lunghe) e una o più delle fermate lungo la linea (necessariamente più brevi).

Riassumendo:

vantaggi della linea primaria:

- riduzione del corrispettivo di potenza verso il distributore della rete pubblica anche molto consistente, in funzione della numerosità delle ricariche

svantaggi della linea primaria:

- necessità di impegnare suolo pubblico
- costo della linea (fortemente dipendente dal tessuto urbano considerato)

## 1.5 Scelta del sistema di accumulo, supercondensatori o batterie litio-ione

Quale sarà la tipologia di accumulo stazionario più adatta al caso sopra descritto? Uno studio sperimentale dell'Università di Pisa<sup>4</sup> mette a confronto i supercondensatori e le batterie al litio ad alta potenza specifica di ultima generazione (Figura 17)

---

<sup>4</sup> *Comparison of SC and high-power batteries for use in hybrid vehicles*,

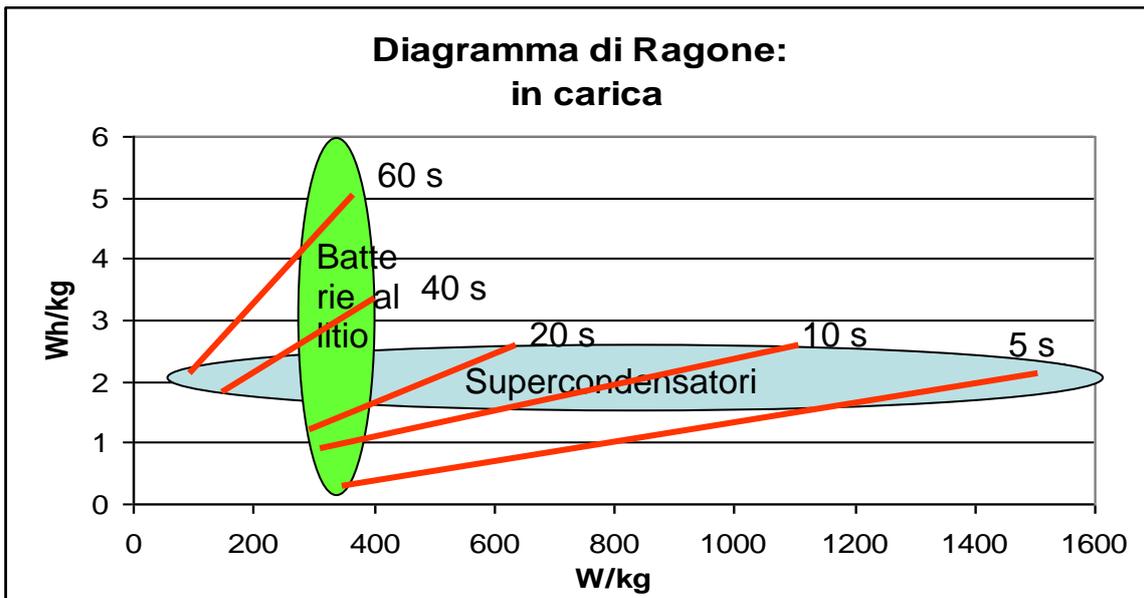


Figura 17 Diagramma di Ragone, fase di ricarica

I risultati ottenuti consentono di verificare come i tempi di ricarica (12") considerati nella missione che prevede fermate molto ravvicinate risultino meglio gestibili con i supercondensatori, perché questi ultimi a parità di potenza richiesta pesano di meno ed hanno un miglior rendimento di carica/scarica rispetto al litio.

Per durate di ricarica maggiori, ad esempio con una gestione assimilabile alla ricarica al capolinea, 5', risultano più adatte le batterie.

## 2 Il caso di studio

I sistemi di accumulo ibridi, analizzati nel presente lavoro vengono applicati ad un caso reale, quello analizzato nel rapporto RSE del 201 [3]. Sulla base dei dati di input acquisiti da tale rapporto tecnico, si analizzeranno due tipologia di ricarica rapida: una ricarica rapida al capolinea e una ricarica ultrarapida alla fermata.

### 2.1 *Il profilo di missione*

Il profilo di missione utilizzato è quello dell'esercizio estivo delle linee 12A e 10 del Comune di L'aquila. Nel precedente rapporto RSE tale servizio [3] è stato modificato per poter consentire l'utilizzo di veicoli elettrici in modo da potersi ricaricare al capolinea.

**Il servizio così modificato è riportato nella Tabella 2, mentre la nomenclatura in**

Tabella 3

Tabella 2: Il servizio di trasporto analizzato [3]

Orario	Durata sosta da esercizio (min)	Durata giro (min)	Velocità (km/h)	Traetta	Metri	Massa	Consumo kwh	Consumo unitario (kwh/km)	Energia Ricarica (kWh)	kwh batt	SOC%
06:45		00:25	29,20	"A1"	12.168	3.400	7,37	0,61		40,96	100,00
07:10		00:50	23,63	"B1"	19.691	5.500	10,53	0,53		33,59	82,01
08:00		00:25	26,39	"C1"	10.998	5.500	8,79	0,80		23,06	56,30
08:25		00:35	20,87	"C2"	12.177	5.500	5,85	0,48		14,27	34,84
sosta programmata da allungare	00:25								16,67	8,42	20,56
09:25		00:25	26,39	"C1"	10.998	5.500	8,79	0,80		25,09	61,25
09:50		00:35	20,87	"C2"	12.177	5.500	5,85	0,48		16,30	39,79
sosta programmata da diminuire	01:00								30,51	10,45	25,50
11:25		00:25	26,39	"C1"	10.998	5.500	8,79	0,80		40,96	100,00
11:50		00:35	20,87	"C2"	12.177	5.500	5,85	0,48		32,17	78,54
12:25		00:20	28,08	"D2"	9.360	3.400	3,47	0,37		26,32	64,26
sosta programmata	01:20								18,11	22,85	55,79
14:05		00:15	39,84	"D1"	9.961	3.400	4,92	0,49		40,96	100,00
14:20		00:25	26,39	"C1"	10.998	5.500	8,79	0,80		36,04	87,99
14:45		00:35	20,87	"C2"	12.177	5.500	5,85	0,48		27,25	66,53
sosta programmata	00:40								19,56	21,40	52,25
16:00		00:25	26,39	"C1"	10.998	5.500	8,79	0,80		40,96	100,00
16:25		00:35	20,87	"C2"	12.177	5.500	5,85	0,48		32,17	78,54
sosta programmata	00:40								14,64	26,32	64,26
17:40		00:25	26,39	"C1"	10.998	5.500	8,79	0,80		40,96	100,00
18:05		00:35	20,87	"C2"	12.177	5.500	5,85	0,48		32,17	78,54
sosta programmata	00:20								12,50	26,32	64,26
19:00		00:25	26,39	"C1"	10.998	5.500	8,79	0,80		38,82	94,78
19:25		00:35	20,87	"C2"	12.177	5.500	5,85	0,48		30,03	73,32
sosta programmata	00:10								4,17	24,18	59,03
20:10		00:25	26,39	"C1"	10.998	5.500	8,79	0,80		28,35	69,21
20:35				"C2"	12.177	5.500	5,85	0,48		19,56	47,75
				"D2"	9.360	3.400	3,47	0,37		13,71	33,46
										10,24	24,99

Tabella 3 Nomenclatura dei percorsi del minibus elettrico

A1	Deposito-Foce
A2	Foce-Deposito
B1	Capolinea 12a -Terminal
B2	Terminal- Capolinea 12a
C1	Terminal- Capolinea 10
C2	Capolinea 10-Terminal
D1	Deposito-Terminal
D2	Terminal-Deposito

Il bus che serve queste 2 linee + operativo per circa 13 ore a cui va aggiunto il trasferimento dal deposito al Terminal e viceversa. Le velocità medie, il consumo energetico, l'energia ricaricata al capolinea e i tempi di sosta sono tutti riportati nella tabella e vengono presi come dati di input sia per il caso relativo alla ricarica al capolinea, sia per il caso della ricarica alla fermata.

Nel caso della stazione di ricarica al capolinea, verrà simulata come installata nel Terminal e tutte le ricariche effettuate dovranno erogare l'energia riportata in Tabella 2.

Nel caso invece di un sistema di ricarica alla fermata, si prenderà la distanza della linea 12B, circa 11 km, e anche il numero delle fermate, circa 30: ogni fermata disterà mediamente di 0.366 km.

## 2.2 Il minibus

Il minibus preso in esame è il Tecnobus Gulliver, già esaminato in [3] e modificato per poter eseguire un profilo di missione più oneroso rispetto alle sue possibilità.



Figura 18 Tecnobus Gulliver

Tabella 4: Specifiche del Tecnobu Gulliver

Peso a vuoto	6300 kg
Lunghezza	5.1 m
Larghezza	4.3 m
Numero passeggeri	28
Capacità batterie	585 Ah/Piombo
Corrente max scarica	1 C
Corrente max carica	0.2 C
Tensione batteria	72 V
Motore elettrico	CC 24kW max
Raggio ruota	0.365 m

Le modifiche stimate nel predetto rapporto consistono in:

- un motore elettrico più potente, di 80 kW, in grado di poter percorrere tratti extraurbani e con pendenze a velocità maggiori rispetto a quanto possibile con il motore originale;
- una tensione principale di 400V rispetto ai 72 V del veicolo originale;
- un pacco batterie al Litio-Ferro-Fosfato, più performante rispetto a quelle al piombo acido ed in grado di accettare correnti di ricarica fino a 3 volte quella nominale.

Per informazioni più dettagliate su come è stato scelto il veicolo e le sue modifiche si rimanda a [3].

### 3 La stazione di ricarica

Esistono diverse tipologie di stazione di ricarica rapida: la prima che si vuole riportare è un comune stazione di ricarica prodotta dalla Circutor (Figura 19) le cui prestazioni sono già state analizzate in [7].



Figura 19 Stazione di ricarica rapida in continua della Circutor.

È una stazione di ricarica in continua con una potenza massima di 50 kW comunemente utilizzata per la ricarica di veicoli, ad esempio la Nissan Leaf.

Una ricarica di tipo Flash Charge invece, appunto una carica brevissima di tipo flash, esiste ed è operativa a Ginevra; le stazioni di ricarica sono realizzate dalla ABB mentre gli autobus sono prodotti dalla Volvo. La ricarica viene effettuata in 15 secondi con potenze che possono variare da 150 kW a 450 kW [10].

L'energia che viene immessa è quella che serve al bus per la trazione, mentre l'energia per i servizi (che in un autobus possono arrivare al 30% dell'energia consumata totale) viene ricaricata al capolinea.



Figura 5. Stazione di ricarica veloce automatica per bus con "Opportunity charging".

Potenza modulare	150 kW, 300 kW, 450 kW
Collegamenti AC in ingresso	3P + N + PE
Corrente e potenza nominale max. ingresso (per modulo da 150 kW)	3 x 250 A, 173 kVA
Intervallo tensione d'ingresso	400 VAC +/- 10% (50 Hz a 60 Hz)
Corrente massima d'uscita (per modulo da 150 kW)	200 A
Intervallo tensione di uscita	400 - 800 VDC (Combo 2)
Connessione DC	Standard IEC 61851-23, IEC 61851-24 / DIN 70121
Metodo di connessione tra bus e caricatore	Sistema automatico quadripolare o connettore Combo 2
Installazione	Indoor, Outdoor
Temperatura operativa standard	Da -10 °C a +45 °C (da -20 °C a +45 °C opz.)
Connessione di rete	GSM / GPRS, 10/100 base-T Ethernet
Protezione	IP54 - IK10
Dimensioni (D x W x H)	800 x 1200 x 2100 mm

Figura 20 La stazione di ricarica della ABB per la ricarica alla fermata

Infine per quanto riguarda la connessione fisica al veicolo si riporta un pantografo della Schunk [9], in grado di accettare correnti fino a 1000 A per 60 secondi. Nel caso di ricariche alla fermata le potenze sono piuttosto elevate e entrambi i sistemi (ABB e Schiuk) sono in grado di svolgere questo tipo di funzioni.



Maximum rated voltage	1800V
Maximum current at standstill	500A – 4 min. 1000A – 1 min.
Supply voltage of electric lowering unit	24V DC $\pm$ 30%
Contact force (adjustable)	100N / 50N / 100N
Raising-/lowering time	$\leq$ 5sec.
Weight	$\approx$ 80kg
Operating temperature	-30°C to +65°C
Maximum working range	1060mm

Figura 21 Pantografo Schunk SLS101

Quest'ultimo però accetta forti tensioni e forti correnti, che risultano interessanti per una applicazione che verrà di seguito riportata: la ricarica del veicolo alla fermata per travaso diretto tra supercondensatori. Questa applicazione risulta molto economica in quanto non necessita di nessun convertitore, abbassando quindi di molto i costi di realizzazione.

## 4 Il Modello di simulazione

Nel presente capitolo si riporta il dettaglio dei modelli di simulazione utilizzati per i calcoli effettuati per lo studio delle stazioni di ricarica ibrida alla fermata o al capolinea.

Gli oggetti che compongono tale stazione sono:

- Rete elettrica con il suo convertitore ACDC;
- Pacco batteria con il suo convertitore DCDC;
- Supercondensatori con o senza il suo convertitore DCDC;
- Convertitore DCDC per effettuare la ricarica, se necessario.

Di seguito si riportano nel dettaglio come i suddetti oggetti vengono simulati dal modello.

### 4.1 Rete elettrica

La stazione di ricarica, durante la simulazione, fornirà energia, ad una certa potenza, per ricaricare il veicolo e/o i supercondensatori e/o le batterie. Ci sarà certamente bisogno di un convertitore alternata/continua con una potenza nominale uguale a quella della rete elettrica. Nel caso di ricarica alla fermata, o anche di ricarica al capolinea, qualora possibile, si cercherà di utilizzare valori di potenza dalla rete standardizzati, ossia ad esempio la 43 kW (connettore da 64 A) o la 21 kW (32A).

### 4.2 Batterie

Il modello utilizzato per la simulazione delle batterie (piombo acido o litio) è un modello di tipo "BLACK BOX", e prende come riferimento gli articoli [4] e [5].

Il modello di calcolo dei parametri in batterie avrà come input la corrente assorbita o erogata e come uscita lo stato di carica, la tensione e la sua temperatura. Nel caso di batteria al piombo acido, lo stato di carica ha un andamento non lineare con la corrente erogata. Ne deriva che per alte correnti medie erogate la capacità diminuisce mentre avviene il contrario se la batterie viene scaricata lentamente.

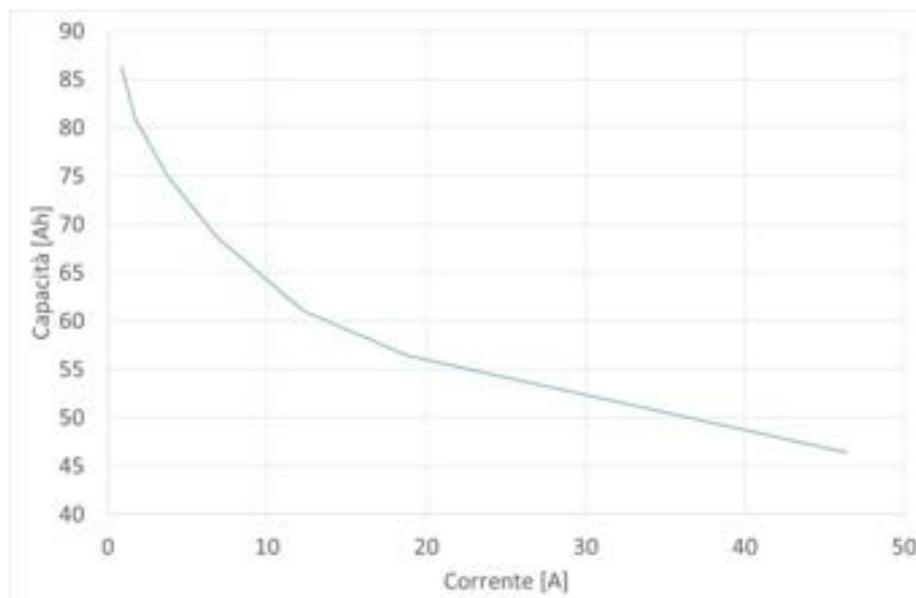


Figura 22: Andamento della capacità delle batterie con la corrente erogata (HAZE HZY EV12-65)

In Figura 22 è riportato l'andamento della capacità della batteria ACCU HZY 60 Ah al variare della corrente erogata; si può notare come il valore della capacità è riferito ad una scarica di 5 ore, equivalenti a 12 A. la capacità quindi può variare moltissimo in base all'utilizzo che ne viene fatto. Altro fattore che influenza la capacità delle batterie (e quindi l'autonomia del veicolo) è la temperatura delle stesse.

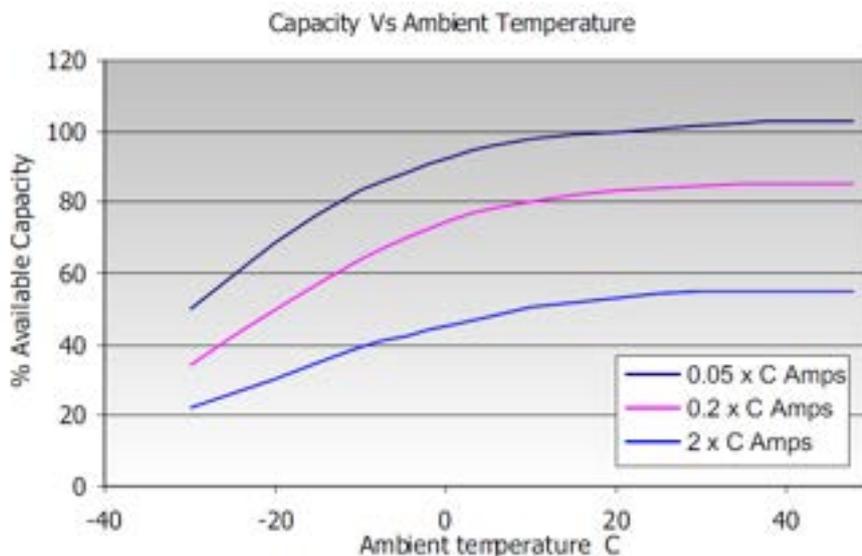


Figura 23: Influenza della temperature ambiente sulla capacità della batteria (HAZE HZY EV12-65)

Anche qui l'influenza della temperatura non è trascurabile e per temperature sotto lo zero la capacità comincia a scendere rapidamente.

