



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia  
e lo sviluppo economico sostenibile



*Ministero dello Sviluppo Economico*

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Prove di funzionalità e di resa energetica di un impianto con accumulo per  
la compensazione dell'alimentazione di un sistema di trazione

*S. Barsali, R. Giglioli, D. Poli*



*Università di Pisa - DESE*

Report RdS/2012/250

PROVE DI FUNZIONALITÀ E DI RESA ENERGETICA DI UN IMPIANTO CON ACCUMULO PER LA  
COMPENSAZIONE DELL'ALIMENTAZIONE DI UN SISTEMA DI TRAZIONE

S. Barsali, R. Giglioli, D. Poli (Università di Pisa, DESE)

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto: Sistemi avanzati di accumulo di energia

Responsabile del Progetto: Mario Conte, ENEA

Esprimiamo un ringraziamento all'Ing. Giuseppe Rinaldi, al Sig. Fabio Bonsignori e al Sig. Alessio Bechini per il contributo apportato nella fase di rilevamento sperimentale. Esprimiamo un particolare ringraziamento alla società EEI di Vicenza costruttore dell'impianto di compensazione per la loro disponibilità e il loro contributo alla sperimentazione.

## Indice

<b>Sommario.....</b>	<b>4</b>
<i>Introduzione .....</i>	<i>5</i>
<i>Campagna di misure di Marzo 2012 .....</i>	<i>9</i>
<i>Analisi delle registrazioni.....</i>	<i>9</i>
<i>Campagna di misure di Settembre 2012 .....</i>	<i>14</i>
<b>Conclusioni.....</b>	<b>18</b>

## Sommario

Su un impianto in esercizio per l'alimentazione di un sistema di trazione per il trasporto pubblico, dotato di sistema di accumulo con batterie al litio, è stato installato un sistema di monitoraggio dei flussi di potenza attiva e reattiva e monitorato in due diversi periodi dell'anno.

Sono presentate le registrazioni e l'elaborazione dei dati nonché un'analisi dei flussi energetici e la sintesi di una possibile modifica al sistema di controllo al fine di migliorare la resa energetica dell'impianto.

Dall'analisi dei risultati di monitoraggio si evidenziano anche i benefici risultanti lato rete di alimentazione sia in termini di minore potenza assorbita, ma anche la possibilità di non avere flussi inversi di energia.

L'impianto in esame ha caratteristiche analoghe a quello in fase di costruzione secondo le specifiche indicate nel rapporto RdS/20122/249 "Specifiche tecniche della struttura funzionale e del controllo di un dispositivo con accumulo elettrochimico per i servizi di rete". Pertanto le analisi sviluppate sulla base dei rilievi sperimentali sono estendibili anche all'impianto in fase di realizzazione e ne costituiscono un'utile anticipazione del funzionamento.

## Introduzione

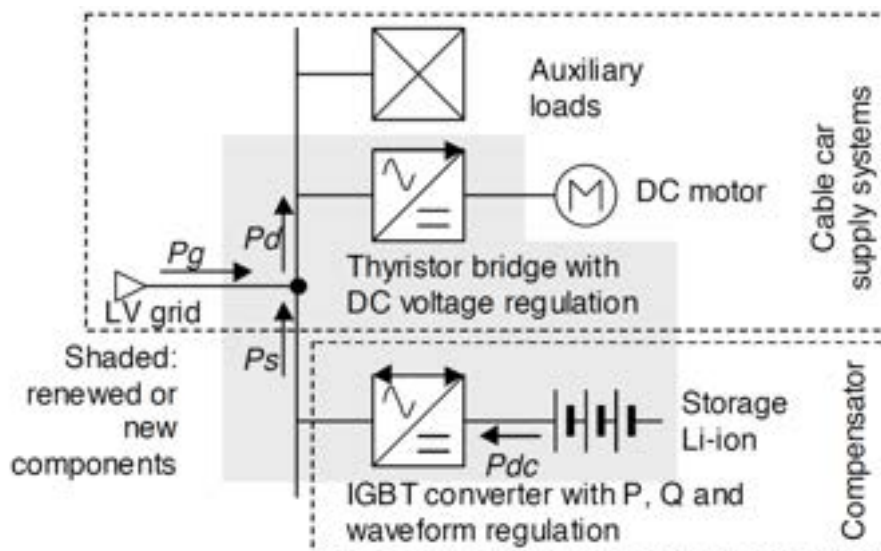
Dovendo verificare il comportamento di un sistema di compensazione della potenza attiva e reattiva con accumulo di un impianto per l'alimentazione di un sistema di trasporto in fase di costruzione secondo le specifiche indicate nel rapporto RdS/20122/249 "Specifiche tecniche della struttura funzionale e del controllo di un dispositivo con accumulo elettrochimico per i servizi di rete", è stato scelto quello della funicolare di Bergamo "San Vigilio" in accordo con il gestore ATB. Pertanto le analisi sviluppate sulla base dei rilievi sperimentali sono estendibili anche all'impianto in fase di realizzazione e ne costituiscono un'utile anticipazione del funzionamento.

La funicolare di Bergamo "San Vigilio" unisce il Colle di San Vigilio con la Città Alta di Bergamo. Entrata in funzione nel 1912, ha una corsa di 620 m con un dislivello tra le due stazioni di circa 90 m. Il percorso della funicolare è costituito da due tratti a pendenza differente. Il tempo per arrivare da una stazione all'altra è di circa 2 minuti e mezzo e ogni corsa completa di salita e discesa avviene con una cadenza di 15 minuti. Durante l'orario invernale, nei giorni feriali, la funicolare effettua una pausa di 2 ore verso le 12:55 e termina il servizio alle ore 20. Nel periodo estivo, invece, viene fatto orario continuato anche nei giorni feriali dalle 10:21 alle 24:00.

Il sistema di trazione è costituito da un motore DC alimentato da un doppio ponte a tiristori.

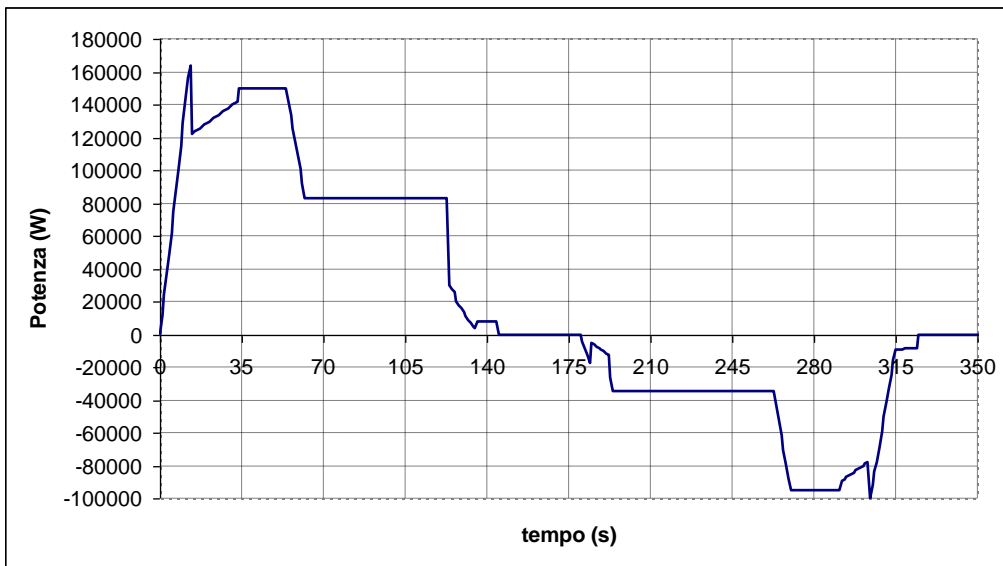
La fornitura dell'energia elettrica è di tipo trifase in bassa tensione a 400 V con un picco di potenza richiesta di 220 kW.

Il sistema di accumulo in esame è costituito da una batteria al litio collegata alla sbarra AC tramite un convertitore a IGBT come mostrato in Figura 1.