Questi due fenomeni sono tenuti in considerazione utilizzando delle mappe all'interno del simulatore in modo da tener conto sia di una differente corrente media erogata rispetto al valore nominale, sia di una temperatura di esercizio lontana da quella di riferimento (che in genere è di 23 °C).

Il circuito elettrico della batteria è rappresentato come un generatore di forza elettromotrice in serie con una resistenza e un circuito RC, come in Figura 24.

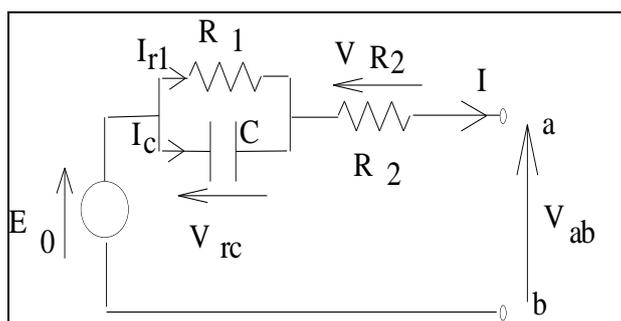


Figura 24: Il circuito equivalente delle batterie al piombo.

Per ottenere tutti i valori riportati in figura è però necessario testare ogni batteria con delle prove specifiche su un ciclatore. Le equazioni che vengono utilizzate per calcolare la tensione di batteria e le correnti in ogni singolo ramo del circuito sono<sup>5</sup>:

$$V_{ab} = E_0 - I_{R1} \cdot R_1 - I \cdot R_2 \quad \text{Equazione 1}$$

$$\frac{dI_{R1}}{dt} = \frac{1}{\tau} \cdot (I - I_{R1});$$

Equazione 2

dove  $\tau = R_1 \cdot C$ .

Sebbene il modello sviluppato sia in grado di simulare le batterie al piombo come riportato in [4] **Errore. 'origine riferimento non è stata trovata.**, una buona approssimazione si può ottenere rappresentando la batteria come un generatore di forza elettromotrice e una resistenza in serie semplificando di molto la calibrazione del modello di batteria ed utilizzando semplici correlazioni empiriche per il calcolo della resistenza interna.

Per il calcolo della temperatura della batteria (per simulare l'influenza della stessa sulla capacità) si sono utilizzate le seguenti relazioni:

$$C_\theta \frac{d\theta}{dt} = P_{Loss} + \frac{(\theta - \theta_a)}{R_\theta}$$

Eq. 1

Dove :

$C_\theta$  : è la capacità termica (~20000);

$\theta$  : è la temperature dell'elettrolita;

$P_{Loss}$  : Calore generato internamente alla batteria;

$R_\theta$  : Resistenza termica (~0.6).

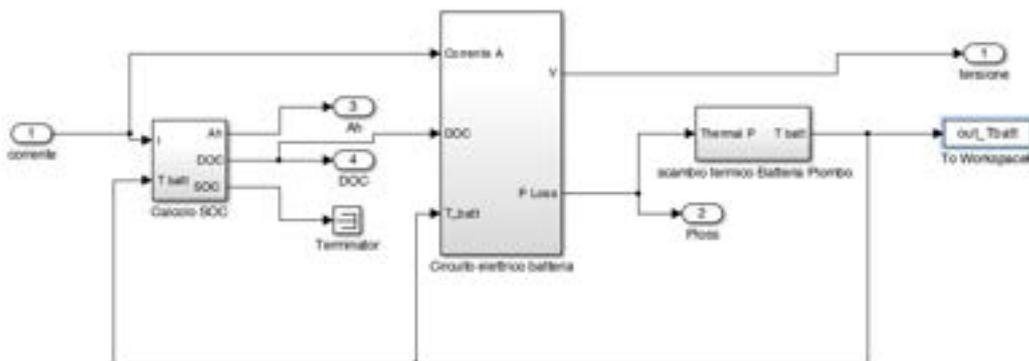


Figura 25: Schema a blocchi del modello di batteria sviluppato in SIMULINK

In Figura 25 si riporta lo schema a blocchi sviluppato in SIMULINK per il modello di batteria al piombo acido. Nel caso di batteria agli ioni di litio, invece, il comportamento è abbastanza differente: l'influenza della corrente erogata sulla capacità è molto minore e in alcuni casi può ritenersi costante, l'influenza della temperatura ha un comportamento simile e il circuito elettrico equivalente rimane lo stesso di quella al piombo acido, nella simulazione del veicolo equipaggiato con batterie al litio quindi non ci saranno differenze per quanto riguarda il modello ma sono valori differenti di input.

Per quanto riguarda le batterie al litio, il comportamento è molto simile con l'unica differenza che la capacità della batteria varia in modo trascurabile con la corrente di scarica. Il modello rimane quindi valido e va calibrato in funzione del tipo di batteria da simulare.

Le batterie utilizzate nel presente lavoro sono di tipo Litio-ferro-fosfato che, anche se un po' meno performanti in termini di potenza specifica e energia specifica hanno il vantaggio di essere più sicure rispetto alle Li-Ion e anche di accettare correnti in ricarica leggermente più alte: celle al Li-Ion con correnti di ricarica di 2C sono molto comuni, ma quelle di litio ferro fosfato hanno molto spesso correnti di ricarica di 3C.

Tabella 5 specifiche delle batterie ferro-fosfato utilizzate nel presente lavoro.

Model name	LFP060AHA	Alternative product marking TS-LFP60AHA, WB-LYP60AHA
Nominal voltage	3.2 V	Operating voltage under load is 3.0 V
Capacity	60 AH	+/- 5%
Operating voltage	max 4.0V - min 2.8V	At 80% DOD
Deep discharge voltage	2.5 V	The cells is damaged if voltage drops bellow this level
Maximal charge voltage	4 V	The cells is damaged if voltage exceeds this level
Optimal discharge current	< 30 A	0.5 C
Maximal discharge current	< 180 A	3 C, continuous for max 15 minutes from full charge
Max peak discharge current	< 600 A	10 C, maximal 5 seconds in 1 minute
Optimal charge current	< 30 A	0.5 C
Maximal charge current	< 180 A	< 3 C with battery temperature monitoring
Maximal continuous operating temperature	80 °C	The battery temperature should not increase this level during charge and discharge
Dimensions	114 x 203 x 61	Millimeters (tolerance +/- 2 mm)
Weight	2.3 kg	Kilograms (tolerance +/- 150g)

Tutti i parametri di input del modello invece, come i vari valori di resistenza interna di scarica e carica in funzione del SOC sono stati acquisiti in [6], Tabella 6

Tabella 6 valori di resistenza interna utilizzati per la simulazione delle batterie (Cap 60 Ah).

Grandezza	Valore [mΩ]
$R_{\Omega,dch}$	1,66577368
$R_{1C,dch}$	2,66308912
$R_{\Omega,cha}$	1,64429720
$R_{1C,cha}$	1,65100860
$R_{HC,dch}$	1,258793824

Nel caso di celle con capacità diversa da quella riportata nella tabella precedente, tali valori vengono espressi come valore di  $\Omega \cdot Ah$  in modo che per capacità maggiori la resistenza interna è proporzionalmente minore.

### 4.3 Supercondensatori

I supercondensatori sono un dispositivo di accumulo completamente differente rispetto alle batterie: hanno una elevata potenza specifica, ma una bassissima energia. Questa caratteristica li rende indicati per forti scariche in tempi molto ridotti, tipiche ad esempio delle ricariche alla fermata di pochi kWh, ma non indicati per ricariche complete, anche se rapide.

La quantità di carica presente all'interno di un condensatore può essere espressa nella forma:

$$\frac{dQ}{dt} = I \tag{Equazione 3}$$

Mentre la tensione ai capi dell'armatura del condensatore:

$$V = \frac{Q}{Cap} - R_{Cap} \cdot I \tag{Equazione 4}$$

L'energia, ipotizzando una scarica dalla tensione nominale fino ad una tensione minima  $V_{min} = \frac{V_{max}}{2}$  quindi è:

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (V^2 - V_{min}^2)^2 \quad \text{Equazione 5}$$

$$SOC = \frac{Q - Cap \cdot V_{min}}{Cap \cdot (V_{max} - V_{min})} \quad \text{Equazione 6}$$

Durante la scarica dei supercondensatori, che avviene a correnti molto alte, risulta importante conoscere la loro temperatura per poter verificare che essa non superi il suo valore massimo. Per far questo si utilizza un semplice modello di scambio termico che necessita di 2 coefficienti di calibrazione reperibili nei datasheet del produttore:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P_{Loss} \cdot \frac{\Delta T}{R_{th}}}{C_{th}} \quad \text{Equazione 7}$$

$$P_{Loss} = R_{Cap} \cdot I^2$$

$C_{th}$ : capacità termica (~33000, da specifica Maxwell)

$R_{th}$ : Resistenza termica (~0.04, da specifica Maxwell)

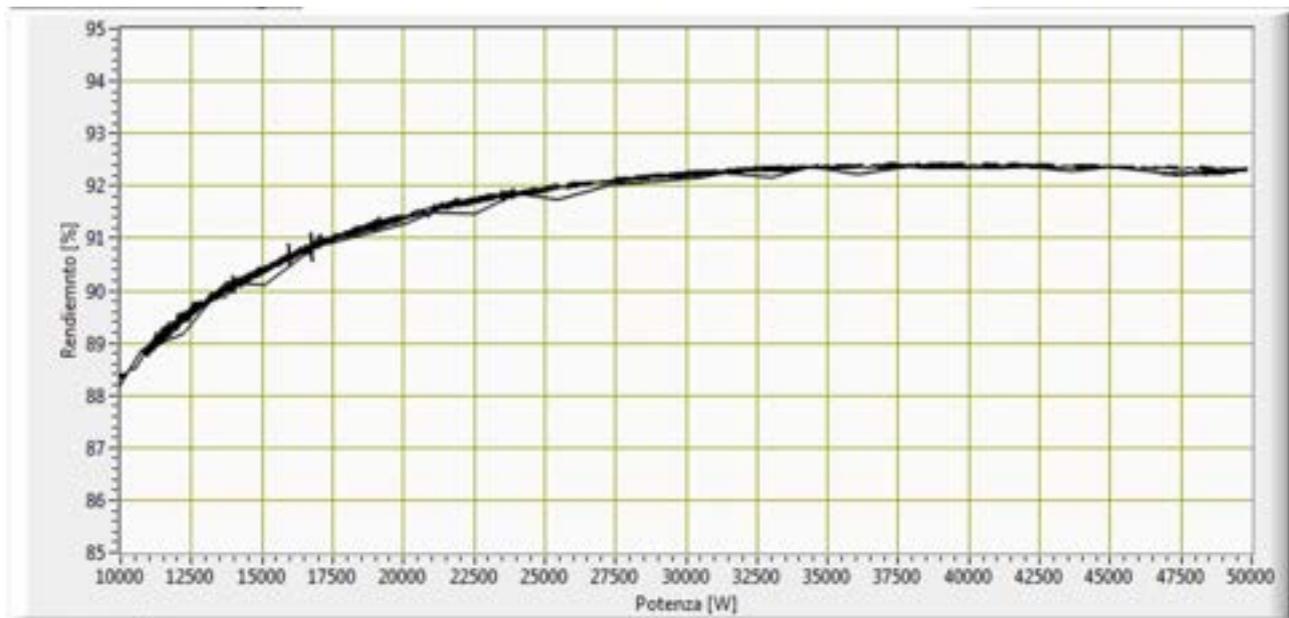
Il banco di supercondensatori utilizzato nelle simulazioni è il BMOD0063 P125 B08 prodotto dalla Maxwell, con 125 V di tensione nominale e 63 Farad di capacità-

Rated Capacitance <sup>1</sup>	63 F
Minimum Capacitance, initial <sup>1</sup>	63 F
Maximum Capacitance, initial <sup>1</sup>	76 F
Maximum ESR <sub>oc</sub> , initial <sup>1</sup>	18 mΩ
Test Current for Capacitance and ESR <sub>oc</sub> <sup>1</sup>	100 A
Rated Voltage	125 V
Absolute Maximum Voltage <sup>2</sup>	136 V
Absolute Maximum Current	1900 A
Leakage Current at 25°C, maximum <sup>3</sup>	10 mA
Maximum Series Voltage	1500 V
Capacitance of Individual Cells <sup>11</sup>	3000 F
Maximum Stored Energy, Individual Cell <sup>11</sup>	3.0 Wh
Number of Cells	48

Figura 26 Caratteristiche del banco di condensatori della MAXwell

## 5 Convertitori

Per poter collegare la rete elettrica, che lavora in alternata, a qualunque dispositivo che lavora in continua, c'è bisogno di un convertitore AC/DC. Nel presente lavoro non si entrerà nel dettaglio del funzionamento del convertitore, ma questa trasformazione di energia porta con se delle perdite che vanno prese in considerazione.



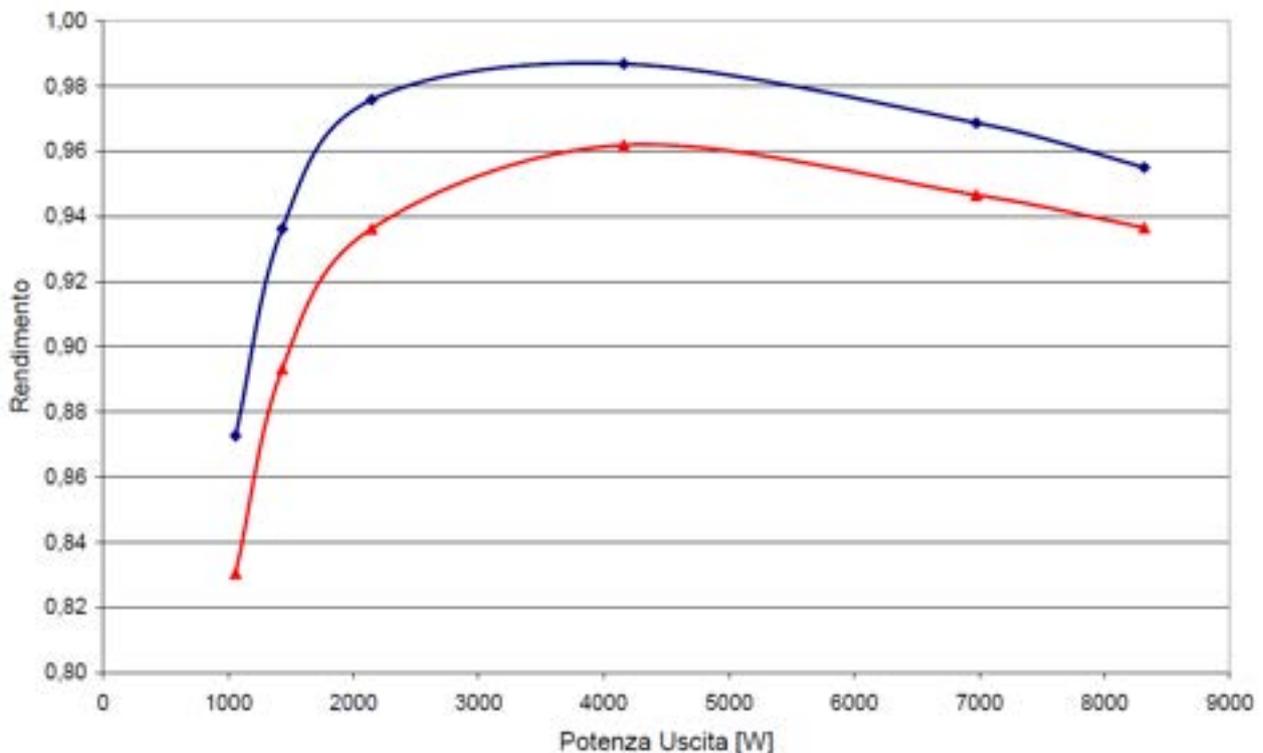
**Figura 27** Curva di efficienza della stazione di ricarica in continua della Circutor durante una ricarica della Nissan Leaf [7]

In

Figura 27 si riporta la curva di efficienza di una stazione di ricarica in continua prodotta dalla CIRCUTOR. È una stazione di ricarica rapida con potenza massima di 50 kW, e la curva si riferisce alla ricarica di una Nissan Leaf.

Questa curva, in funzione della sola potenza verrà presa in considerazione per il calcolo del rendimento di conversione della rete elettrica.

Per il caso di convertitori DCDC, soprattutto nel caso in cui siano collegati a dei supercondensatori, la variazione della tensione da inizio alla fine non ha un ruolo secondario sull'efficienza e quindi c'è bisogno di una mappa tridimensionale.



**Figura 28** Rendimento di un convertitore DCDC per una tensione dei supercondensatori a 40V (linea rossa) e 60V (linea blu) con tensione di uscita pari a 82 V di una microcar [8].

Per la simulazione di questo tipo di convertitori si usano i dati ricavati in un precedente lavoro [8] in cui si sono misurati i rendimenti di un inverter DCDC che collegava un banco di supercondensatori a un link da 82 V di una microcar. Tali valori sono stati normalizzati ipotizzando che avendo la stessa tecnologia, offriranno lo stesso rendimento per valori di potenza proporzionali alla potenza nominale.

### 5.1 Gestione delle sorgenti di energia

Un sistema di ricarica con più sorgenti di energia, appunto la rete elettrica, un pacco batterie ed un banco di supercondensatori, ha per forza di cose bisogno di un gestore che decida chi e come ricaricare in funzione di più diversi parametri.

La strategia scelta durante la scarica è la seguente:

- La rete fornisce la sua potenza costante:
  - Durante la carica del veicolo;
  - Successivamente ricaricando le batterie ed i supercondensatori;
- Le batterie forniscono potenza costante in base alla loro potenza massima ammissibile:
  - Durante la ricarica del veicolo forniscono potenza costante in base alla loro potenza massima ammissibile;
  - Durante la ricarica dei supercondensatori forniscono potenza costante in base alla loro potenza massima ammissibile;
  - Si ricaricano dalla rete quando anche i supercondensatori sono carichi;
- I supercondensatori
  - Si scaricano durante la ricarica del veicolo fornendo tutta la potenza necessaria meno quella proveniente dalle batterie e quella dei supercondensatori;
  - Si ricaricano tramite la potenza della rete elettrica e tramite le batterie.

Questa strategia funziona anche quando un componente sia mancante, ossia se non ci sono le batterie o i supercondensatori.

## 6 Risultati

Lo studio dei sistemi ibridi nel presente rapporto è stato diviso in due parti:

- la prima parte è relativa allo studio delle stazioni di ricarica ibride al capolinea di una fermata di un bus;
- la seconda parte riguarda la ricarica alla fermata.

Le due stazioni sono molto diverse per potenza erogata, energia ricaricata e per tempi di ricarica; nel primo caso le potenze sono quelle di una ricarica rapida al capolinea riportante anche in [3], ossia 40 kW, con tempi di ricarica più lunghi e variabili che vanno da 10 minuti per una ricarica parziale fino a 1 ora e 20 minuti per una ricarica completa ed energia trasferite che arrivano anche a 30.5 kWh.

Una stazione di ricarica alla fermata invece ha bisogno di potenze molto più elevate (in questo caso di 300 kW) per trasferimenti di energia di circa 0.8 kWh in 15 secondi di sosta.

Per il primo caso, vista la quantità di energia in gioco, si ritiene che un accumulo ibrido in grado di ridurre e livellare la potenza richiesta alla rete possa essere equipaggiato con batterie senza supercondensatori che hanno la caratteristica di erogare grandi potenze per brevi periodi, mentre il secondo caso, è l'opposto e sono i supercondensatori ad erogare la gran parte della potenza per effettuare la ricarica. Per una ricarica alla fermata possono comunque esserci delle batterie tampone, che hanno la funzione di contribuire (insieme alla rete elettrica) alla ricarica del veicolo, ma anche di ricaricare più rapidamente i supercondensatori per poter poi effettuare le ricarica successiva.

### 6.1 Ricarica al capolinea

Il primo caso preso in considerazione è quello in cui il veicolo si ricarica al capolinea: ci sarà quindi una sola stazione di ricarica per tutta una linea di bus.

Per le grandi energie in gioco e anche per i costi €/kWh dei supercondensatori, quest'ultimi non si ritengono utili per questo tipo di ricarica. Si studieranno quindi diverse combinazioni di potenza dalla rete elettrica e di accumuli stazionari composti da batterie (litio Ferro Fosfato) che possono minimizzare e livellare la richiesta di potenza dalla rete elettrica, obiettivo del presente rapporto.

#### 6.1.1 Caso di riferimento: solo rete elettrica

Il primo caso che si esamina è quello in cui la stazione sia di tipo convenzionale che ricarica i veicoli con la sola rete elettrica: tutta la potenza sarà fornita da un caricabatteria collegato alla rete elettrica. La potenza disponibile è esattamente quella necessaria alla ricarica con l'aggiunta delle perdite di rendimento dovute ad un convertitore ACDC necessario alla ricarica.

**Tabella 7 Riepilogo delle simulazioni ne caso di sola rete elettrica al variare del numero di veicoli/ora**

Veicoli/h	Time h	Prete max kW	Energia rete kWh	PtoVehicle kWh	Global Efficiency %	Numero massimo veicoli in ricarica
1	16	43.5	124.821	116.078	0.93	1
2	16	87	249.642	232.156	0.93	2
4	16	172	499.3	464.3	0.93	4
6	16	215	748.919	696.4667	0.93	5

Il riepilogo di tali risultati è riportato in

Tabella 7; le simulazioni sono state effettuate inserendo il profilo di missione del bus riportato in [3] e ripetuto ogni 60/n veicoli ora. Il caso è abbastanza semplice poiché l’energia richiesta alla rete è la somma delle energie di ogni veicolo, mentre la potenza è funzione del numero di veicoli contemporaneamente in ricarica. Per i valori simulati nel presente studio solo nel caso de 6/veicoli ora non ci sono tutti i veicoli contemporaneamente in ricarica, ma 5, e riassumendo ogni veicolo giornalmente richiede alla rete 116.078 kWh con 43.5 kW di potenza. Il rendimento del ACDC converter è di 0.93, come quello della stazione di ricarica Circutor testato precedentemente in [7].

### 6.1.2 Caso con rete elettrica + Batteria

L’aggiunta di un pacco batterie ad un sistema di ricarica come quello presentato, aggiunge un grado di libertà al sistema, richiedendo quindi delle strategie per poter essere realizzato (Figura 29).

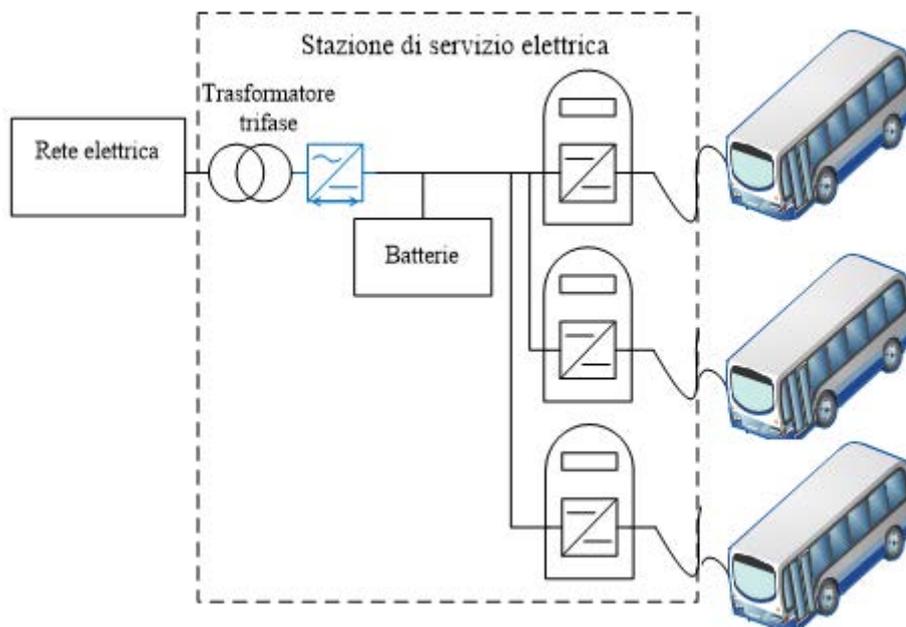


Figura 29 Stazione di ricarica con batteria di compensazione

Fra le possibili strategie se ne riportano alcune:

- Minima potenza dalla rete; nel caso in cui si possa disporre di un pacco batterie molto grande, allora la scelta della potenza richiesta alla rete sarà quella minima, o quella media, ossia quel valore di potenza che per tutta la giornata (nel nostro caso 16 ore) viene erogato per ricaricare completamente il pacco batterie.

- Uso di batterie “Second Life”; in questo caso la batteria che sta a terra è una batteria di tipo “second life” ossia una batteria che ha già svolto il suo lavoro (ad esempio sul bus) e, avendo perso una parte della sua capacità (nel caso degli autoveicoli il 20%) può essere destinata ad un uso meno intensivo. Il vantaggio di questa strategia è che si dispone di batterie che hanno un costo molto basso e nel caso in cui quella batteria che si intende installare sulla stazione, ha già funzionato sul bus che vuole ricaricare, ha anche la stessa capacità, cosa questa molto interessante.
- Minimo costo: nel caso in cui esista una combinazione di costi di esercizio e costo di acquisto che abbia un valore minimo; per questo caso è necessario fare delle considerazioni oltre che di costo della rete elettrica (in termini di potenza massima e di energia consumata), anche del costo del sistema di accumulo, ma anche di costi evitabili dell’adeguamento della rete elettrica (in termini aggiunta di generatori termoelettrici rotativi in grado di consentire potenze elevate non costanti) nel caso in cui non si intenda utilizzare accumuli sulla stazione.

Nel presente paragrafo, grazie al simulatore sviluppato e descritto nel precedente paragrafo, si riporteranno i risultati al variare della capacità del sistema di accumulo, da una capacità molto piccola fino al caso di minima potenza richiesta dalla rete, affermando che qualunque sia la reale installazione della stazione di ricarica, essa sarà compresa fra questi due estremi.

Le ipotesi che si fanno sono:

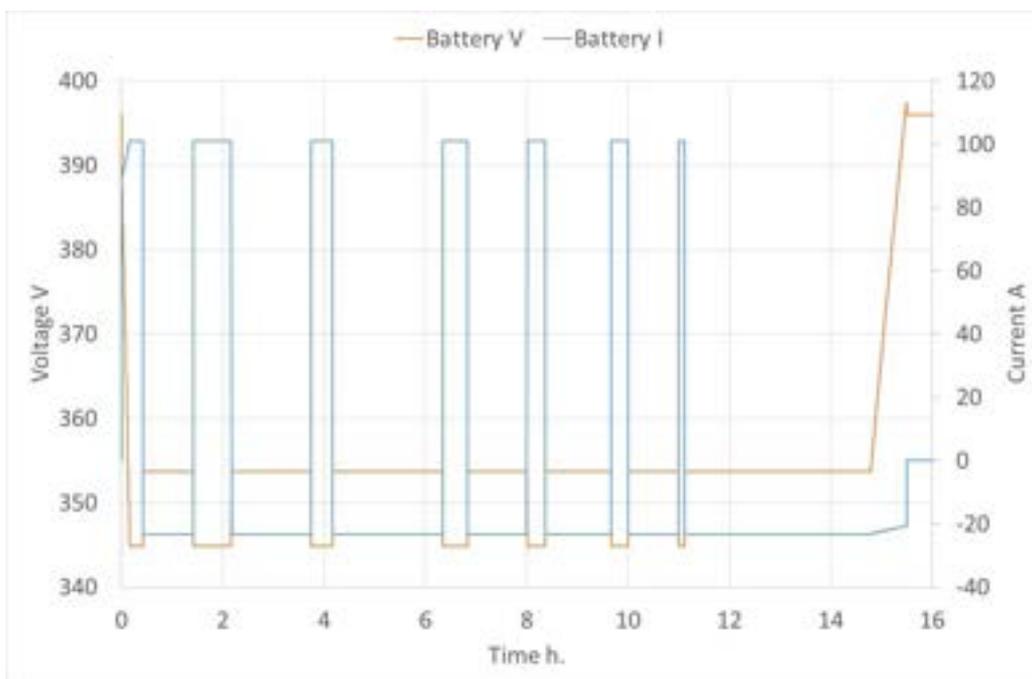
- Il sistema di accumulo, lungo tutta la giornata, viene scaricato fino al 75% della sua massima capacità. In questo modo si possono evitare imprevisti dovuti ad una imprevista maggiore richiesta di energia da parte dei veicoli, ma anche alla necessità di svolgere la funzione di ricarica nel caso di sistema di accumulo non più nuovo.
- La giornata di lavoro delle batterie viene fissata a 16 ore, al termine del quale le batterie devono essere completamente cariche per poter essere messe in funzione la giornata successiva;
- La stazione di ricarica è dotata di un convertitore ACDC per convertire l’energia della rete elettrica in continua; di un pacco batterie composto da celle di Litio-Ferro-Fosfato, dotato di un convertitore DCDC per essere collegato al link e di un convertitore DCDC per effettuare la ricarica. Quest’ultimo può essere direttamente l’inverter di trazione qualora il veicolo sia equipaggiato di un inverter bidirezionale.
- Il link della stazione è a 400 V
- Il sistema di accumulo avrà fissato la sua tensione massima (attorno ai 400V) e nelle simulazioni, per simulare diverse capacità delle batterie, verrà cambiata soltanto la capacità in Ah delle celle);

Per trovare il giusto valore di accumulo per ogni potenza erogata dalla rete, si è sviluppato un secondo codice di calcolo che fissa la potenza erogata dalla rete, sceglie iterativamente il valore della capacità batteria che si scarica fino al 75% e che soddisfi anche il requisito di potenza massima erogabile.



**Figura 30: andamento del SOC durante la giornata nel caso di un veicolo/ora , con 9 kW di potenza di rete e 155 Ah di accumulo**

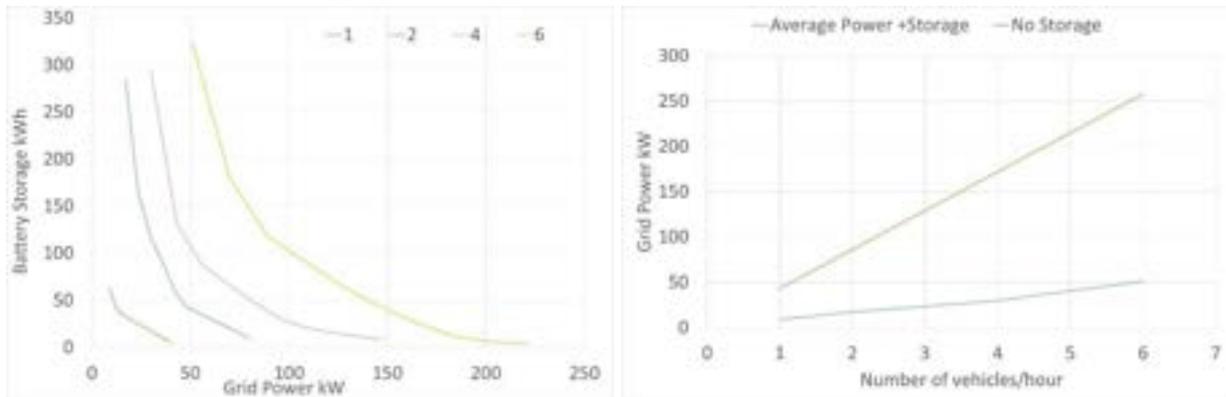
In Figura 30 si può notare l’andamento del SOC durante la giornata del capolinea della linea 12 nel caso di un veicolo/ora. Si notano gli abbassamenti dello stato di carica durante la carica del bus ed i successivi innalzamenti dovuti alla ricarica delle batterie dalla rete elettrica. Il caso riprodotto è quello a potenza minima e costante con un sistema di accumulo di 63.5 kWh. Il pacco batterie è sufficientemente grande da gestire tutti i transitori e di ricaricarsi con una potenza molto piccola e costante. Sempre nella stessa figura si vede l’andamento della potenza erogata dalla batteria e quella erogata dalla rete e si può osserva che la rete elettrica fornisce sempre 9 kW per quasi 16 ore e le batterie erogano circa 34 kW durante la ricarica del veicolo e si ricaricano a circa 8 kW quando il veicolo si è allontanato dalla stazione.



**Figura 31 andamento delle tensioni e correnti durante la giornata.**

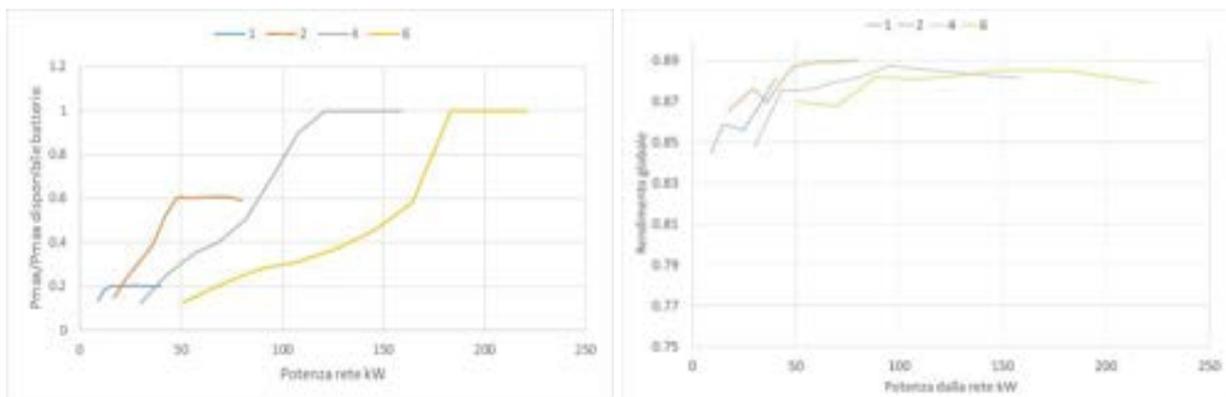
Per quanto riguarda le tensioni e correnti del pacco batteria (Figura 31), ad ogni ricarica del veicolo corrisponde un abbassamento della tensione ed un aumento della corrente, mentre quando la batteria della stazione è in ricarica la corrente diventa negativa e la tensione si innalza.

Le simulazioni che sono state effettuate, per il caso di 1,2,4 e 6 veicoli/ora, vengono anche effettuate al variare della potenza erogata dalla rete.



**Figura 32** andamento della capacità delle batterie al variare della potenza richiesta dalla rete per 1,2,4,6 veicoli/ora ( a sinistra) e nel caso di strategia a potenza media (a destra).

Partendo dal valore di potenza massimo in caso di assenza di accumulo fino ad un valore che corrisponde ad una erogazione costante di potenza da parte della rete elettrica (con un pacco batterie “massimo”, si può notare come la potenza richiesta dalla rete scenda sensibilmente. Per un servizio da un veicolo /ora si passa da 43.5 kW di potenza massima senza accumulo, fino a 9 kW nel caso di potenza media costante. Anche negli altri casi si notano considerevoli riduzioni di potenza richiesta alla rete e i valori massimi di riduzione si hanno nel caso in cui la rete eroga la potenza media costante dove si ha una riduzione di circa 80%.



**Figura 33** andamento della richiesta di potenza alle batterie in funzione della potenza chiesta alla rete.

Per quanto riguarda lo stress a cui le batterie vengono sottoposte, la Figura 33 riporta il rapporto fra la potenza massima erogata durante la giornata diviso per la massima potenza erogabile. Come si può notare, al diminuire del sistema di accumulo aumenta tale rapporto e oltre un certo valore di accumulo, non si sceglierà quello ottimo da punto di vista dell’energia, ma quello in grado di erogare tale potenza. Questo avviene nel caso con 4 e 6 veicoli/ora, mentre quando il sistema di ricarica lavora meno di frequente il pacco batterie risulta in proporzione più grande

Sempre nella stessa figura si notano anche i rendimenti per le diverse configurazioni: all’aumentare della potenza richiesta alla rete (e di conseguenza al diminuire dell’energia del sistema di accumulo) il rendimento tende a crescere, in quanto l’apporto delle batterie, che hanno un rendimento di scarica e di ricarica non unitario oltre i convertitori, hanno un apporto minore rispetto alla rete, il cui DCDC ha un

rendimento di circa 0.93. i rendimenti, nel caso di un veicolo/ora, variano dall'84% fino a circa l'88%, per gli altri casi la variazione è analoga.

### 6.1.3 Batterie Second Life

Il costo delle batterie di ultima generazione, sebbene molto performanti, rimane ancora molto elevato, soprattutto rispetto a quelle al piombo acido. Una interessante applicazione per questo tipo di utilizzo potrebbe essere quella di utilizzare batterie non nuove, utilizzate per applicazioni più stressanti come il settore automotive. Di norma le batterie utilizzate a bordo degli autoveicoli si ritengono esauste quando la capacità residua è minore o uguale all'80% di quella nominale. Questo tipo di batterie, invece di essere considerate esauste, potrebbero essere rigenerate ed utilizzate per applicazioni di tipo stazionario (dove l'ingombro ed il peso ricoprono una importanza minore rispetto agli autoveicoli).