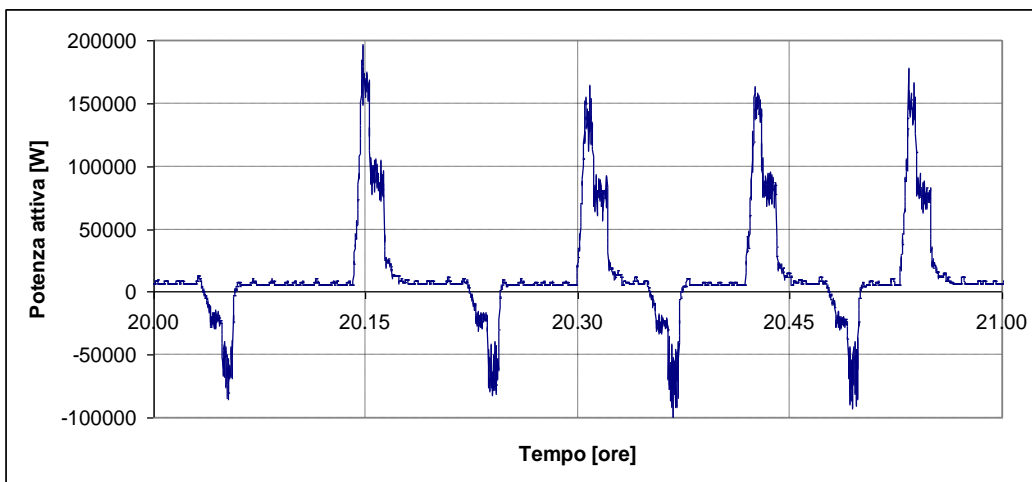


**Figura 1.** Schema del sistema di trazione e di accumulo

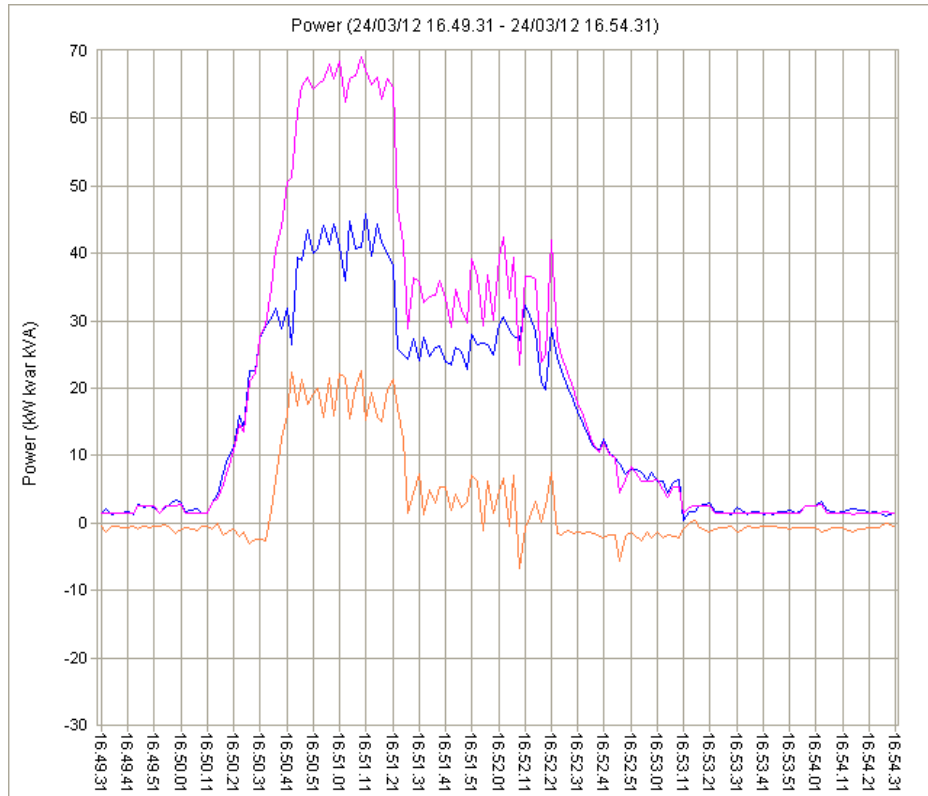
Dalle caratteristiche meccaniche e dal profilo del percorso è stato possibile stimare la potenza meccanica alle ruote a pieno carico, riportata nella figura in basso. Conoscere il profilo del percorso è determinante in quanto, una volta nota la pendenza, è possibile costruire un semplice modello fisico del sistema.



Nella figura seguente è invece riportato l'assorbimento di potenza attiva all'interno di una finestra temporale. In tale figura è possibile rendersi conto della frequenza delle corse (circa 4 l'ora in media) e del valore dei picchi di potenza sia durante le accelerazioni che durante le frenate. Si nota un picco massimo in assorbimento verso le ore 20 pari 200 kW, e dei picchi negativi in discesa di circa 110 kW distribuiti più o meno uniformemente in tutta la finestra temporale presa in considerazione.



La batteria permette di recuperare l'energia quando la cabina è in discesa e fornisce un contributo di potenza alla funicolare quando questa sta salendo. In salita l'intervento avviene quando la potenza assorbita dall'assorbimento supera una certa soglia precedentemente impostata come mostrato in Figura 2.



**Figura 2.** Diagramma delle potenze sulla barra AC per una fase nella corsa in salita.

La funicolare (in magenta) durante la fase di salita incontra per primo il tratto a pendenza più ripida. La potenza assorbita è superiore della soglia di intervento e la batteria (in arancio) si fa carico della potenza rimanente per raggiungere il picco. In questo modo la potenza richiesta alla rete di alimentazione (in blu) è ridotta del contributo della batteria.

In discesa l'energia erogata dalla funicolare viene recuperata dalla batteria e in rete non si ha alcun scambio di potenza come mostrato in Figura 3.

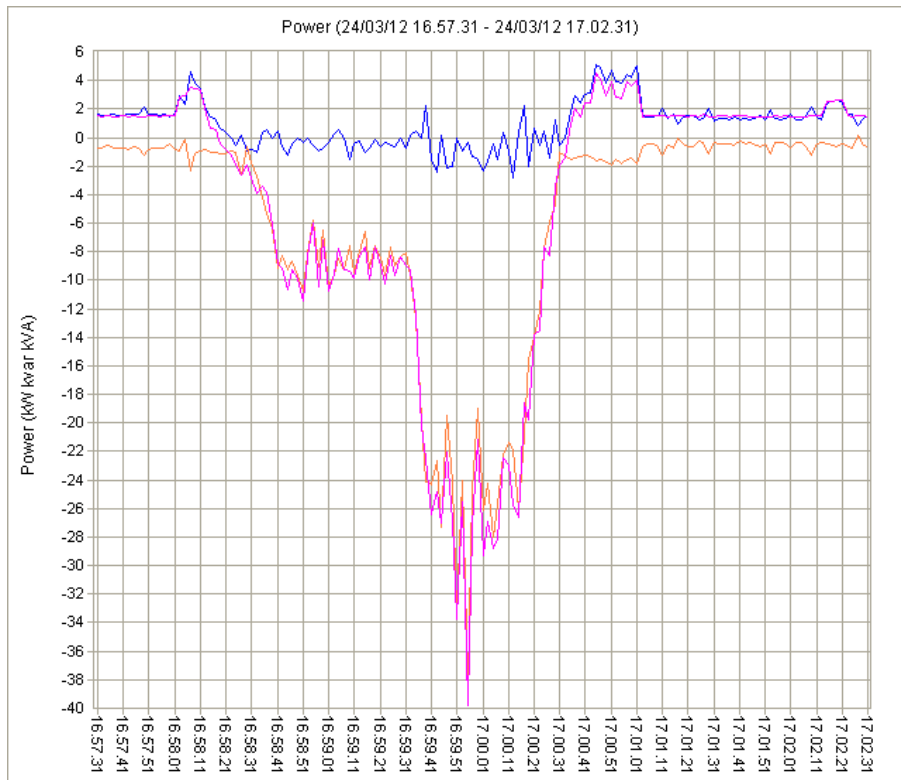
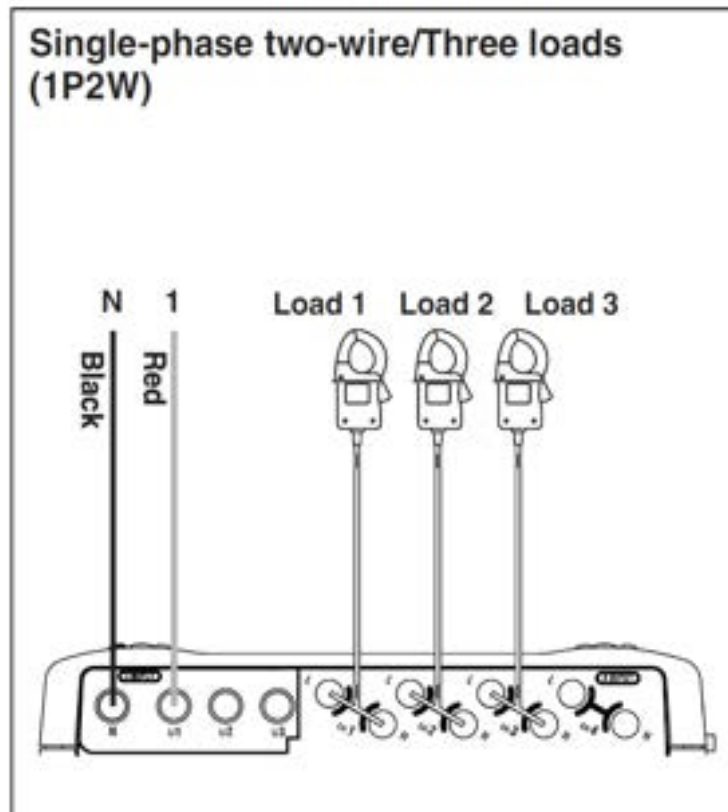