Se si ipotizza il riuso delle batterie utilizzate nello stesso veicolo che si intende ricaricare, allora la capacità del sistema di accumulo sarà uguale a quella del veicolo che si intende ricaricare o uguale a 'n' volte con 'n' il numero dei veicoli/ora che si ricaricano al capolinea. Come questa ipotesi il costo del sistema di accumulo cala drasticamente. Le batterie, non più nuove, non potranno essere utilizzate per tutta la loro capacità, ma tenendo conto anche di un coefficiente di sicurezza, verranno utilizzate fino al 60% della loro capacità nominale.'

**Tabella 8 stazione di ricarica al capolinea con batterie di tipo "second life"**

Autobus/h	P da rete kW	Kwh rete	Capacità kWh batt	max DOD	eff %
1	13	139.1	40.96	63.2	85.3
2	21	256.665	81.92	60	87.5
4	38	464.4	163.84	61.7	87.9
6	57	806.45	245.76	61	86.9

In Tabella 8 sono riportati, nei casi con 1,2,4,6 veicoli/ora, le caratteristiche di un sistema così composto: la potenza richiesta alla rete, scende nel primo caso del 70% mentre negli altri casi si arriva fino all'80%.

Questa è certamente la situazione economicamente più vantaggiosa, in quanto si hanno riduzioni di potenza richiesta alla rete molto alte, quasi come quelle del caso "a potenza media", ma con il grande vantaggio che le batterie sono quelle dismesse dallo stesso autobus da ricaricare e quindi i costi di acquisto scendono considerevolmente.

## 6.2 Ricarica alla fermata

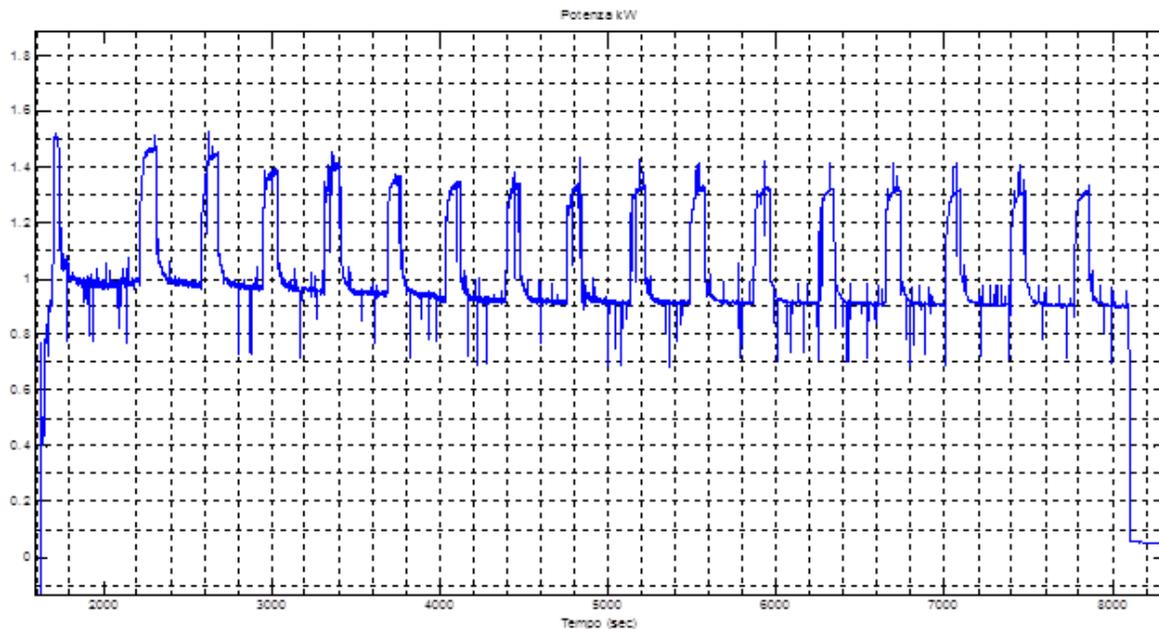
Un veicolo progettato per essere ricaricato alla fermata ha il grande vantaggio di poter avere a bordo una energia a bordo più bassa, a vantaggio dei pesi, dei costi e degli ingombri.

Una ricarica alla fermata però richiede potenze molto elevate, per poter ricaricare in brevissimo tempo l'energia necessaria a percorrere lo spazio necessario all'arrivo alla successiva fermata con stazione di ricarica installata. In questo caso l'adozione di supercondensatori si rende necessaria in quanto le batterie non sono in grado di erogare le potenze tipiche di questo tipo di ricariche.

Nel presente studio, la ricarica alla fermata viene effettuata sul Tecnobus Gulliver descritto nei capitoli precedenti, ma con un sistema di accumulo differente, in grado di poter accettare potenze di ricarica dell'ordine delle centinaia di kW.

Il sistema che viene simulato quindi avrà sia a terra che a bordo i supercondensatori, gli unici in grado di poter elaborare tali potenze. A bordo del mezzo, come nel sistema realizzato a Ginevra, ci saranno i

supercondensatori per fornire la potenza ed energia di trazione, mentre per gli ausiliari ci sarà una batteria a parte.



**Figura 34 Potenza assorbita dagli ausiliari per un Tecnobus Gulliver.**

Tali ausiliari, come riportato in Figura 34, hanno una potenza che va dai 900 W ai 1400 W, sensibilmente inferiore ai valori in letteratura, in quanto contano per l'9% (prendendo in considerazione la tratta di andata e ritorno, ossia la C1 e la C2 della 12A, ma si tratta di un minibus senza aria condizionata e con gli accessori ridotti al minimo.

La linea presa in esame è la linea 12 già simulata nel caso della ricarica al capolinea, nel tratto però in salita, ovvero quello con dicitura C1, quello più oneroso in termini di energia.

Il dimensionamento di massima del servizio si riporta nella tabella sottostante.

**Tabella 9 ipotesi di lavoro per la stazione di ricarica alla fermata**

Lunghezza linea km	11 km
Durata min	25
Numero fermate	30
Distanza media tra le fermate	0.33 km
Consumo kWh/km	0.8
Consumo ausiliari kWh	1.15
Consumo ausiliari kWh/km	0.043
Consumo trazione kWh/km	0.757
Numero stazioni di ricarica	10
Distanza fra le stazioni di ricarica	0.999
Energia dalla stazione kWh	0.756
Tempo di sosta alla fermata s.	15
Tempo di avvicinamento/allontanamento dispositivo di ricarica	2
Potenza massima di ricarica	300 kW
Energia da rifornire al capolinea per gli ausiliari	1.15 kWh

In tale tabella, oltre ad essere riportati i dati reali della linea, sono presenti anche delle ipotesi che qui si discutono:

- La distanza fra le fermate presa in considerazione è una fermata media, di circa 0.333 km, tale valore nella realtà tra una fermata e l'altra può essere anche diverso, ma con le potenze di ricarica in gioco la distanza può arrivare ad essere anche di un km e la stazione sarà comunque in grado di rifornire l'energia necessaria. Nelle simulazioni verrà esaminata una sola fermata in quanto tutte le altre saranno uguali.
- Fra i vari valori di potenza in ricarica, si è scelto il valore di 300 kW, valore realistico e anche disponibile dalla stazione della ABB. La scelta di tale potenza è funzione anche del dispositivo di connessione (non studiato in questa sede, ma da tener conto) e trattandosi di un pantografo, risulta un valore ragionevole.
- Un valore di potenza di ricarica di questo tipo, consente anche di poter installare una stazione di ricarica non in tutte le fermate, ma ogni 3.
- Con 300 kW il tempo di ricarica si aggira attorno ai 9 secondi, minori quindi di 11, ipotizzati come tempo massimo di ricarica, comprensivi del tempo di avvicinamento e di allontanamento del pantografo.
- La ricarica alla fermata fornirà soltanto l'energia dovuta alla trazione (0.757 kWh/km) e non quella relativa agli ausiliari, che saranno forniti da una batteria tampone che dovrà anche essere utilizzata dal veicolo come emergenza (in caso di guasto di una stazione o dei supercondensatori a bordo), ma anche come fonte di energia per il trasferimento del mezzo dal deposito al capolinea.
- La potenza degli ausiliari del bus, nel presente studio è dell'ordine di 1.15 kWh e, il capolinea, dove il bus raggiunge ogni ora, necessiterà di un caricabatterie che ricaricherà l'accumulo a bordo sia di tale energia consumata, sia dell'energia utilizzata per trasferire il bus dal deposito alla stazione. Si tratta comunque di poca energia e, stando per molto tempo al capolinea durante la giornata, di una potenza e di una energia di ricarica basse che in questa sede non verranno analizzate. Tra le tratte che va dal deposito al capolinea la più onerosa in termini di energia è la A1, che è lunga 12.13 km, con un consumo energetico medio di 0.6 kWh ovvero di 7.27 kWh; il sistema di batterie a bordo del mezzo dovrà avere quindi almeno quella capacità.
- A bordo del mezzo ci sarà un accumulo, per la trazione, con una capacità maggiore di 0.757 kWh che ad esempio, potrebbero essere i Maxwell da 63 Farad (BMOD0063 P125 B08) 3 in serie e 3 in parallelo.
- La stazione di ricarica ricaricherà i bus che percorreranno quella linea, che nel caso della linea analizzata in [3], è di un veicolo/ora, ma nel caso invece di più veicoli, (2,4 oppure 6), bisognerà accertarsi che la ricarica dei supercondensatori della stazione sia completata. Nel caso di 6 veicoli/ora l'intervallo teorico fra un autobus e il successivo è di 15 minuti, ma non si può predire se a causa del traffico o di altri imprevisti l'intervallo possa essere maggiore o minore. Per evitare il caso in cui un autobus si presenti alla fermata il momento in cui i supercondensatori della stazione non siano sufficientemente carichi, si userà un valore di potenza dalla rete in grado di poterli ricaricare in un tempo molto piccolo. Un tempo inferiore ai 3 minuti si ritiene ragionevole.

Scendendo in dettaglio nella stazione di ricarica, questa sarà composta da:

- Una alimentazione da rete elettrica, in bassa tensione, con una potenza che può essere da 21 o 43 kW (32 o 64 A). Si sono prese in considerazione queste 2 potenze in quanto comuni e con prese standardizzate.
- Un convertitore AC/DC per connettere la rete al sistema di ricarica (circa 400 Volt). La curva di efficienza di tale convertitore utilizzata è quella misurata in [7] e si ritiene sufficientemente ragionevole anche per il presente studio. Tale curva è funzione della potenza erogata e, essendo in queste simulazioni sempre costante, il valore di efficienza sarà quello massimo associato (il convertitore è insomma progettato per quel punto di funzionamento e per avere il suo massimo rendimento, circa 0.93).
- Un banco di supercondensatori (con o senza DCDC), formato da moduli come in Tabella 10 in serie e/o in parallelo, in grado di fornire, insieme alla rete elettrica e alle batterie, la gran parte dell'energia da inviare al bus. Il range di tensione ammesso nel presente studio va dalla tensione

nominale fino alla sua metà, questo perché per tensioni inferiori il convertitore collegato, le correnti diventano molto alte e ha rendimenti troppo bassi. La curva di efficienza del convertitore DCDC è quella riportata in Tabella 10 [12].

**Tabella 10 specifiche dei supercondensatori utilizzati.**

Capacità F	63
Capacità kWh	0.13
Corrente Massima A	1900
Resistenza interna $\Omega$	0.018
Tensione massima V	125
Tensione minima V	62.5
Temperatura iniziale °K	293.15
Resistenza termica C/W	0.04
Capacità termica J/C	33000

- Un pacco batterie e DCDC, litio ferro-fosfato, da 128 celle in serie (409.36 V nominali) di capacità da definire durante le simulazioni che ne richiedono l'utilizzo.
- Un inverter DCDC per la ricarica, che può essere a terra nella stazione oppure a bordo nel caso di inverter bidirezionale di trazione nel bus.

Le configurazioni testate per la stazione di ricarica sono:

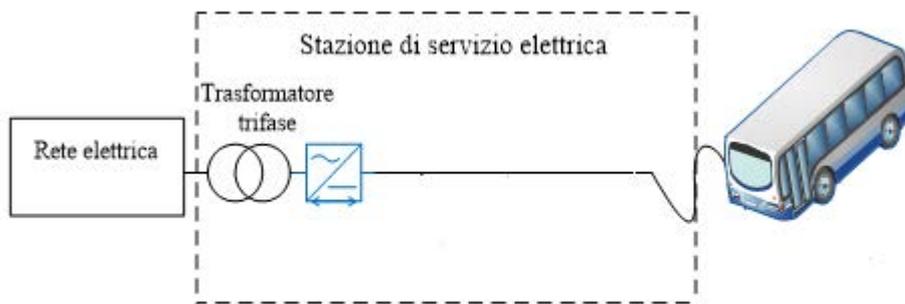
- A. Alimentazione da rete, senza alcun accumulo, da prendere come riferimento con ACDC che gestisce la ricarica sul bus. Non è possibile utilizzare l'inverter di trazione in quanto la potenza dell'azionamento è di un ordine di grandezza più basso. In alternativa, si potrebbe dimensionare l'inverter di bordo in modo da accettare queste potenze, con un aggravio di costo: ipotizzando 4 veicoli ogni ora (e quindi 4 bus in servizio) il costo della maggiorazione dell'inverter di bordo è sicuramente minore di installare 10 stazioni di ricarica con 10 ACDC.
- B. Alimentazione da rete con ACDC e banco di supercondensatori collegati direttamente al link, la ricarica sul veicolo viene gestita da un DCDC.
- C. Supercondensatori collegati al link senza DCDC, alimentazione da rete con ACDC con una tensione di link variabile uguale alla tensione dei supercondensatori e pacco batterie collegato con un DCDC al link, la ricarica sul veicolo viene gestita da un DCDC.
- D. alimentazione da rete con ACDC con una tensione di link di 400V, Supercondensatori collegati al link con DCDC e pacco batterie collegato con un DCDC al link, la ricarica sul veicolo viene gestita da un DCDC
- E. Supercondensatori collegati al link senza DCDC, alimentazione da rete con ACDC con una tensione di link variabile uguale alla tensione dei supercondensatori, la ricarica sul veicolo avviene per travaso fra i supercondensatori a terra e quelli a bordo del veicolo. Fra i due pacchi di supercondensatori, per limitare la massime correnti va comunque interposta una induttanza un altro dispositivo; nel presente studio verrà simulata una induttanza il cui valore verrà calcolato nelle simulazioni.

**Tabella 11 riepilogo delle prestazioni del sistema di ricarica alla fermata**

	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D	Caso E
Potenza rete massima kW	375	21	10	10	21
Tempo s	15	220	133/492	126/439	261
Moduli serie/parallelo	0/0	3/3	3/3	3/3	A terra: (8/2); a bordo: (8/2)
UC kWh ( $V_{min}=V_{Max}/2$ )	0	0.92	0.92	0.92	A terra: 1.64 A bordo: 1.43
Induttanza in serie H	0	0	0	0	0.1
UC Max SOD	0	0.906	0.839	0.84	0.6
PUC max kW	0	315.7	310	308	1350
PUC max ratio	0	0.342	0.297	0.298	0.43
Batt kWh	0	0	4.096	4.096	0
batt Max DOD	0	0	0.19	0.181	0
Pbatt max kW	0	0	22.7	22.4	0
Energia rete kWh	0.962	1.302	1.361	1.156	1.455
PtoVehicle kWh	0.77	0.77	0.77	0.77	0.79
Global Efficiency %	0.8	0.59	0.566	0.666	0.56
DeltaT Max	0 °C	5.5 °C	5.5 °C	5.5	19 °C

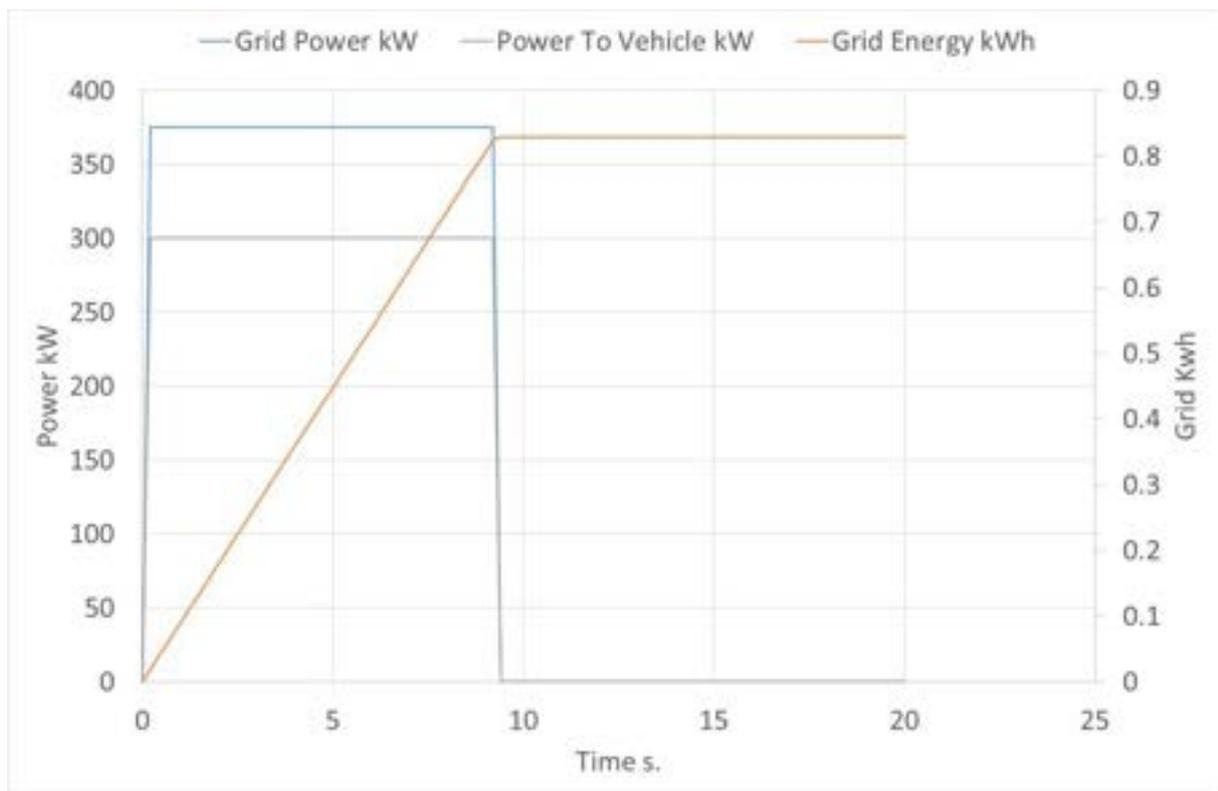
6.2.1 Caso A

Il primo caso è il caso di riferimento: la stazione è composta soltanto da un convertitore ACDC che converte la corrente alternata della rete in continua (Figura 35).