Figura 3. Diagramma delle potenze sulla barra AC per una fase nella corsa in discesa.

Nel caso in cui la batteria fosse completamente carica prima del termine della discesa, comunque l'energia rimanente può essere recuperata in rete mantenendo la frenatura attiva del sistema di frizione.

### Campagna di misure di Marzo 2012

Dal 22/03/2012 al 29/03/2012 si è svolta la prima campagna di misure riguardante il sito di San Vigilio. Sono stati utilizzati tre data logger CW240 della Yokogawa nella configurazione mostrata in Figura 4.



**Figura 4.** Schema di collegamento di uno dei data logger.

Ogni data logger è stato assegnato ad una sola fase per permettere l'acquisizione contemporanea delle potenze delle tre sezioni del nodo.

L'intervallo di acquisizione delle grandezze è stato di 2 sec.

Le grandezze misurate per ogni carico sono state: potenza attiva, potenza reattiva, potenza apparente, fattore di potenza, tensione e corrente.

### Analisi delle registrazioni

Il profilo di potenza dell'assorbimento della funicolare è dipendente dal numero di passeggeri a bordo della vettura. La campagna di misure ha confermato che questa dipendenza incide per circa il 25% del picco di massima potenza richiesta come mostrato in Figura 5. La massima potenza registrata nella settimana di acquisizioni è di 200 kW, mentre il valore più basso della corsa in salita, nel tratto a pendenza maggiore, è stato di 150 kW.

Come mostrato nelle figure 6,7,8 l'incidenza sull'energia richiesta per la tratta in salita è di circa 11% tra quella assorbita con il massimo carico dei passeggeri e con il minimo carico di passeggeri.

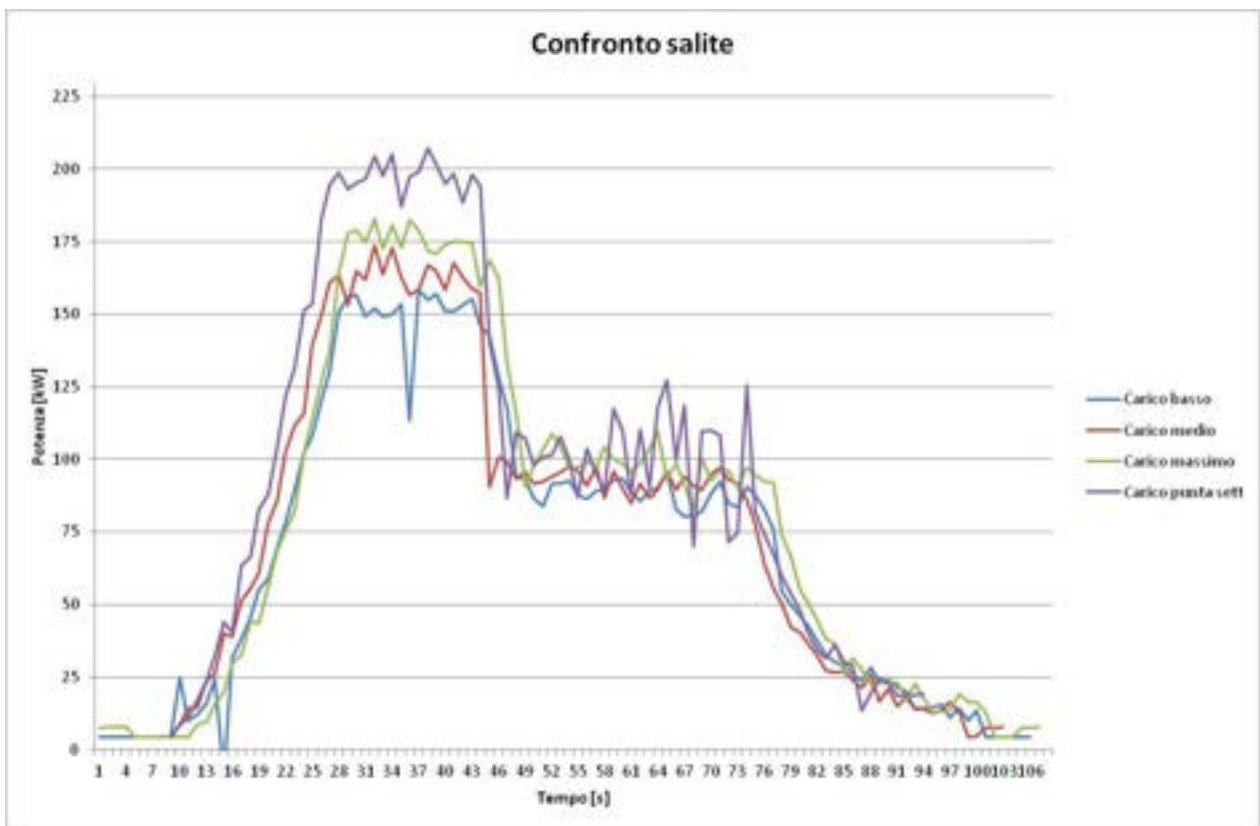


Figura 5. Profili di potenza della corsa in salita per vari carichi.

Di seguito sono riportati i volumi di energia coinvolti nei tre profili tipo di salita.

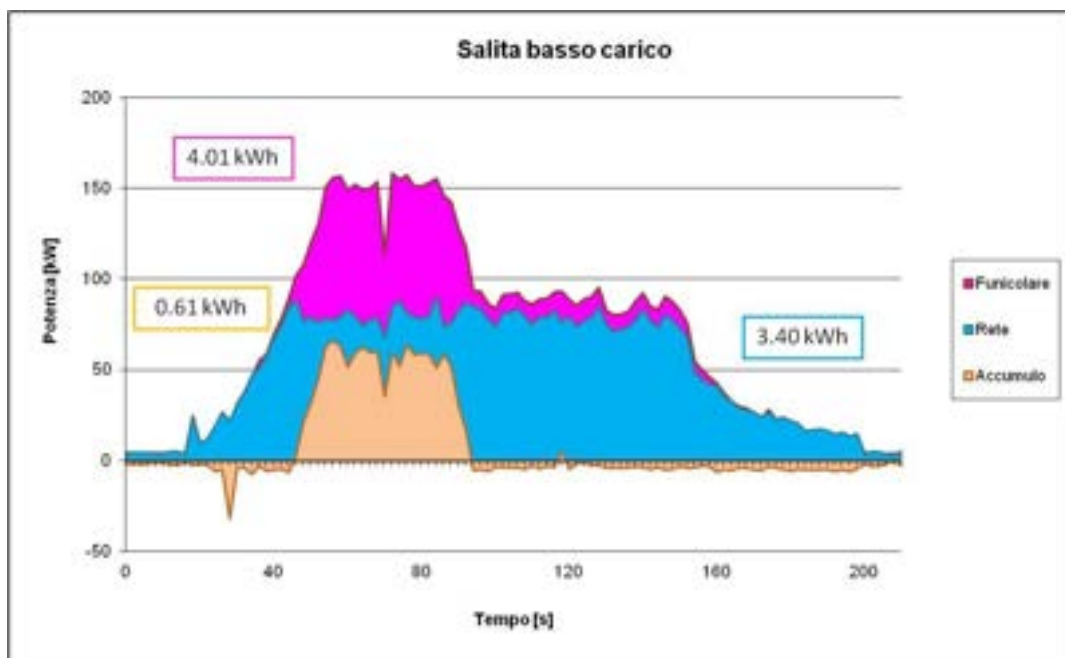
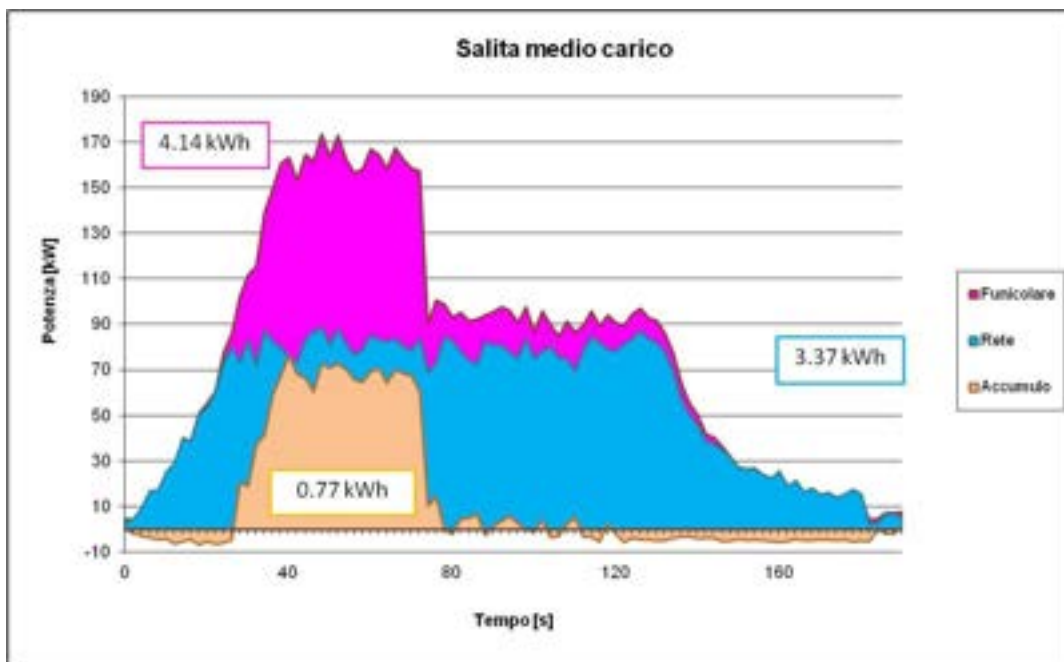
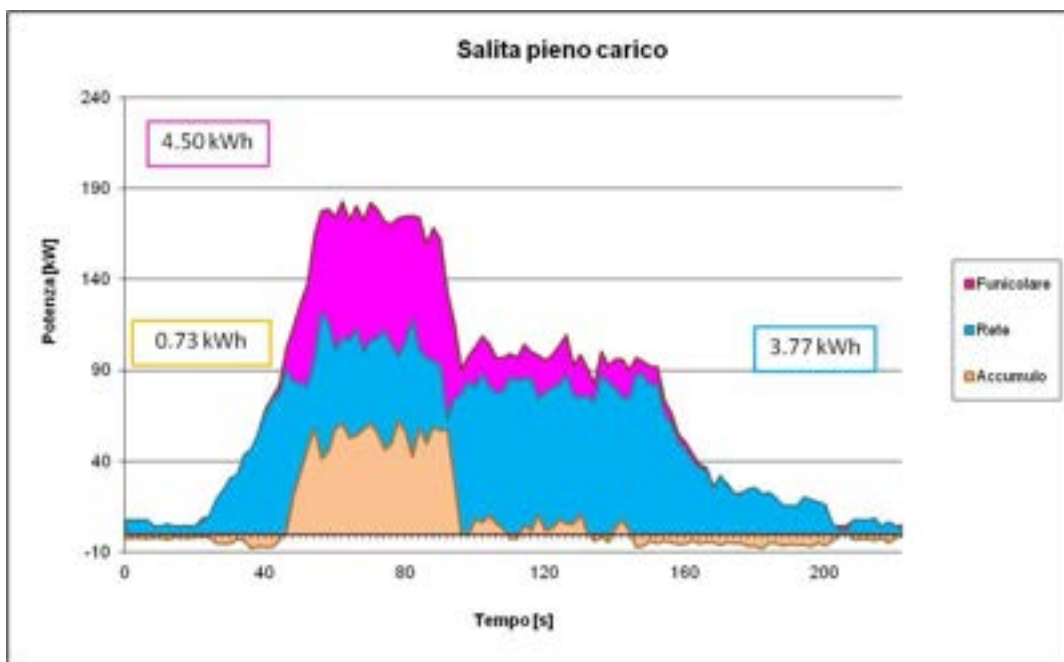


Figura 6. Volumi di energia per salita a basso carico.



**Figura 7.** Volumi di energia per salita a medio carico.



**Figura 8.** Volumi di energia per salita a pieno carico.

La variazione del contributo del sistema di compensazione con accumulo è, in termini di energia fornita tra massimo e minimo carico del 20%, analogamente la variazione di energia richiesta dalla rete è dell'11%.

L'influenza del numero di passeggeri sul profilo di potenza della funicolare si può vedere anche nelle corse in discesa come mostrato in Figura 9.