**Figura 35 Caso "A"**

È la soluzione che ha il grande problema di chiedere dalla rete tutta la potenza necessaria per la ricarica, ossia 300 moltiplicato per l'efficienza del convertitore che, per un range di tensione che può essere di più di 150 V può essere attorno a 0.8. La potenza richiesta dalla rete è di 375 kW con una energia di 0.962 kWh (Tabella 11 e Figura 36) e la stazione è immediatamente pronta per ricaricare il successivo veicolo, qualora ce ne fosse uno appollonato.



**Figura 36** andamento della potenza e dell'energia per il caso A

È la configurazione peggiore per il gestore di energia elettrica in quanto per ogni veicolo in fermata deve poter erogare tutta la potenza; nel caso di una linea con 4 bus/ora il gestore dovrebbe garantire fino a  $375 \times 4$  kW ossia 1.5 MW. Per questo problema, il caso A viene solo riportato come riferimento, avendo scarsa applicabilità.

### 6.2.2 Caso B

Il secondo caso analizzato consiste in un parallelo fra rete elettrica a supercondensatori con quest'ultimi collegati senza convertitore DCDC. La ricarica viene gestita da un altro convertitore DCDC che si collegherà direttamente con il bus.

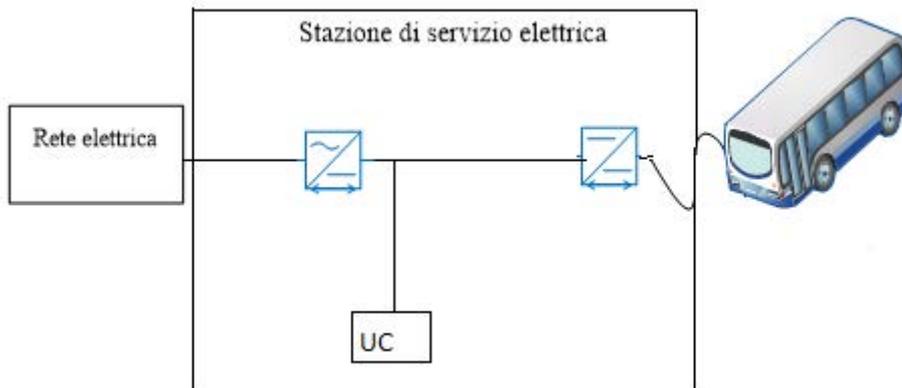


Figura 37 Caso “B”

La tensione di link, essendo la tensione dei supercondensatori, sarà variabile fra un massimo di 375V (3 moduli in serie da 125 e 187.5, (Tabella 11) la tensione minima che si è ammessa. Il rendimento dei convertitori quindi ne risentirà in quanto per differenze elevate tra tensioni di ingresso e di uscita scende. La potenza richiesta dalla rete però passa da 375 kW a 21 kW, valore decisamente più basso e più sostenibile per il gestore della rete elettrica, ma la ricarica per un bus successivo potrà essere effettuata dopo 3 minuti e 40 secondi dall’inizio della carica del precedente. Tale intervallo è comunque molto contenuto, se si pensa che per una linea con 4 veicoli/ora l’intervallo teorica tra un bus e il successivo è di 15 minuti. Qualora per motivi dovuti al traffico o ad altre problematiche l’intervallo fra 2 bus fosse più piccolo, la stazione riuscirà a soddisfare la gran parte delle possibili casistiche. Il 90.6 % dell’energia dei supercondensatori verrà trasferita durante la fermata, con potenze che arrivano fino a 316.4 kW, comunque al di sotto della massima potenza erogabile dagli stessi. Il rendimento della ricarica però, rispetto al caso con sola corrente elettrica, scende fino a 0.59, a causa di un numero maggiore di convertitori e di un rendimento di scarica dei supercondensatori non unitario.

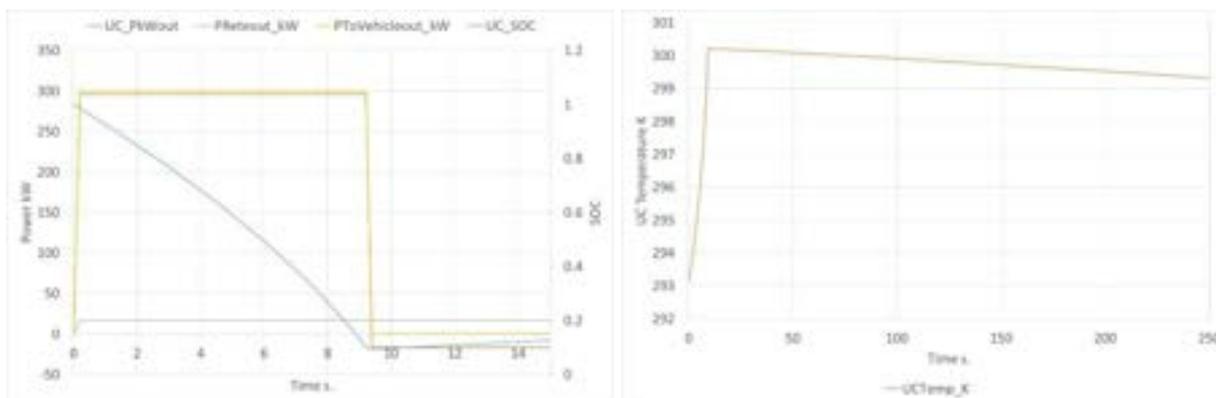


Figura 38 andamento della potenza erogata dai Supercondensatori e dalla rete elettrica con il SOC (a sinistra) e della temperatura dei Supercondensatori (a destra) per il caso B

In Figura 38 si riportano gli andamenti delle potenze erogate dalla rete e dai supercondensatori e del loro stato di carica, mentre a destra l’andamento della temperatura dei supercondensatori, che come si vede non raggiunge valori elevati e che comunque hanno un tempo molto lungo per potersi raffreddare tra una carica e l’altra.

In Figura 39 si può notare l’andamento della tensione e della corrente ai morsetti del banco di supercondensatori: per una scarica a potenza costante si nota come la tensione scenda al variare del SOC e la corrente di conseguenza sale in maniera inversamente proporzionale alla tensione. Si possono notare

picchi di corrente di quasi 1800 A negli ultimi momenti della scarica, mentre segue una fase di ricarica con una potenza più bassa e pari alla potenza della rete (depurata del rendimento dell'ACDC).  
In conclusione il caso B, ha il grande vantaggio di abbassare la potenza massima richiesta dalla rete da 375 a 21 kW, di una comune utenza industriale

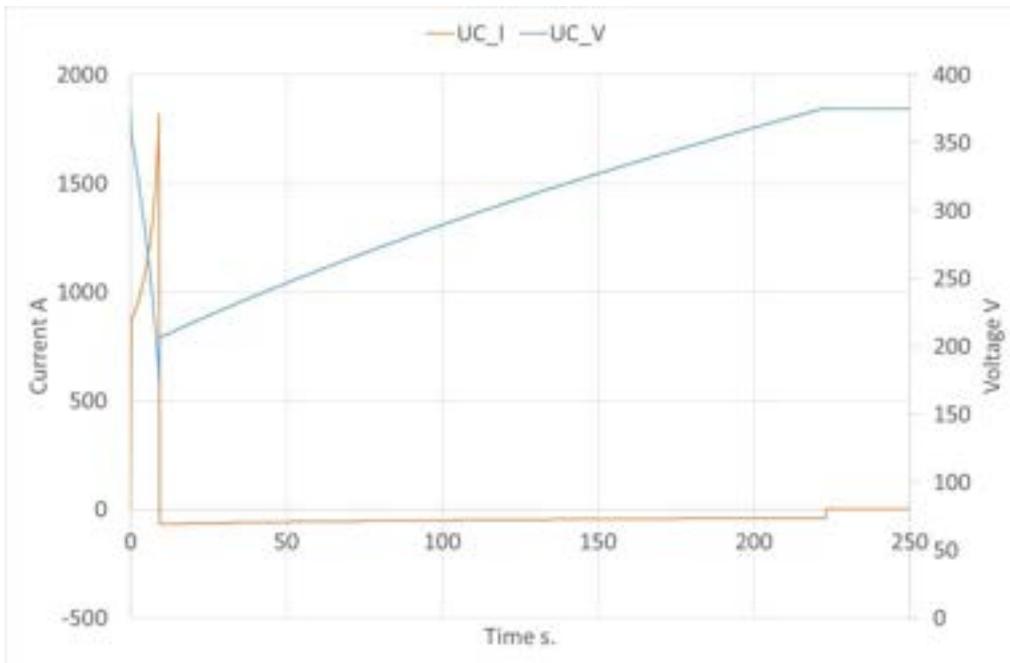


Figura 39 andamento della tensione e della corrente dei supercondensatori per il caso B.

### 6.2.3 Caso C

Il terzo caso (Figura 40) è relativo a una configurazione uguale al caso B ma con l'aggiunta di un pacco batterie tampone. Il pacco batterie scelto è da 4 kWh, con una capacità di scarica uguale a 5 volte la nominale (5C).

Il vantaggio dell'aggiunta di tale pacco batterie è che durante la fase di scarica concorre a fornire potenza al veicolo, mentre negli istanti successivi aiuta la rete elettrica a ricaricare i supercondensatori. Infine la rete ricarica le batterie.

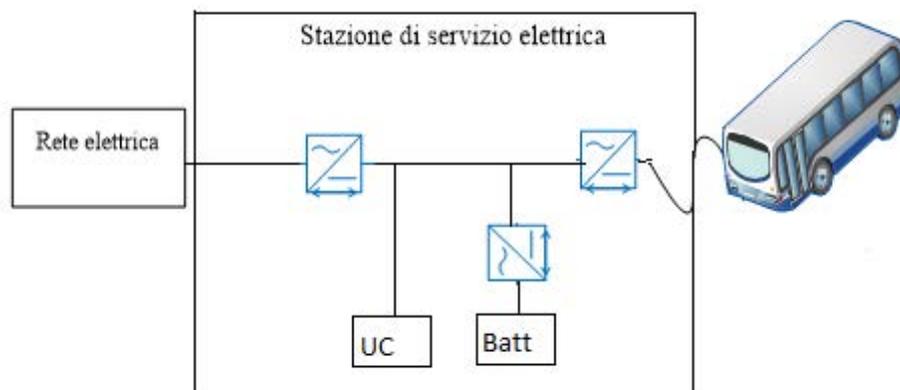
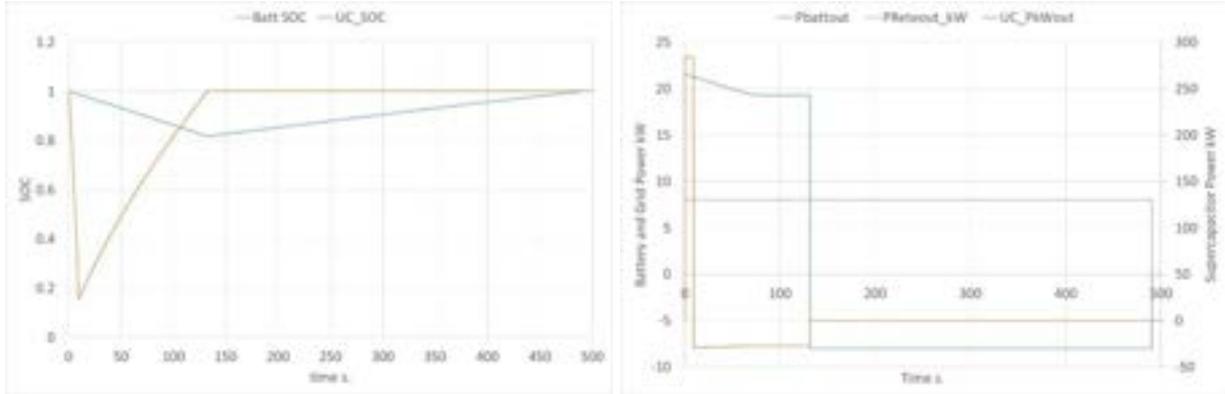


Figura 40 Caso "C"

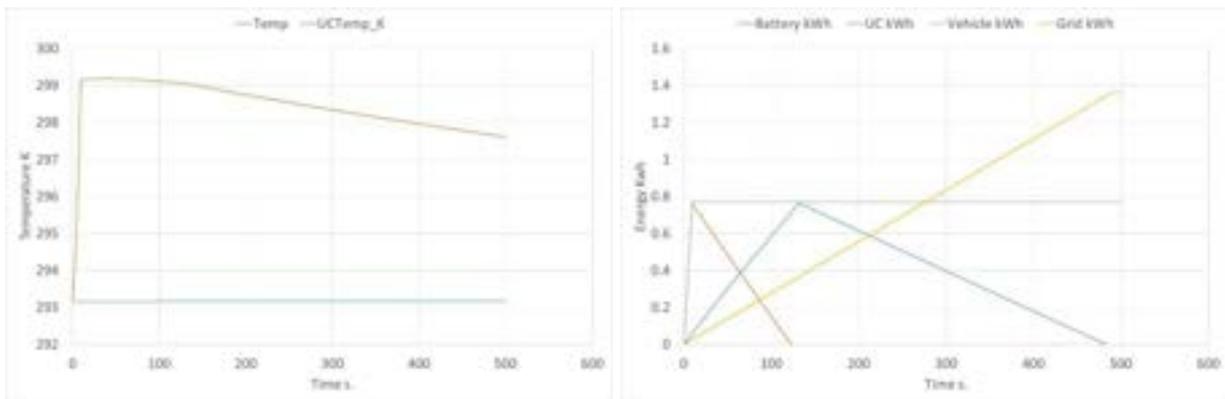
Questo comporta che i supercondensatori si scaricheranno di meno in quanto un'altra sorgente di potenza li aiuterà nel ricaricare il bus, ma si ricaricheranno più velocemente per lo stesso motivo.

Nel caso in esame, grazie al pacco batterie la potenza richiesta dalla rete può scendere fino a 10 kW, aiutati da circa 22 kW dalla batterie. Il tempo di ricarica dei supercondensatori scende fino a 2 minuti e 13 secondi, quindi da questo istante in poi è possibile effettuare la successiva ricarica, qualora ce ne fosse bisogno.



**Figura 41** andamento del SOC della batteria e dei supercondensatori (a sinistra) e della corrente e dello stato di carica (SOC) dei Supercondensatori (a destra) per il caso C

Il tempo necessario alla ricarica delle batterie è di 492 secondi, ma la batteria ha una sovrabbondanza di energia in quanto ad ogni ricarica del bus il suo SOC scende solo del 18% (Figura 41). Il rendimento è 0.566, a causa di un numero maggiore di convertitori e del rendimento di scarica della batteria che nel caso B non era presente.

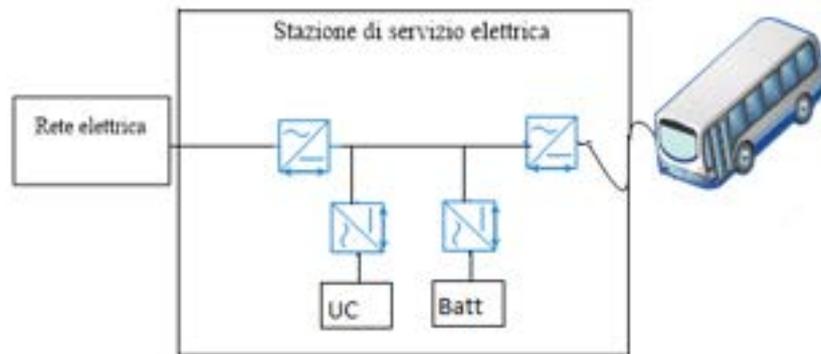


**Figura 42** andamento della temperatura dei supercondensatori e batteria (a sinistra) e delle energie della rete, batterie, supercondensatori e veicolo durante una ricarica

In Figura 42 si riporta l'andamento temporale delle temperature della batteria e dei supercondensatori, le quali variano di circa 6 gradi per quest'ultimi e molto poco per le prime, e delle energie fornite dalla rete, batterie e supercondensatori verso il bus.

#### 6.2.4 Caso D

Il caso D (Figura 43) si differenzia dal caso C per il fatto che tutte le sorgenti di energia sono dotate del proprio convertitore e il link è impostato a 400V. in pratica c'è un convertitore DCDC per i supercondensatori in più rispetto a prima. Il vantaggio sta nel fatto che tutti i convertitori (a parte i supercondensatori) lavorano a tensione di uscita costante con un aumento dei rendimenti. Questa soluzione può definirsi la più completa e con rendimenti più alti, ma con costi maggiori dovuti proprio al DCDC dei supercondensatori, il quale essendo progettato per una potenza di circa 300 kW sarà molto costoso.



**Figura 43 Caso "D"**

I risultati che si ottengono comunque sono: un tempo marginalmente minore per la ricarica dei supercondensatori e delle batterie (126 s e 439 s) e un rendimento più elevato, circa 0.666. Per i restanti parametri i valori sono molto simili al caso C per cui se ne omettono i grafici.

#### 6.2.5 Caso E

L'ultimo caso esaminato (Figura 44), il più audace, consiste nel collegamento diretto tra i supercondensatori della stazione con i supercondensatori a bordo del mezzo. La rete elettrica tramite un ACDC interviene solo successivamente a ricaricare i supercondensatori.



**Figura 44 Caso "E"**

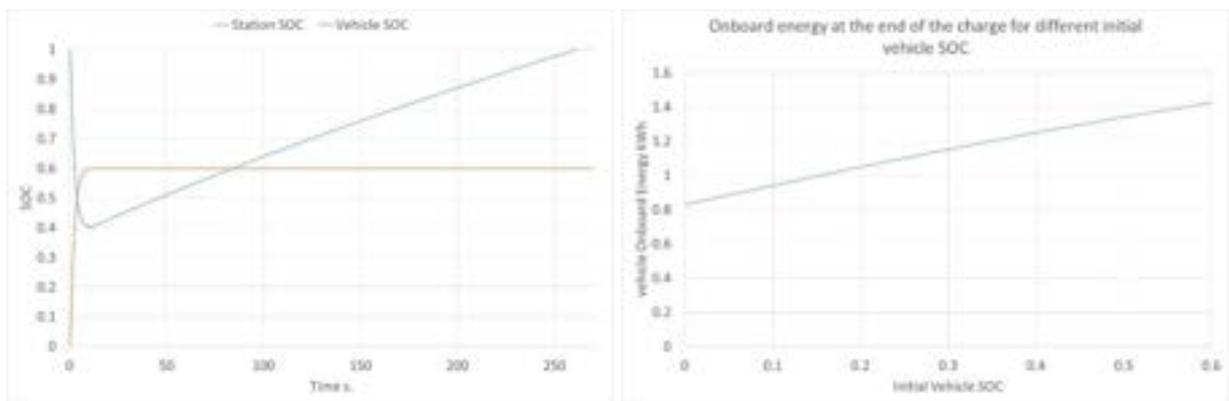
Questa configurazione di stazione, non avendo bisogno di convertitori sui supercondensatori e per la ricarica, è la più economica da realizzare, ma consente una scarica diretta con potenze e correnti elevatissime.

Per poter studiare questo tipo di ricarica bisogna conoscere anche la tipologia di supercondensatori presente a bordo del mezzo e, a causa delle elevatissime correnti e potenze, ci sarà un sistema di accumulo differente rispetto ai casi precedenti. In particolare il sistema di terra sarà composto da 8 moduli in serie e 2 in parallelo, mentre a bordo ce ne sono 7 in serie e 2 in parallelo. Le tensioni sia a bordo che a terra saranno rispettivamente a 875 V e a 1000 V.

La ricarica del bus avviene semplicemente per travaso di carica dalla stazione con interposto un dispositivo che ne limita la corrente massima (in questo caso una induttanza) verso veicolo e nel caso di SOC del veicolo=0, il SOC si stabilizzerà a circa 0.67 (Figura 45).

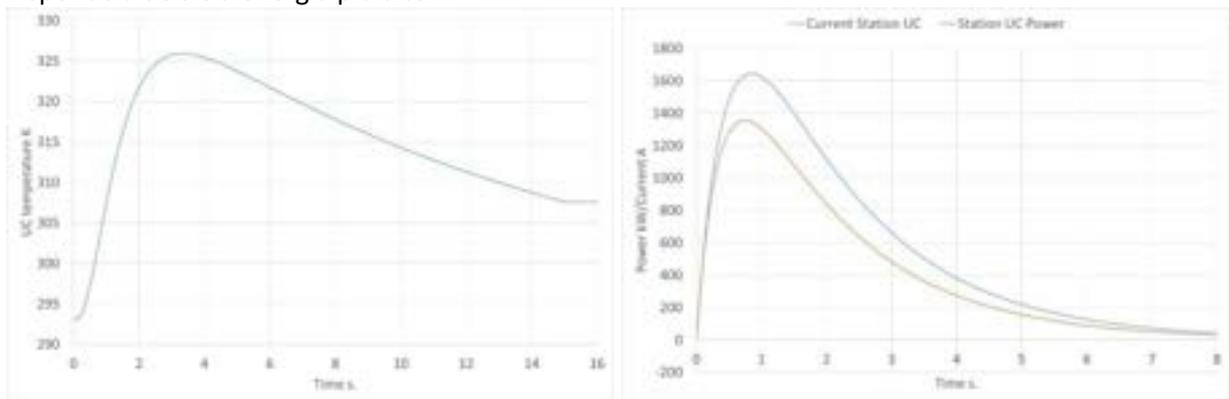
Il caso peggiore è che il bus si presenti alla stazione con supercondensatori completamente scarichi (SOC=0) ed è questa la condizione più onerosa in termini di correnti che è stata simulata.

Al termine della ricarica del veicolo, i supercondensatori vengono ricaricati dalla rete elettrica con un convertitore ACDC a 21 kW. I supercondensatori sono completamente carichi dopo 260 secondi.



**Figura 45** andamento del SOC dei supercondensatori a bordo veicolo e nella stazione (a sinistra) e Energia a bordo al termine della ricarica per differenze SOC di inizio carica (a destra)

Nell’ipotesi in cui il bus si presentasse alla fermata con uno stato di carica >0 la stazione non sarà in grado di immettere tutta l’energia necessaria a proseguire per la tratta successiva, ma il bus, ne avrà comunque per arrivarci. In Figura 45 si nota l’andamento dell’energia a bordo al termine della ricarica con diversi SOC iniziali: con uno stato di carica nullo, il bus ripartirà con l’energia minima in grado di percorrere la distanza necessaria per giungere alla stazione successiva, all’aumentare del SOC iniziale, l’energia immessa dalla stazione sarà via via minore, ma l’energia a bordo al termine della ricarica sarà sempre maggiore in quanto i due bank di condensatori si stabilizzeranno su una tensione di equilibrio via via più alta, la quale corrisponde a SOC e a energia più alte.



**Figura 46** andamento della temperatura del banco di supercondensatori per il caso E

Per quanto riguarda la temperatura di esercizio, i supercondensatori hanno un picco di temperatura durante le prime fasi che li porta fino a 53 gradi per poi scendere fino a 34 gradi: il massimo ammesso dal datasheet della maxwell è di 65 gradi, quindi al di sotto del limite, anche se tale picco andrebbe messo sotto osservazione nel caso di più ricariche ripetute e temperature estive. Per quanto riguarda le potenze, (Figura 46), grazie all’aggiunta di una induttanza che limita i picchi di corrente iniziali e il picco è di quasi 1400 kW poco prima di 1 secondo, mentre le correnti sono di poco superiori a 1600 A.

Tali valori di potenza e corrente sono tipiche di applicazioni ferroviarie, sicuramente più complesse rispetto a quelle a in bassa tensione come quella della ABB, ma non impossibili. Il pantografo realizzato dalla Schunk [9] ha una corrente massima ammissibile di 1000 A per 60 secondi e di 500 erogabile per un tempo infinito, partendo dall’ipotesi che sia la temperatura il limite per questo tipo di correnti, allora tale temperatura sarà funzione quadratica della corrente. In questo caso correnti sopra i 1000 A vengono erogate per meno di un secondo e ipotizzando che la temperatura cresca con il quadrato della corrente, le perdite associate al caso di scarica sono il 5% di quelle dichiarate ammissibili dalla Schunk.

A valle di tutte le configurazioni testate si riepilogare le seguenti caratteristiche tecniche di ognuna:

- A. Il caso A, di riferimento, con ricarica da rete da 375 kW con un solo convertitore ACDC da 300 kW richiede potenze dalla rete troppo elevate per poter essere utilizzato a maggior ragione in zone a bassa disponibilità di potenza; il rendimento globale di ricarica è comunque il più alto di tutti (0.8); non esistono limiti sul numero di mezzi da ricaricare in quanto non c'è bisogno di ricaricare nessun accumulo (15 secondi).
- B. Il caso B, con ricarica da rete da 21 kW e banco di supercondensatori da 0.92 kWh, con un convertitore ACDC da 21 kW (per la rete) e un convertitore DCDC da 300 kW (per la ricarica) ha il vantaggio, rispetto al caso A di richiedere molta meno potenza a scapito però del rendimento (0.59) e di un tempo di ricarica della stazione di 220 secondi.
- C. Il caso C con ricarica da rete da 10 kW, e banco di supercondensatori da 0.92 kWh e pacco batterie da 4 kWh, un convertitore ACDC da 10 kW (per la rete), un convertitore DCDC da 21 kW (per le batterie) ed un convertitore DCDC da 300 kW (per la ricarica) ha il vantaggio rispetto al caso B di richiedere ancora meno potenza dalla rete e di avere un tempo di ricarica ancora più basso (133 secondi). L'aggiunta delle batterie e del suo inverter ne fanno abbassare ancora il rendimento (0.566)
- D. Il caso D differisce dal caso C solo per il fatto che anche i supercondensatori hanno un DCDC (da 300 kW), mantenendo fissa la tensione di link a vantaggio dei rendimenti di tutti i convertitori. Il rendimento globale è di 0.666. Lo svantaggio è che c'è un convertitore in più che ha un costo non trascurabile.
- E. Il caso E, è composto da supercondensatori disposti in serie da 1.025 kWh, da una alimentazione da rete da 21 kW e da un convertitore ACDC da 21 kW. Ha il vantaggio di non avere convertitori ad alta potenza e quindi è certamente la soluzione più economica, ma ha delle criticità dovute alle alte correnti di scarica, alle temperature dei condensatori che salgono e a problemi di inquinamento elettromagnetico che non è stato analizzato in questa sede. C'è bisogno quindi di una accurata indagine di mercato su prodotti (connessioni elettriche di potenza, induttanze, isolamenti ecc.) non propriamente di tipo automotive per verificare la fattibilità di una soluzione di questo tipo.

## 7 Aspetti economici delle soluzioni progettuali

Il ricorso alla sola rete elettrica, quale unica fonte per il rifornimento dell'energia necessaria allo svolgimento del servizio di trasporto pubblico in generale e nel caso di specie in particolare, rischia di essere molto dispendioso dal punto di vista finanziario. *In questo capitolo viene verificata, quindi, la convenienza economica di soluzioni alternative rispetto al ricorso alla sola rete*, che prevedono la realizzazione di sistemi di accumulo stazionari (caso B), anche ibridi (caso C) al fine di ridurre l'impegno della potenza sulla rete, oltre a proporre soluzioni progettuali ottimizzate anche dal punto di vista della componentistica rilevante sull'incidenza dei costi (caso E). Il confronto economico viene realizzato considerando un periodo di analisi di 10 anni, rispetto al quale, applicando un tasso di sconto annuo del 5%, viene calcolato il valore attuale netto (VAN) per ciascuno dei quattro casi considerati in questo capitolo, che sono, appunto, il caso A, B, C ed E. La scelta del tasso è determinata dalla natura pubblica del servizio svolto dalle aziende di trasporto che ricevendo contributi pubblici a fondo perduto, di fatto, riducono il rischio imprenditoriale.

L'impegno di una elevata potenza sulla rete riguarda, in particolare, la ricarica ultrarapida che viene associata alle fermate, pertanto l'analisi economica verterà su queste ultime.

I casi valutati sono quelli richiamati nei paragrafi precedenti e brevemente ricapitolati nella Tabella 12 di seguito: Caso A, stazione di ricarica ultrarapida senza alcun supporto stazionario, impegno di potenza sulla rete pari a 375 kW, Caso B, stazione di ricarica ultrarapida, impegno di potenza sulla rete pari a 21 kW, accumulo stazionario con ultracapacitori e convertitore DC/DC da 300 kW; Caso C, stazione di ricarica ultrarapida, impegno di potenza sulla rete pari a 10 kW, accumulo stazionario costituito da ultracapacitori e convertitore DC/DC da 300 kW, pacco batterie *second life* con convertitore DC/DC da 21 kW per la batteria, Caso E, stazione di ricarica ultrarapida, impegno di potenza sulla rete pari a da 21 kW con convertitore AC/DC e accumulo stazionario con ultracapacitori senza convertitore DC/DC.

**Tabella 12: Aspetti tecnici e di servizio dei casi di studio**

		Caso A	Caso B	Caso C	Caso E
<b>Rete AC/DC</b>	<i>kW</i>	375	21	10	21
<b>SuperCapacitori (SC)</b>	<i>kWh</i>	0	0,92	0,92	1,02
<b>Conv.DC/DC kW per ricarica</b>	<i>kW</i>	0	300	300	0
<b>Potenza media</b>	<i>kW</i>	0	315	310	331
<b>BATTERIE</b>	<i>kWh</i>	0	0	4	0
<b>Potenza batteria</b>	<i>kW</i>	0	0	22.7	0
<b>Conv AC/DC per batterie</b>	<i>kW</i>	0	0	21	0
<b>n. ricariche</b>	<i>n./giorno</i>	8	8	8	8
<b>Consumo rete</b>	<i>kWh/giorno/bus</i>	7,7	10,4	10,9	1,64
<b>Punti Prelievo</b>	<i>n.</i>	10	10	10	10
<b>n. stazioni</b>	<i>n.</i>	10	10	10	10
<b>n. bus</b>	<i>n.</i>	4	4	4	4

Fonte: Elaborazione ENEA

I costi esaminati riguardano gli investimenti per gli acquisti della stazione di ricarica e dell'accumulo stazionario, ove presente, i costi necessari per le connessioni permanenti in Bassa Tensione (BT) o Media Tensione (MT), i costi operativi connessi alla bolletta energetica e alla manutenzione per ciascuna infrastruttura prevista nei diversi scenari. Si assume che su tutta la linea non si verifichi, in nessun caso, la contemporaneità dei biberonaggi.

## 7.1 Gli investimenti infrastrutturali

L'investimento nella stazione di ricarica è costituito dai costi di impianto e di installazione (comprensivi dei costi dell'elettronica di controllo e connessione), assunti in parte variabili in funzione della potenza, applicando un costo specifico in termini di €/kW e in parte fissi, in funzione della tipologia di ricarica, che in questo frangente è sempre lo stesso, ossia la ricarica ultraveloce. Si assume che i punti di prelievo siano tanti quante sono le infrastrutture di ricarica e che solo nel caso A vengano realizzate connessioni alla rete in media tensione MT, mentre negli altri casi, le connessioni avvengono in bassa tensione BT. Al costo per la stazione di ricarica occorre aggiungere, quindi, dei costi per la realizzazione delle opere necessarie alla connessione, i quali saranno molto più elevati nel caso della MT, che non nell'altro. Per il calcolo dei costi di connessione si è fatto riferimento al documento in materia, deliberato dall'Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas<sup>6</sup> e si è assunta una distanza media dalla cabina di riferimento pari a 1.000 metri nel caso di allacci in MT e di 500 metri nel caso di allacci in BT. Tuttavia, tali distanze non sono state verificate in loco, ma sono state assunte ipotizzabili come tali in base alla tipologia del percorso, che è esercito in ambito suburbano. Nel caso E occorrerà aggiungere, inoltre, il costo per le bobine di induttanza.

Gli investimenti per gli accumuli stazionari interessano i casi B, C ed E. Acquisti di elementi in comune nei vari casi, riguardano i supercapacitori con connesso caricabatteria, il sistema di controllo e di connessione e l'installazione; i convertitori per i supercapacitori sono previsti solo nei casi B e C, in quest'ultimo inoltre, si prevede anche un secondo accumulo stazionario, costituito da batterie *second life*, con relativa componentistica. Queste ultime sarebbero ipoteticamente dismesse dagli autobus elettrici già in esercizio e per questo, il costo del pacco batterie rigenerato si concretizzerebbe solo nel costo del lavoro necessario alla rigenerazione, appunto. Per l'utilizzo di batterie *second life* in accumuli stazionari, uno studio europeo molto recente<sup>7</sup> attribuisce un valore alle celle dismesse pari alla metà del costo di quelle nuove, ossia circa 150 €/kWh, mentre il costo della rigenerazione oscillerebbe tra i 25-50 €/kWh, in funzione del tipo e dello stato fisico-tecnico in cui versa la batteria. In una visione conservativa, si è scelto di adottare il valore maggiore. Per gli supercapacitori il costo attuale, fornito da operatori di mercato, si aggira intorno ai 10 €/Wh, costo che, con l'assemblaggio in accumulo, salirebbe a 15 €/Wh. I costi di installazione, di controllo e di connessione sono stati assunti simili a quelli sostenuti per una stazione di ricarica<sup>8</sup> mentre quelli relativi al caricabatteria ed ai convertitori sono desunti da pregresse esperienze Enea. I costi specifici delle voci appena richiamate sono riportate nella Tabella 13.

**Gli investimenti necessari per la stazione di ricarica e per gli accumuli stazionari, nei vari scenari, sono riportati nella Tabella 14 e Tabella 15 e schematizzati in termini percentuali in**

Figura 47.

Lo scenario A, con collegamento esclusivo alla rete, comporta il sostenimento del costo maggiore per le infrastrutture di ricarica, rispetto agli altri casi e pari a 1,75 milioni di euro. Infatti, questo caso risente sia del fattore variabile del costo rispetto alla potenza della stazione sia in modo più incisivo, dei costi delle opere necessarie alla realizzazione della connessione in MT. Segue il caso E, anch'esso influenzato dalla maggiore potenza della stazione di ricarica e dal costo per le bobine d'induttanza. I costi sono piuttosto allineati nei due casi B e C, in particolare quest'ultimo si giova di minori oneri dovuti sia alla minore potenza della stazione sia della minore potenza richiesta alla rete.

Considerando solo il costo fisso e il costo variabile a potenza per una singola stazione di ricarica, emerge che gli investimenti sarebbero piuttosto in linea tra loro, oscillando tra 108 e 101 mila euro a stazione. Al contrario, il costo infrastrutturale complessivo per ogni stazione, sarebbe pari a 175 mila euro nel caso A, 112 mila euro nel caso E, 104 e 103 mila euro nei casi, rispettivamente, B e C.

<sup>6</sup> Condizioni economiche per l'erogazione del servizio di connessione n. 348\_07 All. B, AEEG

<sup>7</sup> Second life-batteries as flexible storage for renewable energies, Bundesverband Erneuerbare energie e.V., Hannover, 2016.

<sup>8</sup> K-bus, simulazione di performance tecnico gestionale di sistema di biberonaggio energetico a ricarica rapida di autobus a trazione elettrica, Sequoia Automation, 2014.

**Tabella 13: Costi di riferimento per le infrastrutture di ricarica e di accumulo stazionario**

Infrastruttura	Voce di Spesa	Unità di misura	Importo unitario
Stazione di ricarica	Costi impianto e installazione a potenza	€/kW	100
	Costi impianto e installazione fissi	€/stazione	70.000
	Bobine di induttanza	€/stazione	6.000
	Opere per connessioni permanenti in MT	€/stazione	68.000
	Opere per connessioni permanenti in BT	€/stazione	2.500
Accumulo Stazionario	Ultracapacitori	€/kWh	15.000
	Rigenerazione batterie <i>Second life</i>	€/kWh	50
	Caricabatteria a terra	€/kW	500
	Installazione	€/intervento	4.000
	Convertitore	€/kW	100
	Elettronica di controllo e connessione	€/stazione	6.500

Fonte: Elaborazione ENEA su fonti varie

**Tabella 14: Costi d'investimento per la stazione di ricarica**

	Induttanza	Sottostazione e opere civili	Costo a potenza	Costi fissi stazione	Investimento Stazione di Ricarica
<b>Caso A</b>	-	676.959	375.000	700.000	<b>1.751.959</b>
<b>Caso B</b>	-	25.103	315.700	700.000	<b>1.040.803</b>
<b>Caso C</b>	-	17.442	310.000	700.000	<b>1.027.442</b>
<b>Caso E</b>	60.000	25.103	331.000	700.000	<b>1.116.103</b>

Fonte: Elaborazione ENEA su fonti varie

La realizzazione degli **accumuli stazionari** riguarda tutti i casi escluso il solo caso A. Gli investimenti per queste infrastrutture sono favorevoli alla soluzione proposta nel caso E, dove ammontano a 456 mila euro. Il vantaggio economico è dato dal risparmio ottenuto dall'eliminazione del convertitore, nonostante i costi per i supercapacitori siano maggiori. La spesa più rilevante è a carico del caso C, che prospetta un sistema di accumulo ibrido costituito, oltre che dai supercondensatori, anche da un pacco batteria, seppur ridotto. I maggiori costi, in questo caso, sono appunto dovuti al convertitore e al caricabatteria per le *second life*, nonché ai maggiori costi per l'installazione e per il sistema di controllo e connessione. Si ipotizza che il costo di installazione del secondo accumulo possa beneficiare di uno sconto pari al 50% di quello previsto, e che l'aggravio del costo per i sistemi di controllo e connessione sia pari al 20% rispetto a quanto stabilito; trascurabile è invece il costo della rigenerazione delle batterie dismesse. Complessivamente la spesa nel caso C ammonta a 762,5 mila euro a fronte dei 648 mila euro necessari nello scenario B.