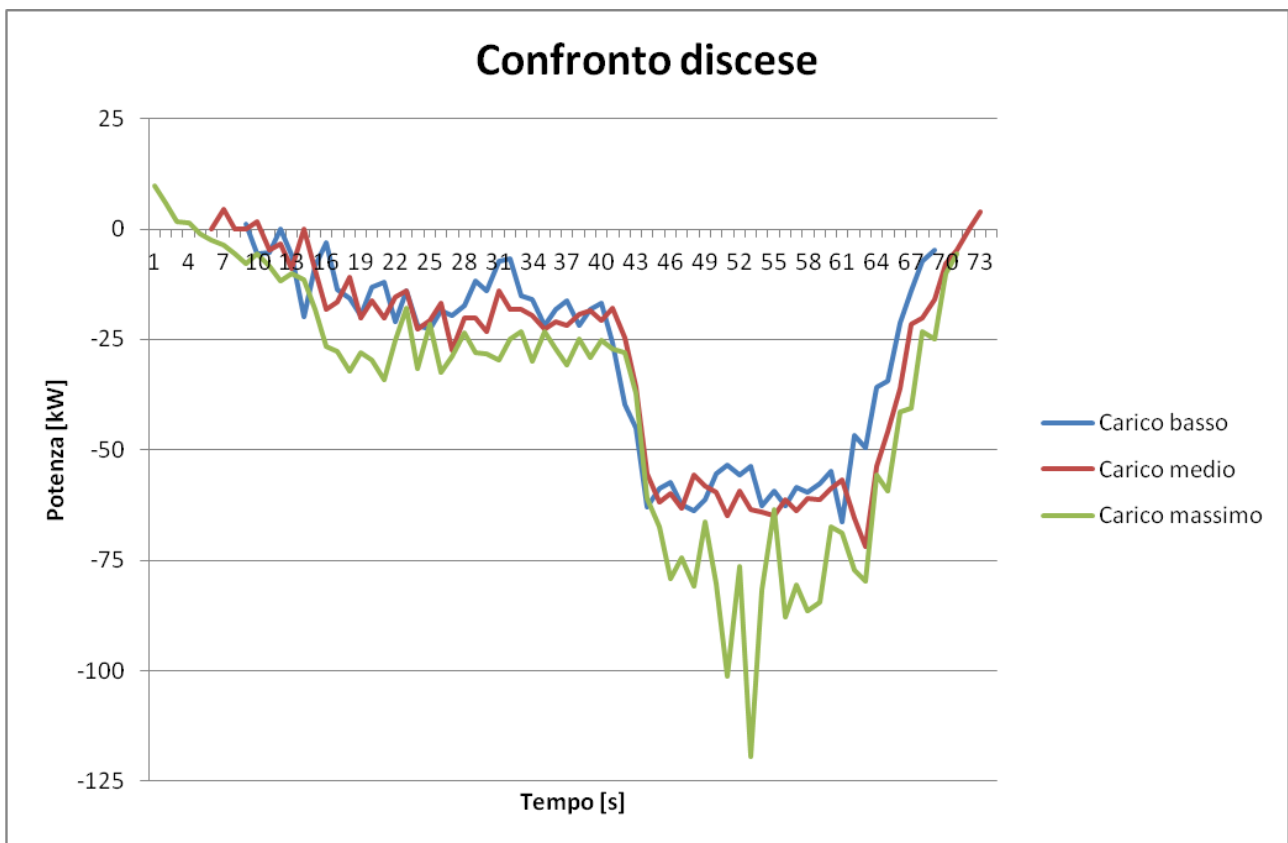


Figura 9. Profili di potenza della corsa in discesa per vari carichi.

Analogamente a prima si riportano i valori dell'energia in gioco, difetti anch'essi dell'assorbimento dei servizi ausiliari.

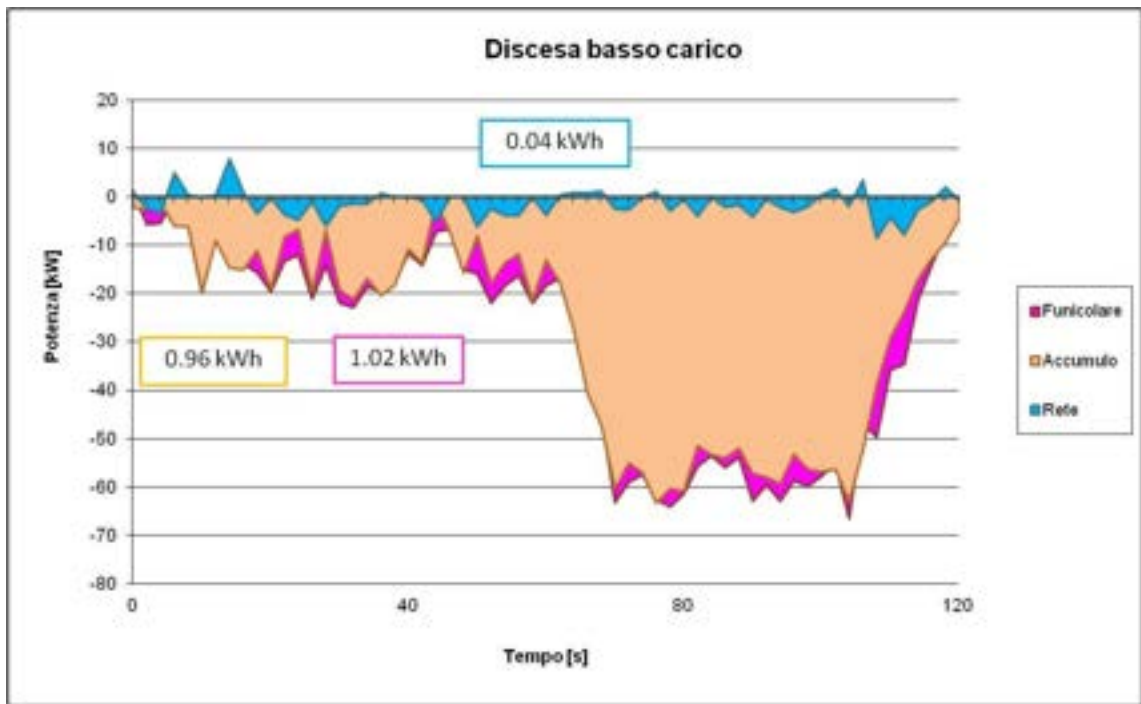
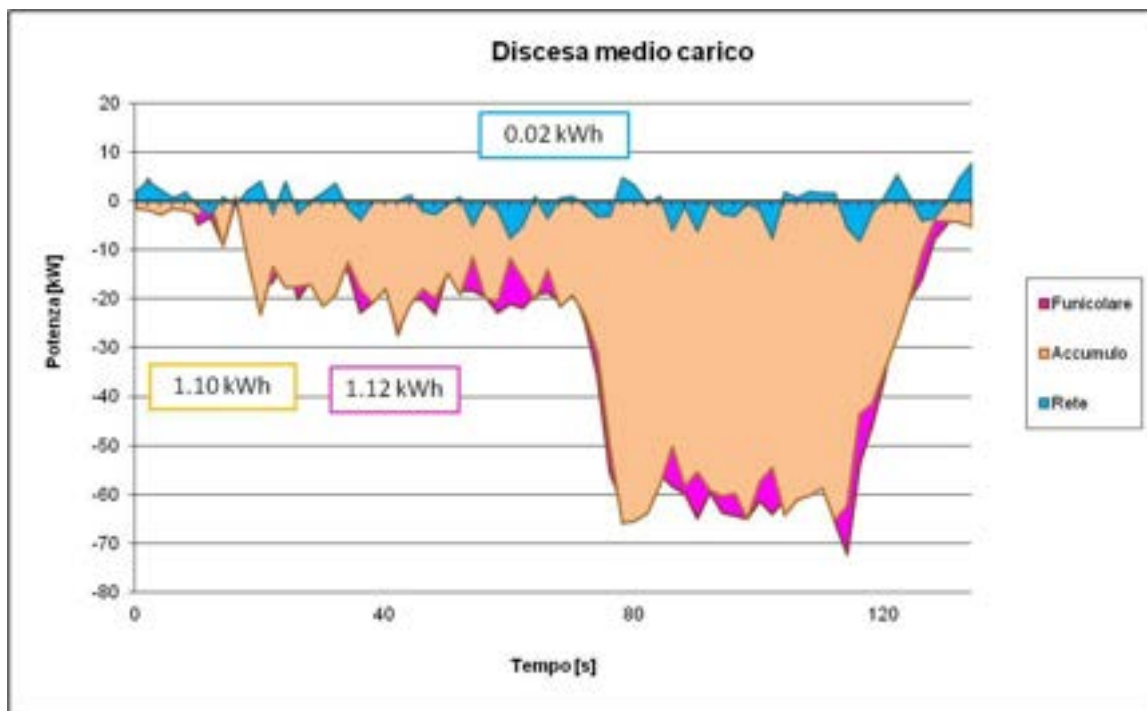
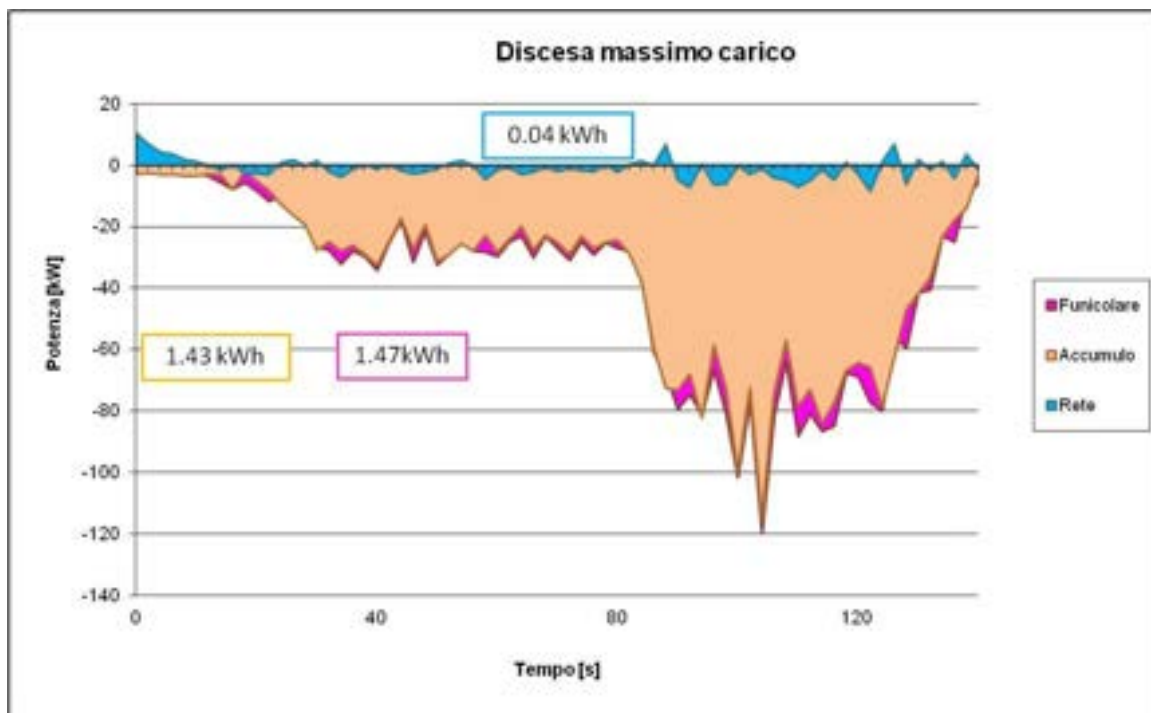


Figura 10. Volumi di energia per discesa a basso carico.



**Figura 11.** Volumi di energia per discesa a medio carico.



**Figura 12.** Volumi di energia per discesa a massimo carico.

Dai grafici si può osservare come l'energia erogata dall'azionamento della funicolare vada tutta nella batteria a meno di un piccolo ripple dovuto ai servizi ausiliari del sistema.

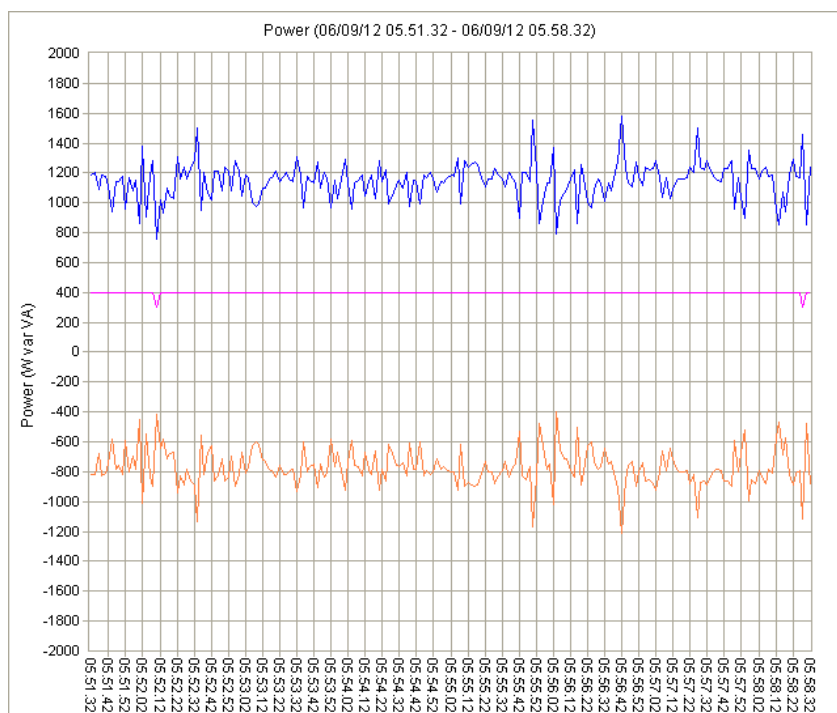
### Campagna di misure di Settembre 2012

Durante l'estate del 2012 sono state apportate modifiche al sistema di monitoraggio delle batterie e sulla soglia di intervento delle stesse. Si è quindi proceduto ad una seconda campagna di misura, dal 05/09/2012 al 12/09/2012, per vedere gli effetti di tale modifiche sul piano energetico e di potenza.

Gli strumenti e le configurazioni utilizzati sono gli stessi della campagna di Marzo.

In contemporanea alle acquisizioni fatte in loco, c'è stata una campagna di misure fatta da remoto da parte del costruttore dell'impianto (società EEI) in grado di registrare il segnale di stato di carica stimato dal BMS (Battery Management System). Questa ulteriore serie di misure ha permesso di monitorare lo stato di carica delle batterie.

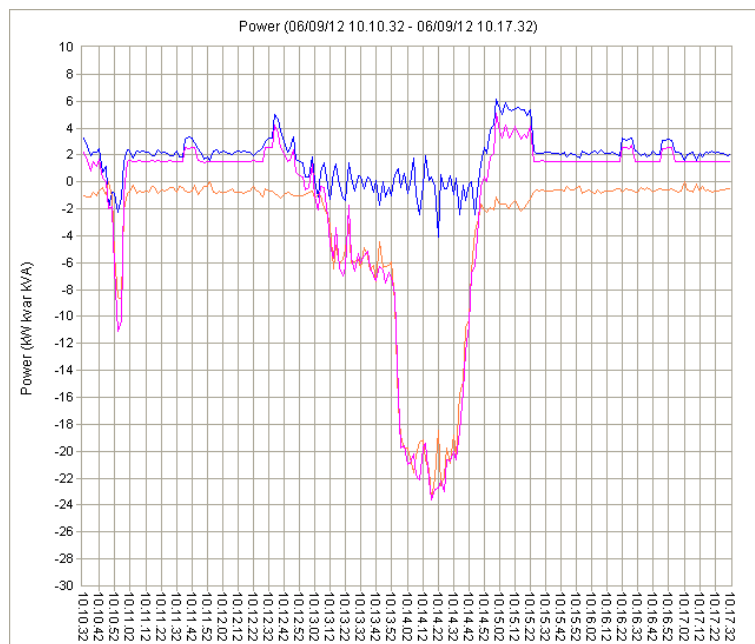
Analizzando i risultati delle misure si può vedere come l'assorbimento dei servizi ausiliari sia ancora rilevante, anche nelle ore notturne in cui l'impianto è spento. In blu è rappresentata la rete, mentre in arancio è rappresentata la batteria e il sistema di filtraggio attivo connesso in parallelo al convertitore dell'accumulo.