**Tabella 15: Costi d'investimento per gli accumuli stazionari**

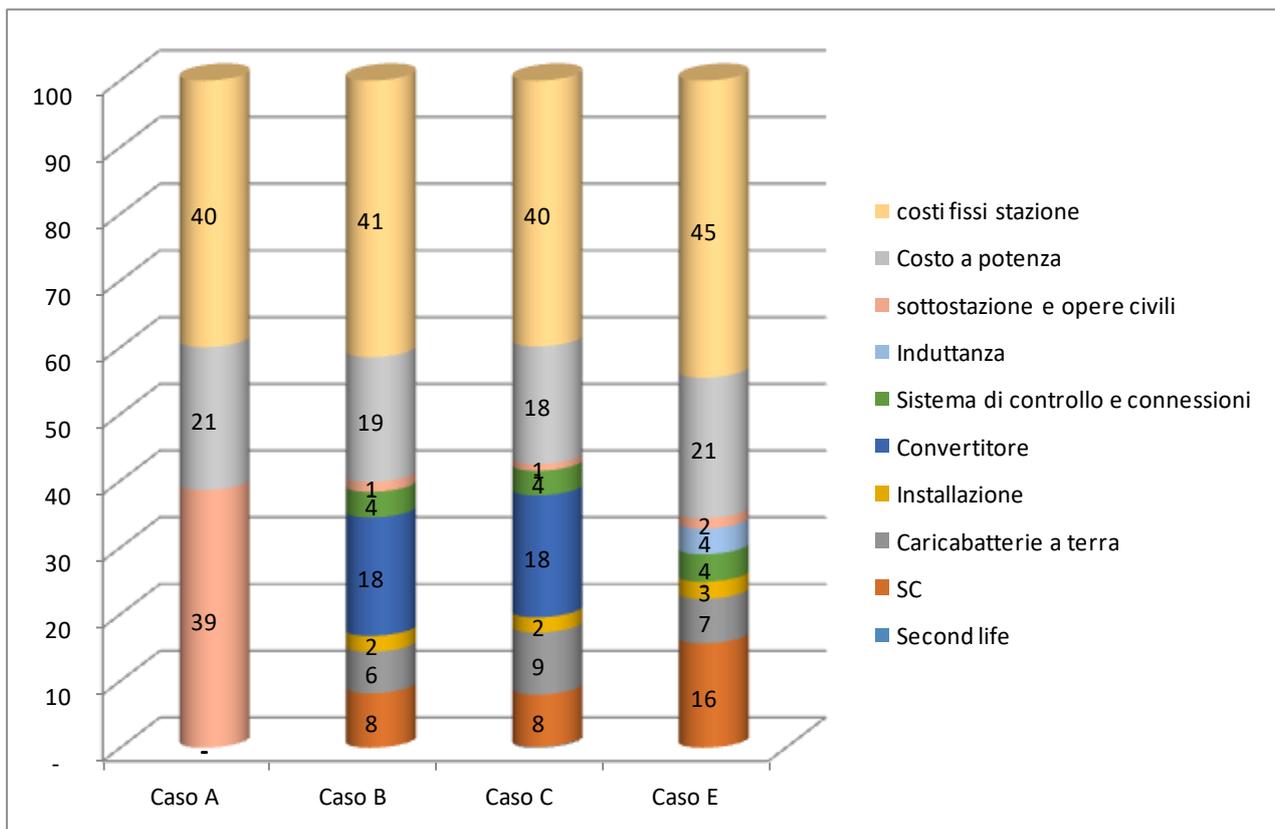
	Second life	SC	Caricabatterie a terra	Installazione	Convertitore	Sistema di controllo e connessioni	Investim. Accumulo Stazionario
<b>Caso A</b>	-	-	-	-	-	-	-
<b>Caso B</b>	-	138.000	105.000	40.000	300.000	65.000	<b>648.000</b>
<b>Caso C</b>	2000	138.000	163.500	60.000	321.000	78.000	<b>762.500</b>
<b>Caso E</b>	-	246.000	105.000	40.000	-	65.000	<b>456.000</b>

Fonte: Elaborazione ENEA su fonti varie

Il totale degli investimenti, per ciascuno degli scenari proposti, risulta ripartito in misura molto simile, all'incirca 2/5 del costo totale è destinato a sostenere il costo fisso per la stazione, 1/5 per i costi legati alla potenza della stazione e i rimanenti 2/5 rispettivamente destinati alle opere di connessione in MT per il caso A o alla realizzazione dell'accumulo stazionario e delle connessioni alla BT, negli altri casi.

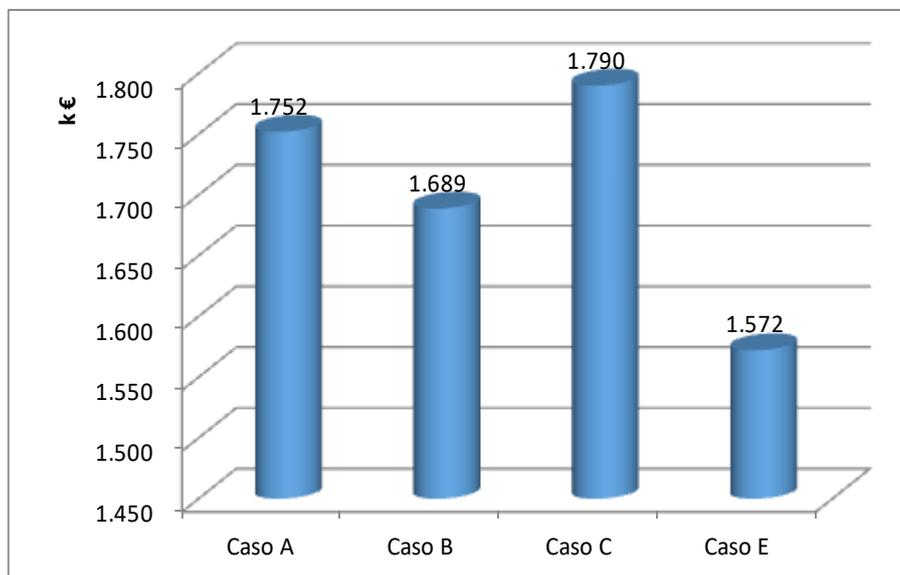
Complessivamente, la soluzione più conveniente, dal punto di vista dell'esborso finanziario, è quella rappresentata nello scenario E, il cui costo è pari a 1,57 milioni di euro. L'esborso maggiore si avrebbe per la configurazione infrastrutturale ipotizzata nel caso C, comunque con poco distacco rispetto alla soluzione prospettata nel caso A. In questi ultimi i casi, infatti, il costo sarebbe di 1,75 milioni di euro nel Caso A e di 1,79 nel caso C. Nel caso B, infine, il costo complessivo è di 1,69 milioni di euro. La massima differenza registrata tra le varie configurazioni (E vs C) si attesta intorno ai 218 mila euro (Figura 48).

**Figura 47: Costi d'investimento per la stazione di ricarica e accumuli stazionari [%]**



Fonte: Elaborazione ENEA

**Figura 48: Costi infrastrutturali di investimento**



Fonte: Elaborazione ENEA

## 7.2 I costi operativi annuali

I **costi di gestione annua** fanno riferimento alla bolletta energetica e alla manutenzione. La spesa energetica è stata calcolata applicando, ai consumi precedentemente stimati, le tariffe pubblicate dall’AEEG relativamente ai consumi per usi diversi da quelli residenziali e di illuminazione. Nello specifico, sono state prese in considerazione le tariffe in bassa tensione BT6 per i casi B, C ed E e la tariffa MT-A2 per il caso A, per il quale l’impegno di potenza sulla rete ricade nella seconda fascia compresa tra 90 e 500 kW, i costi operativi specifici sono riportati in Tabella 16.

**Tabella 16: Tariffe per l’energia elettrica in “altri usi”**

Energia elettrica				
Tariffa	Prelievo	Potenza	Energia (€/kWh)	
tipo	(€/punto prel.)	(€/kW)	Consumi mensili fino a 8 GWh	Consumi mensili superiori a 8 GWh
<b>BT6</b>	153,24	30,17	0,0807	153,24
<b>MT-A2</b>	1.196,25	30,64	0,11	0,01

Fonte: Elaborazione ENEA su fonte AEEG ed ENEA

Il costo della manutenzione delle stazioni di ricarica in alcuni studi viene quantificato pari ad una percentuale pari al 10% del costo di installazione. Tuttavia in una ricerca del 2012<sup>9</sup>, si afferma che essendo il costo di installazione fortemente variabile, potrebbe determinare dei valori irragionevolmente troppo elevati, sicché viene suggerito di applicare detta percentuale, al costo fisso

<sup>9</sup> Luskin Center for Innovation, “Financial Viability of non-residential electric vehicle charging stations”, 2012

del materiale hardware dell'infrastruttura. In questo lavoro, si è ritenuto opportuno calcolare i costi annuali di manutenzione seguendo entrambe le ipotesi precedenti e specificatamente, per le stazioni di ricarica si è applicato il 10% al costo fisso dell'hardware, ottenuto assumendo che il costo dell'hardware fosse pari ai  $\frac{3}{4}$  del costo fisso totale; per gli accumuli stazionari si è invece applicato il 10% al costo dell'installazione, ritenendo che, in questi casi, tali costi possano avere una maggiore invariabilità. La Tabella 17 riporta i costi annuali della manutenzione nei vari scenari.

**Tabella 17: Costi unitari annui di manutenzione**

	% Costo manutenzione	Costo Installazione Accumulo stazionario	Costo manut Accum stazionario	Costo stazione ricarica	% Costo HW	Costo HW	Costo manutenzione Stazione ricarica	Costo di manutenzione totale infrastrutture
	%	€/unità	€/unità	€/unità	%	€/unità	€/unità	€/unità
<b>Caso A</b>	<b>10%</b>	0	<b>0</b>	70.000	75%	52.500	<b>5.250</b>	<b>5.250</b>
<b>Altri Casi</b>	<b>10%</b>	4.000	<b>400</b>	70.000	75%	52.500	<b>5.250</b>	<b>5.650</b>

Fonte: Elaborazione ENEA

#### Nella

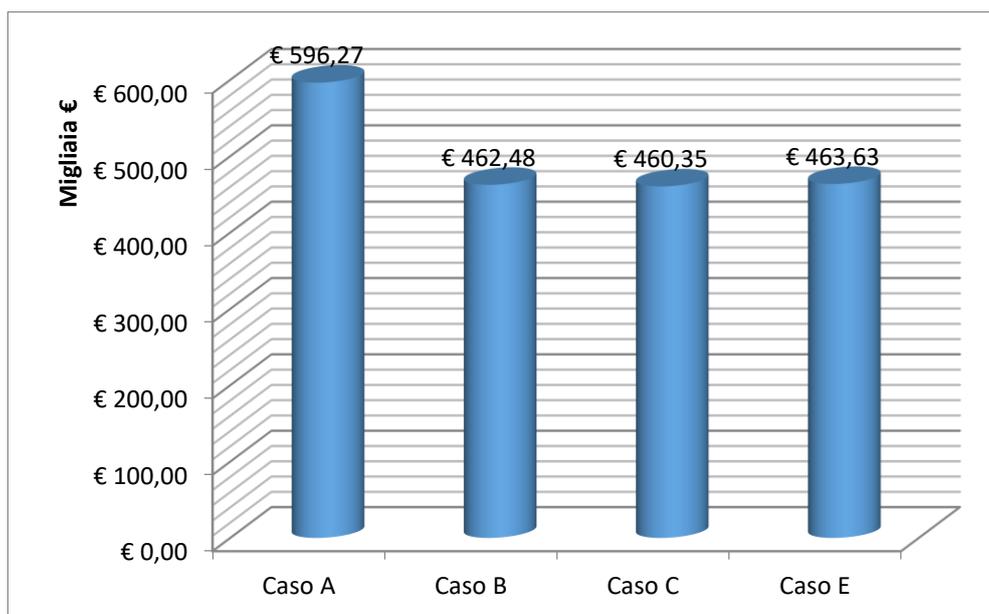
Tabella 18 di seguito è riportata la spesa annua, per l'energia e per la manutenzione delle infrastrutture, relativa a ciascuno scenario. Come facilmente prevedibile, il costo annuo dell'energia nel caso A è molto più consistente rispetto agli altri casi. La spesa per il consumo *tout court* di energia elettrica anche se un po' più alta nello scenario E, è piuttosto allineata nei vari casi. La differenza sostanziale sta nella spesa, commisurata all'impegno della potenza e al costo per punto di prelievo, il cui valore specifico, per la MT-A2 è quasi 8 volte maggiore rispetto a quello della BT-6. Nella spesa per la manutenzione, il caso A ne esce come favorito, mentre è leggermente più alta negli scenari con accumulo stazionario. Ciò anche rispetto al caso C, dove vi sarebbe un numero maggiore di controlli da realizzare per la presenza anche dell'accumulo con batterie *second life*, ma si ritiene che il relativo costo di manutenzione possa essere trascurato.

**Tabella 18: Costi operativi annui**

	Costo energia	Costo Potenza	Costo p.p.	Totale costo energia	Manutenzione
Caso A	1.267,9	11.489	11.963	<b>24.719</b>	<b>52.500</b>
Caso B	1.227,6	634	1.532	<b>3.394</b>	<b>56.500</b>
Caso C	1.283,2	302	1.532	<b>3.117</b>	<b>56.500</b>
Caso E	1.376,5	634	1.532	<b>3.543</b>	<b>56.500</b>

Fonte: Elaborazione ENEA su fonte AEEG

Operando l'**attualizzazione** dei valori economici, sulla base del tasso di sconto del 5%, sul periodo di analisi considerato, si ottengono i valori come mostrati nella Figura 49 di seguito. L'impegno economico attualizzato per i costi operativi considerati nel caso A ammontano a circa 596 mila euro, circa 460 mila euro nel caso C, 462 e 463 mila euro per i casi B ed E, rispettivamente. Il risparmio annuale nei casi alternativi, è calcolato pari a circa il 22-23% del rispettivo costo operativo, stimato per il Caso A.



**Figura 49: VAN costi operativi annui**

Fonte: Elaborazione ENEA

### 7.3 Esito della valutazione economica

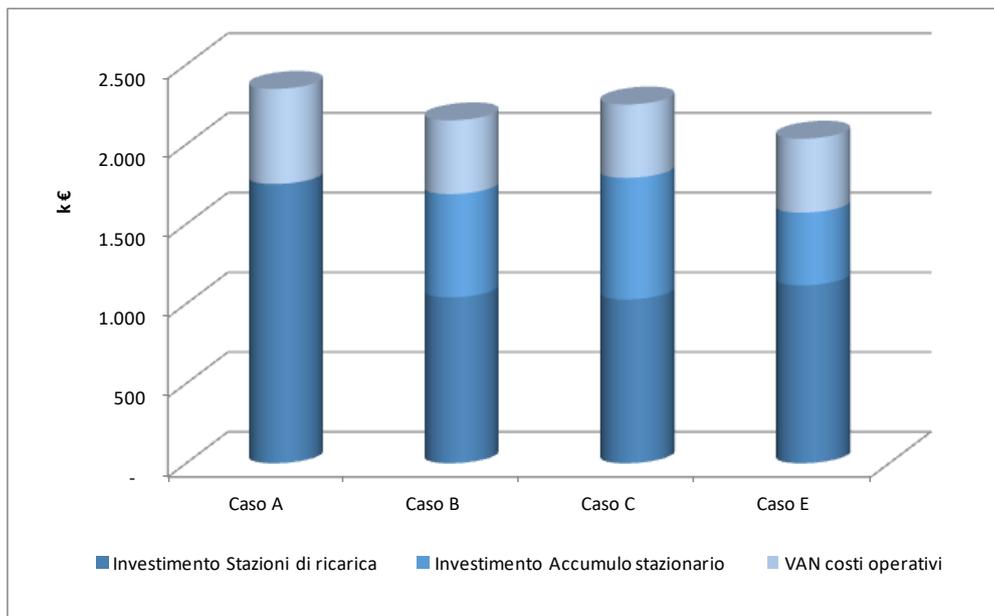
Il **risultato finale**, comprensivo degli investimenti e dei costi attualizzati per il periodo osservato, sono riportati di seguito in Tabella 19 e illustrati nella Figura 50. In conclusione, gli accorgimenti tecnologici caratterizzanti lo scenario E, hanno fatto sì che questo fosse il caso vincente rispetto agli altri, per questa tipologia di servizio. In questo caso, i costi della infrastruttura di ricarica incidono per il 55% del totale a fronte del 22% del costo dell’accumulo stazionario, il rimanente 23% è rappresentato dai costi operativi attualizzati.

Lo scenario A si conferma quello meno conveniente, imponendo un aggravio di spesa rispetto al migliore (caso E), pari a 312,5 mila euro. Il caso A è, infatti, penalizzato dal costo elevato per l’infrastrutturazione della stazione di ricarica e dagli elevati i costi per l’impegno della potenza sulla rete elettrica. Tale soluzione non è, quindi, conveniente, nonostante non siano previsti investimenti in sistemi di accumulo stazionario. Seguono poi, lo scenario B e C, quest’ultimo gravato dal sistema di accumulo stazionario ibrido.