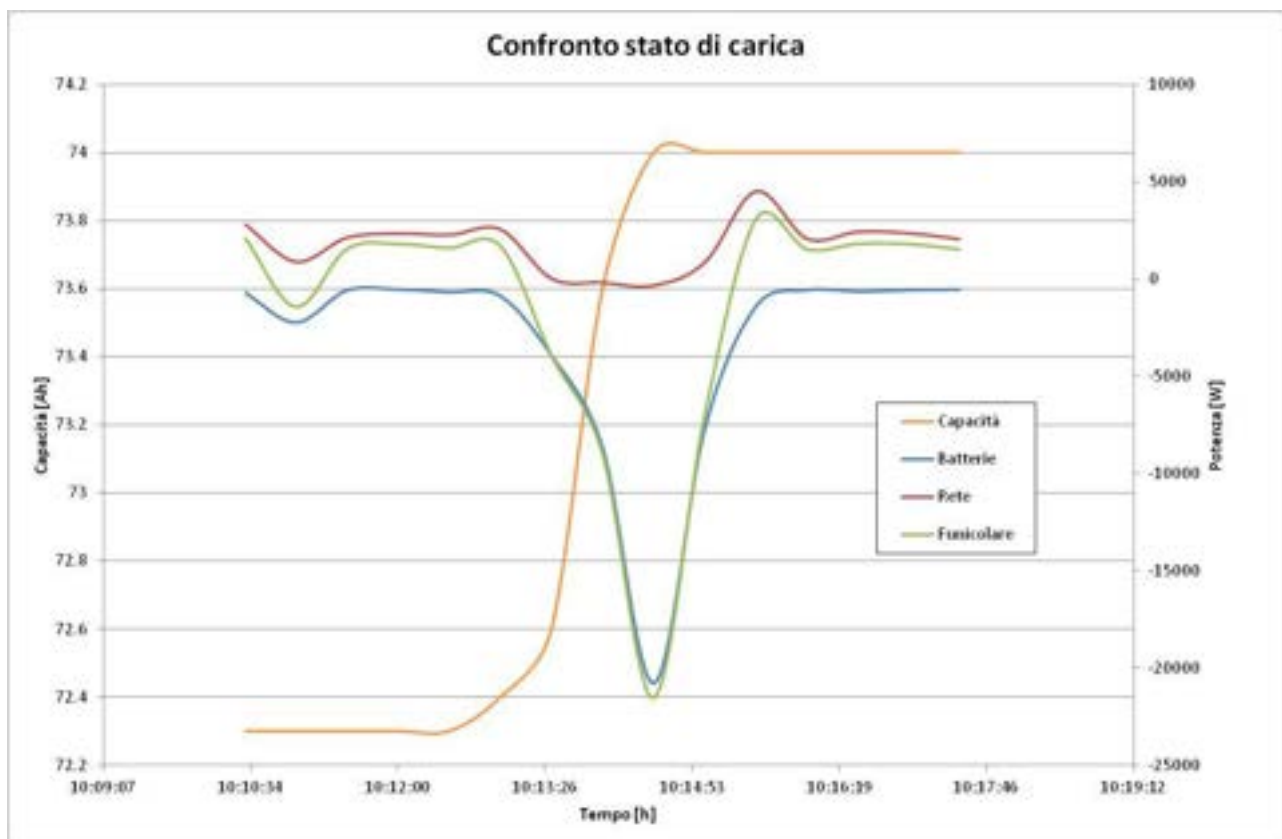
**Figura 13.** Assorbimento notturno dei servizi ausiliari sulla barra AC per una fase.

A causa delle alte temperature ambientali verificatasi nei mesi estivi, il costruttore del sistema di compensazione con accumulo ha ridotto la potenza erogabile dalle batterie per mantenere la temperatura delle stesse entro i valori di sicurezza.

Le nuove soglie, però, hanno ridotto di molto l'utilizzo dell'accumulo rispetto alle sue originali potenzialità. Infatti, dopo poche corse in cui la batteria si è scaricata a sufficienza per poter accogliere tutta l'energia della discesa della funicolare, Figura 14 e 15, si assiste alla saturazione del sistema di accumulo, con conseguente erogazione della restante energia in rete, come mostrato in Figura 16 e 17.



**Figura 14.** Diagramma delle potenze sulla barra AC per una fase nella corsa in discesa con batteria sufficientemente scarica.



**Figura 15.** Capacità della batteria durante la discesa della funicolare.

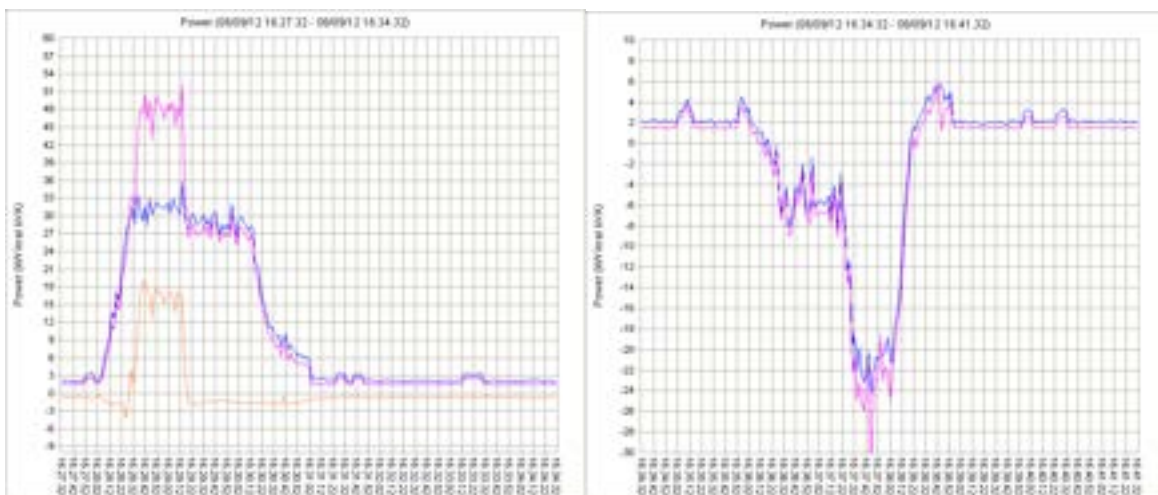


Figura 16. Diagramma delle potenze sulla barra AC per una fase nella corsa in salita e in discesa con batteria eccessivamente carica.

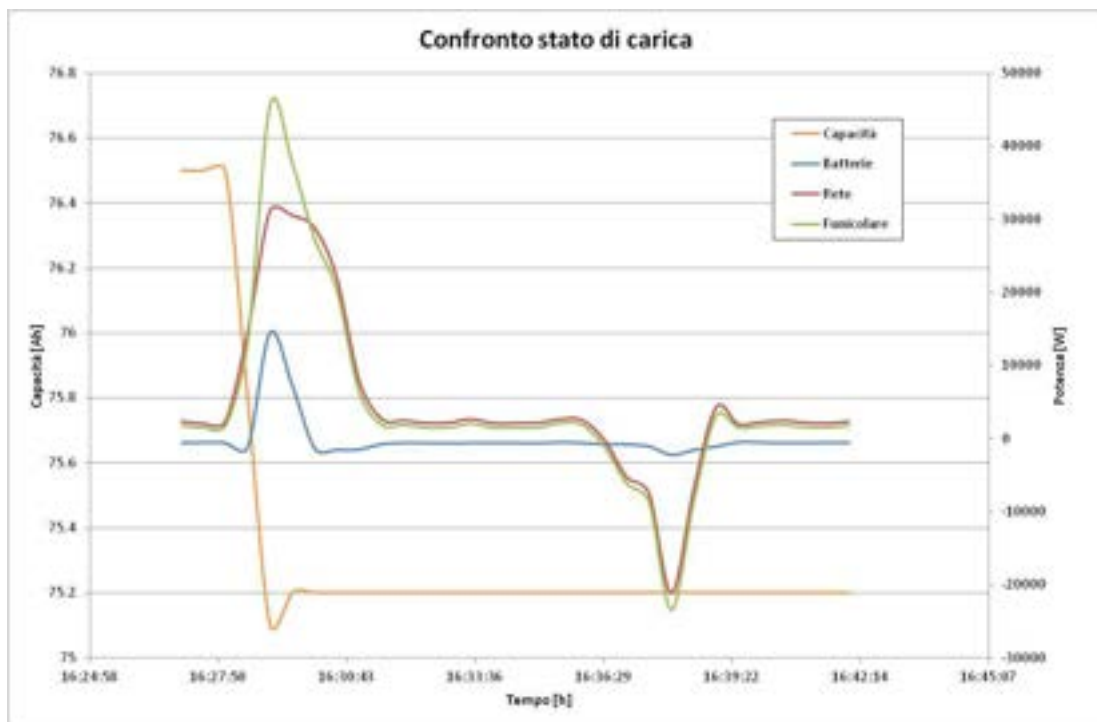
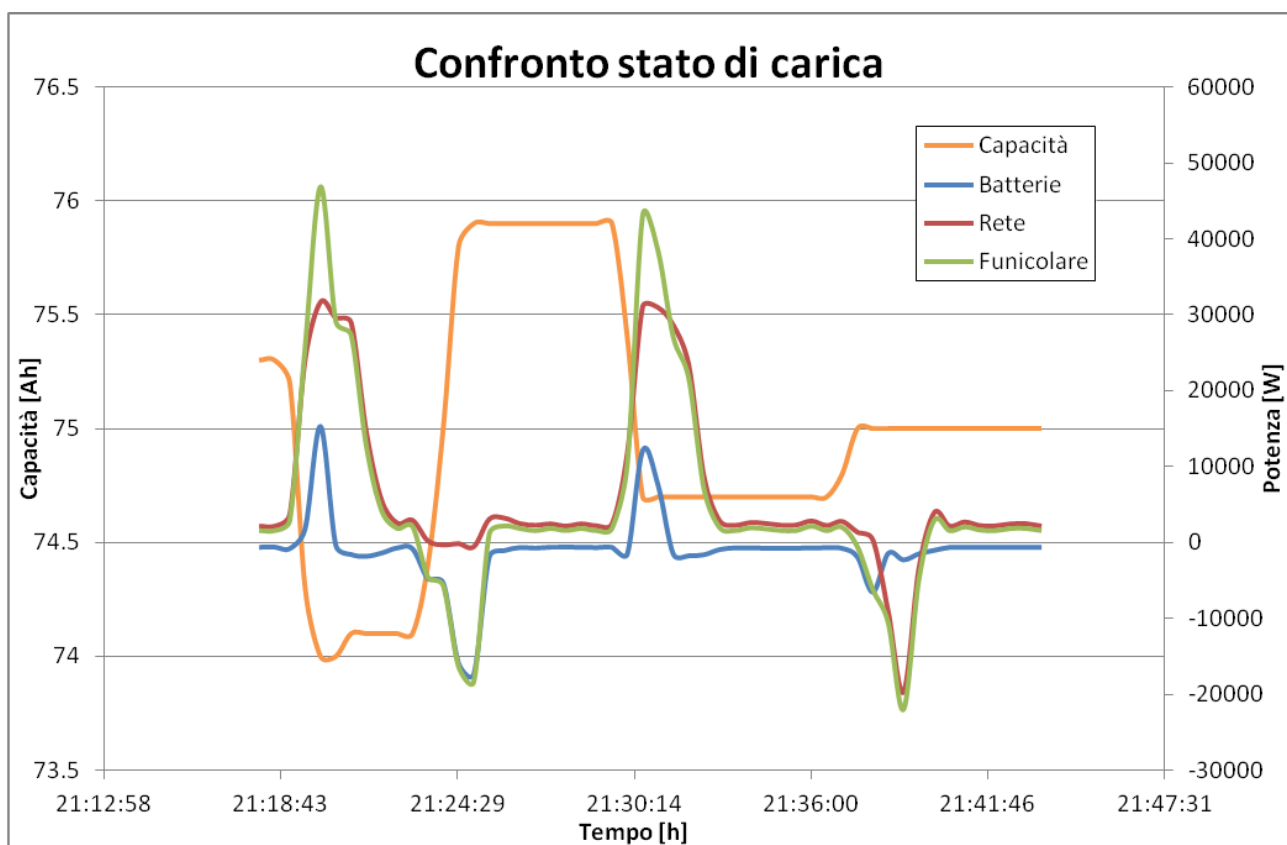