**Tabella 19: Investimenti e costi operativi attualizzati**

	VAN costi operativi	Investim. Accumulo Stazionario	Investimento Stazione di Ricarica	Totale
<b>Caso A</b>	€ 596.267	-	1.751.959	<b>2.348.226,94</b>
<b>Caso B</b>	€ 462.482	648.000	1.040.803	<b>2.151.285,16</b>
<b>Caso C</b>	€ 460.349	762.500	1.027.442	<b>2.250.291,85</b>
<b>Caso E</b>	€ 463.632	456.000	1.116.103	<b>2.035.735,45</b>

Fonte: Elaborazione ENEA



**Figura 50: Totale investimenti e costi operativi attualizzati [€]**

Fonte: Elaborazione ENEA

#### 7.4 Focus su batterie Second Life

Le batterie delle auto elettriche, una volta giunte alla fine del loro ciclo di vita, rappresentano ancora una risorsa per applicazioni meno performanti, come possono essere le applicazioni stazionarie. Nella prospettiva di un prossimo decollo del mercato dei veicoli elettrici, si delinea la possibilità di riutilizzare le batterie dismesse dai veicoli, in quanto non più adatte per l'uso originario e riproporle per una seconda vita. Ciò, inoltre, consentirebbe di risparmiare sulla produzione inevitabile di materiali di scarto con annessi costi di smaltimento o possibilmente di riciclo.

Per poter essere riutilizzate, tuttavia, le batterie hanno bisogno di essere sottoposte ad un processo rigenerativo, che implica la rimozione della batteria e l'analisi della componentistica, con relativi costi.

La mole di lavoro richiesta per quest'ultima operazione, in particolare per le celle, può incidere molto sul costo della rigenerazione in *second life*, rendendo la procedura non conveniente. Per tale motivo, è auspicabile che le configurazioni delle batterie siano tali da rendere minimo questo tipo di intervento. Alcuni componenti come il sistema di raffreddamento, l'alloggiamento, i sensori e il sistema di gestione della batteria, possono essere rigenerati in maniera economica.

Un recentissimo rapporto americano<sup>10</sup> afferma che mentre oggi un nuovo sistema di accumulo stazionario può arrivare a costare più di 1.000 \$/kWh, lo stesso può scendere a 449 \$/kWh già fra qualche anno, quando cioè, il costo delle celle riutilizzabili scenderà a 49\$/kWh e quello del lavoro di riadattamento a 400\$/kWh. Lo studio afferma che il prezzo risulterà competitivo solo quando il costo complessivo toccherà i 200 \$/kWh. La Figura 51 illustra una stima di come, nel prossimo decennio, la disponibilità di batterie dismesse dai veicoli potrà essere riconvertita in sistemi di accumulo stazionario in base alle attuali condizioni del mercato e agli orientamenti dei produttori delle batterie.

Secondo un altrettanto recente studio europeo<sup>11</sup> che riporta i risultati di alcune applicazioni pilota, i costi per la rigenerazione del pacco batteria si aggirerebbero intorno ai 25-50 €/kWh, mentre il valore delle celle

<sup>10</sup> New life for used EV batteries as stationary storage, Bloomberg, Agosto 2016

<sup>11</sup> Second Life-Batteries as flexible storage for renewable energies, Bundesverband Erneuerbare Energie e.V. und Hannover Messe, Aprile 2016

riutilizzabili sarebbe pari a circa la metà del costo attuale (300 \$/kWh), ossia 150 \$/kWh circa, il che porterebbe, già da ora, il costo complessivo sui livelli dei 200\$/kWh sopra richiamati. La durata delle batterie rigenerate è stimata in circa 10 anni.

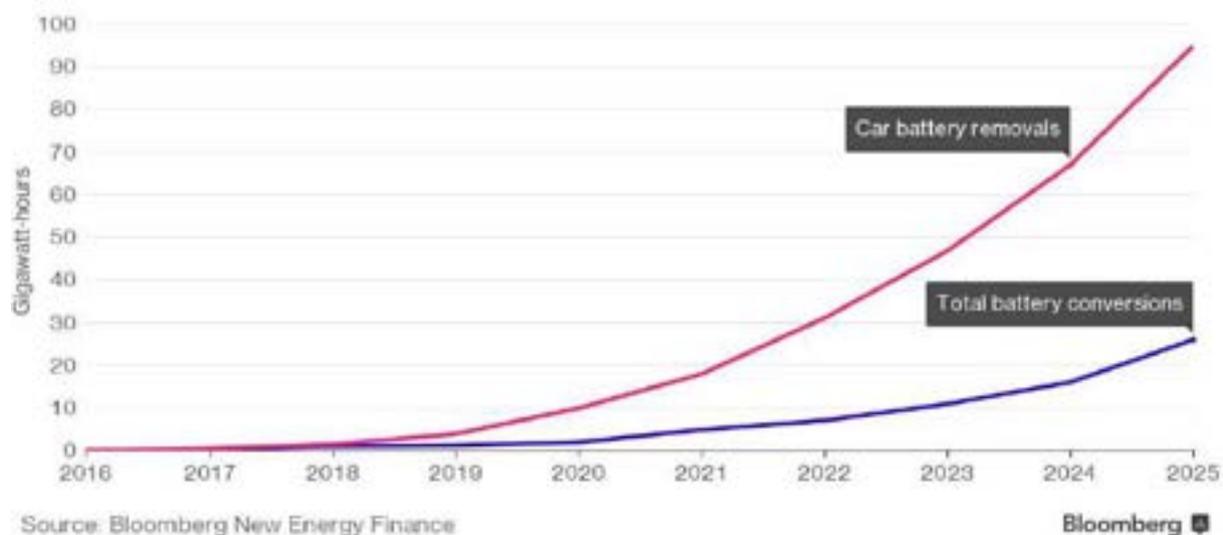


Figura 51: Trade-off tra dismissione e conversione in *second life* delle batterie  
Fonte: Bloomberg, 2016

## 8 Conclusioni

L'elettrificazione dei trasporti e nello specifico, di linee di trasporto pubblico locale, rischia di creare effetti indesiderati sulla rete di distribuzione elettrica o addirittura rischia di non essere realizzabile, a causa dell'introduzione di carichi non previsti in sede di progettazione della stessa. Per ovviare a questi inconvenienti e livellare l'improvvisa ed elevata richiesta di potenza sulla rete, possono essere impiegate varie tecnologie, capaci di integrare soluzioni diverse. L'obiettivo del primo anno di attività svolta nell'ambito della Ricerca di Sistema Elettrico, è stato, quindi, quello di verificare la fattibilità, simulare l'operatività e confrontare le performance tecniche ed economiche dell'integrazioni di diverse tecnologie, con l'obiettivo di poter individuare la soluzione ottimale capace di garantire sia la potenza necessaria all'espletamento del servizio di trasporto pubblico, sia la stabilità della rete di distribuzione elettrica nazionale.

Le tecnologie oggetto di studio, hanno riguardato, quindi, oltre alle stazioni di ricarica, anche configurazioni *ad hoc* di sistemi di accumulo stazionari costituiti da supercondensatori elettrochimici dalle elevate prestazioni in potenza ed da una vita utile prossima ad un milione di cicli completi, da batterie elettrochimiche innovative, quali ad esempio quelle litio-ione e di sistemi ibridi costituiti sia dai supercondensatori sia dalle batterie.

L'ipotesi applicativa fa riferimento ad un caso reale di studio<sup>12</sup> relativo alla linea 12A del trasporto pubblico dell'Aquila, rispetto alla quale è stato ipotizzato uno scenario di riferimento in cui è previsto che la linea di trasporto pubblico elettrificata si approvvigioni esclusivamente dalla rete con un numero variabile di autobus per ora, e due scenari nei quali si assume, alternativamente, che le ricariche avvengano o al capolinea o alle fermate.

La richiesta di energia e di tempo è molto diversa nei due casi. Inoltre, nel caso della ricarica al capolinea è prevista la possibilità che si possa verificare la presenza contemporanea di tutti gli autobus, il che comporterebbe un impegno di potenza pari alla somma della potenza degli autobus contemporaneamente in ricarica.

In questo caso, il lasso temporale a disposizione e la importante richiesta di energia potenzialmente verificabile, rende fattibile, dal punto di vista tecnico, l'accostamento dell'accumulo stazionario con batterie per ridurre l'impegno di potenza sulla rete. Tuttavia, la convenienza economica della realizzazione di questa ulteriore infrastruttura dipenderebbe dal numero di autobus che la linea dovrebbe servire, partendo dal presupposto che l'extracosto sostenuto per il sistema di accumulo stazionario dovrebbe essere ammortizzato da risparmi ottenibili in termini di minori investimenti per la stazione di ricarica e in termini di minori costi operativi legati alla bolletta energetica. Sembrerebbe essere esclusa, dal punto di vista economico invece, l'ipotesi di supportare la ricarica con un accumulo stazionario costituito da supercondensatori, dato il loro elevato costo specifico energetico, pari a 10 €/Wh a fronte dei circa 300 €/kWh delle nuove batterie al litio.

Nel caso della ricarica alle fermate, contrariamente al caso precedente, i tempi a disposizione sono molto corti e le potenze richieste sono molto alte, d'altra parte, la piccola distanza che l'autobus dovrebbe percorrere tra un approvvigionamento e l'altro, riduce notevolmente la dimensione dell'accumulo di bordo. Queste caratteristiche, da un lato escluderebbero la possibilità di utilizzare le batterie stazionarie come sorgente principale di energia per trazione mentre dall'altro lato renderebbero fattibile l'accumulo a bordo con i supercondensatori ed eventualmente una batteria tampone potrebbe supportare la fase di ricarica dei supercondensatori, dopo che il veicolo si è allontanato; un ulteriore accumulo con batterie alimenterebbe i servizi ausiliari.

Per questa ipotesi di scenario, sono stati simulati 4 casi oltre a quello di riferimento, in ognuno dei quali è stato introdotto un accumulo stazionario con supercondensatori, a sostegno della potenza richiesta alla rete. Dato che l'impegno di una elevata potenza sulla rete riguarda, in genere, sempre la ricarica ultrarapida, che viene associata alle fermate, l'analisi economica si è concentrata su quest'ultima ipotesi di

---

<sup>12</sup> RdS/PAR2013/102

scenario, analizzando i Casi A, B, C ed E e non anche il Caso D, ritenuto non fattibile dal punto di vista economico per l'aggravio di spesa dovuto alla presenza di un ulteriore convertitore da 300 kW.

L'analisi economica è stata realizzata considerando un periodo di 10 anni, rispetto al quale, applicando un tasso di sconto annuo del 5%, è stato calcolato il valore attuale netto (VAN). Le voci economiche sono relative agli investimenti, per gli acquisti della stazione di ricarica e dell'accumulo stazionario, ove presente, per la realizzazione delle connessioni permanenti in Bassa Tensione (BT) o Media Tensione (MT) e ai costi operativi, connessi alla bolletta energetica e alla manutenzione per ciascuna infrastruttura prevista nei diversi scenari.

La configurazione tecnica del Caso A, richiede inevitabilmente una componentistica onerosa che va ad incidere sui costi d'investimento. I risultati ottenuti confermano, infatti, che il caso A è il meno conveniente, comportando un aggravio di costo, rispetto al caso migliore (Caso E), di circa 312,5 mila euro.

In particolare, dovendo realizzare opere civili per le connessioni permanenti alla rete elettrica in media tensione, sarebbe necessario sostenere un costo di 677 mila euro a fronte dei 25 mila euro del Caso B ed E e dei 17,4 mila euro del Caso C; anche i costi variabili della stazione di ricarica sarebbero maggiori per una cifra oscillante tra i 44 ed i 65 mila euro. Tuttavia, gli investimenti per gli accumuli stazionari, rischiano di vanificare eventuali vantaggi economici derivanti dal livellamento della potenza dalla rete. Nel presente studio, è emerso, infatti, che l'investimento per l'accumulo stazionario può essere molto variabile, oscillando dai 456 mila euro nel migliore dei casi (Caso E), ai 648 mila euro nel caso B e fino ai 762,5 mila euro nel Caso C. L'infrastrutturazione completa di una stazione di ricarica quindi, nel caso A costerebbe 175 mila euro e rispetto a questo, nel Caso B si risparmierebbe un 4% sostenendo un costo pari a 169 mila euro a fermata e nel caso E l'esborso si ridurrebbe del 10% attestandosi su un costo pari a 157 mila euro; nel Caso C, invece, il doppio sistema di accumulo comporterebbe un aggravio del costo unitario dell'infrastruttura pari al 2%, rispetto al Caso A.

Per quanto riguarda i costi operativi annui, la bolletta energetica nel caso A, è fortemente penalizzata dai costi tariffari per la fornitura dell'energia elettrica in media tensione mentre negli altri casi è sufficiente un allaccio in bassa tensione con tariffe, quindi, più contenute; i costi di manutenzione sono pesantemente condizionati da quelli della stazione di ricarica (ultraveloce con pantografo), comune a tutti i casi esaminati, e quindi, complessivamente, l'onere per la manutenzione è leggermente più contenuta nel Caso A, per il minor numero di controlli da eseguire data l'assenza degli accumuli stazionari. In totale, nei casi alternativi si otterrebbe un risparmio annuale pari a circa il 22-23% del rispettivo costo operativo stimato per il Caso A. Concludendo, l'analisi condotta dimostra che, date certe condizioni, l'ipotesi di affiancare alla rete, sistemi di accumulo stazionari, sia economicamente fattibile. Le soluzioni prospettate riescono, infatti, ad abbattere il costo complessivo di progetto, rispetto al caso A, di una percentuale che oscilla tra il 4,2 % del caso C, l' 8,4 % del caso B e il 13,3 % del caso E, vedi l'istogramma di seguito riportato:

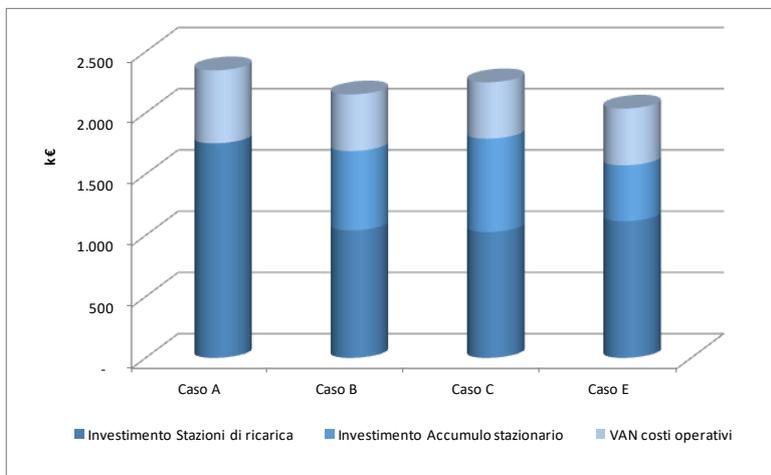


Figura 52: Totale investimenti e costi operativi attualizzati [€]

Ad oggi i costi delle stazioni di ricarica ultrarapida sono ancora molto elevati, non avendo ancora il settore raggiunto livelli di economie di scala sufficienti a poter praticare dei prezzi più competitivi sul mercato. Tuttavia, le prospettive internazionali sembrano essere favorevoli ad una contrazione dei costi, ma con orizzonti che non sembrano essere molto vicini a livello nazionale.

## 9 Riferimenti bibliografici

1. M Conte, A Genovese, F Ortenzi, F Vellucci, *Hybrid battery-supercapacitor storage for an electric forklift: a life-cycle cost assessment*, *Journal of Applied Electrochemistry* 44 (4), 523-532
2. R. Di Rienzo, F. Baronti, F. Velluccix, F. Cignini, F. Ortenzi, G. Pedex, R. Roncella, and R. Saletti, *Experimental Analysis of an Electric Minibus with Small Battery and Fast Charge Policy*, *ESARS-ITEC 2016*
3. S.Orchi, F. Ortenzi , G. Valenti, M.P.Valentini,V.Fabrizi *Analisi di elettrificazione del TPL in contesti ITC: lo smart ring dell'Aquila, Rapporto Ricerca di Sistema Elettrico 2015*
4. Ceraolo M (2000) *New Dynamical Models of Lead–Acid Batteries*”, *IEEE transactions on power systems* 15-4
5. M Conte, A Genovese, F Ortenzi, F Vellucci, *Hybrid battery-supercapacitor storage for an electric forklift: a life-cycle cost assessment* *Journal of Applied Electrochemistry* (2014) 44:523-532
6. F. Vellucci, G. Pede, A. Mariani, F. D'Annibale, *Sviluppo e realizzazione di moduli batterie litio-ioni per avviamento e trazione non automotive* Report RdS/2012/087
7. Edoardo Fiorucci, Antonio Ometto ,*Studio teorico-sperimentale delle prestazioni di convertitori DCDC per la ricarica rapida*, Report RdS/2013/134
8. A. Di Napoli, E. Rossi, *Realizzazione dell'Interfaccia Elettronica di Potenza per una MicroCar Ibrido Serie*, Prot. ENEA/2006/11115 Cod.Forn. 6461
9. Schunk SLS101 *Charging Pantograph for bus applications*, Datasheet;
10. ABB, *L'elettrificazione del trasporto pubblico locale su strada Piattaforme tecnologiche e scenari operativi*, ABB WhitePaper Trasporti
11. <http://www.lastampa.it/2016/07/19/motori/tecnologia/ginevra-in-arrivo-bus-elettrici-che-si-ricaricano-a-ogni-fermata-il-flash-charging-7i0D52cLP1UDGqwcuAPUJP/pagina.html>
12. Maxwell , *Datasheet 125v Heavy Transportation Module*, Bmod0063 P125 B08
13. G. Pede, E. Rossi, C. Villante, *“Studio di massima di una stazione di ricarica rapida per linea di trasporto pubblico urbano”*, *Ricerca di Sistema Elettrico – Report RdS/2012/092*, Enea-MiSE 2012.
14. *New life for used EV batteries as stationary storage*, Bloomberg, Agosto 2016.
15. *Second Life-Batteries as flexible storage for renewable energies*, Bundesverband Enruerbare Energie e.V. und Hannover Messe, Aprile 2016.
16. *Condizioni economiche per l'erogazione del servizio di connessione n. 348\_07 All. B*, AEEG
17. *K-bus, simulazione di performance tecnico gestionale di sistema di biberonaggio energetico a ricarica rapida di autobus a trazione elettrica*, Sequoia Automation, 2014.
18. D. Chang, D. Erstad, E.Lin, A. Falken Rice, C. Tzun Gho, A. Tsao, *“Financial Viability of Non Residential Electric Vehicle Charging Stations*, UCLA Luskin School of Public Affairs, agosto 2012.