Figura 17. Capacità della batteria in condizioni di eccessiva carica durante un'intera corsa della funicolare.

Di seguito è riportato una sequenza di batteria sufficientemente scarica seguita da una situazione di batteria eccessivamente carica.



**Figura 18.** Corsa di salita e di discesa del 05/09/2012 ore 21:16 per una sola fase.



**Figura 19.** Confronto tra batteria sufficientemente scarica e batteria eccessivamente carica.

Quanto emerso dall'analisi delle registrazioni mette in evidenza la necessità di implementare un anello di controllo dello stato di carica degli accumulatori molto più lento di quelli del controllo di potenza e di corrente esistenti, poiché il definire a priori il livello di potenza a cui far intervenire il sistema di compensazione non assicura, nonostante la regolarità delle corse della funicolare, un buon funzionamento energetico dell'impianto.

## Conclusioni

E' sto preso in esame un impianto che ha caratteristiche analoghe a quello in fase di costruzione secondo le specifiche indicate nel rapporto RdS/20122/249 "Specifica tecnica della struttura funzionale e del controllo di un dispositivo con accumulo elettrochimico per i servizi di rete". Pertanto le analisi sviluppate sulla base dei rilievi sperimentali sono estendibili anche all'impianto in fase di realizzazione e ne costituiscono un'utile anticipazione del funzionamento.

Con le registrazioni effettuate è stato possibile verificare il sostanziale contributo al bilancio energetico di un impianto di trazione della presenza di un sistema di compensazione con accumulo.

La presenza dell'accumulo permette di evitare il ritorno di energia alla rete di alimentazione, fatto importante anche ai fini della sicurezza.

L'analisi delle misure ha anche evidenziato la necessità di un anello di controllo lento per la regolazione dello stato di carica dell'accumulo.

*Di seguito i curricula dei relatori*

### **Stefano Barsali**

Stefano Barsali ha conseguito laurea e dottorato di ricerca in Ingegneria Elettrica presso l'Università di Pisa nel 1994 e 1998 rispettivamente.

Dal 2000 al 2006 è stato ricercatore del settore scientifico disciplinare Sistemi Elettrici per l'Energia e dall'ottobre 2006 è professore associato nello stesso settore prestando servizio presso la facoltà di Ingegneria dove è attualmente titolare dei moduli di "Sistemi di produzione dell'energia elettrica (6CFU)" e "Dinamica e controllo dei sistemi elettrici per l'energia (6CFU)" del corso di laurea magistrale in Ingegneria Elettrica.

Dal dicembre 2012 è presidente del Consiglio di Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica.

Svolge la propria attività di ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Energia dei Sistemi del Territorio e delle Costruzioni (DESTEC) dell'Università di Pisa.

Dal 2004 al 2008 ha svolto la funzione di segretario dello Study Committee C6 CIGRÉ su "Distribution Systems and Dispersed Generation" ed è stato membro di due task force CIGRÉ.

I principali temi della ricerca svolta più di recente sono:

- Riaccensione del sistema elettrico a seguito di black-out
- Sistemi di accumulo elettrochimico ed applicazioni in veicoli a propulsione ibrida
- Generazione distribuita dell'energia elettrica e fonti rinnovabili
- Modellazione degli impianti di produzione e loro flessibilizzazione

Tale attività è stata condotta sia in collaborazione con altre Università (anche nell'ambito di progetti PRIN) e con enti esterni (ENEL, CESI, AEI, GRTN, CIGRÉ, ecc.).

Parte dell'attività sul tema della generazione distribuita è svolta all'interno del già citato comitato di studio C6 e di gruppi di lavoro CIGRÉ.

Su tali temi è autore di numerose pubblicazioni scientifiche.

### **Romano Giglioli**

Nato a San Gimignano (SI) il 02/06/1951, laureato con lode in Ingegneria Elettrotecnica nel 1976, nello stesso anno ha ricevuto il premio di Economia e Tecnica dell'Energia "G. Levi Cases".

Dal 1994 è Professore Ordinario e ricopre la cattedra di "Sistemi Elettrici per l'Energia e tecnica ed Economia dell'energia".

**Attività di ricerca.**

Nell'arco di più di trenta anni di attività nel settore della ricerca, in collaborazione con strutture di ricerca pubbliche e private, sia nazionali che internazionali, ha contribuito, con studi teorici e sperimentali, all'innovazione e allo sviluppo di sistemi e dispositivi per la produzione, trasporto ed accumulo (in particolare elettrochimico) dell'energia elettrica e dei sistemi di conversione energetica, nonché dei sistemi di trasporto con propulsione elettrica ed ibrida. L'attività è testimoniata da oltre un centinaio di pubblicazioni, dalla titolarità di alcuni brevetti utilizzati nell'ambito dei sistemi elettrici per l'energia ed in quelli di conversione energetica e dalla realizzazione di numerosi sistemi e dispositivi prototipali.

Tale attività è stata ed è sviluppata anche come responsabile di numerosi contratti di ricerca e coordinatore di gruppi di lavoro nell'ambito dei Sistemi per l'Energia e di quelli per il Trasporto.

#### **Incarichi direttivi nell'ambito dell'Amministrazione Universitaria.**

Dal 1995 al 2002 ha assunto l'incarico di Direttore del Dipartimento di Sistemi Elettrici e Automazione dell'Università di Pisa.

Dal 2005 al 2009 è stato Direttore del Master post laurea "Pianificazione e gestione di sistemi per l'energia da fonti rinnovabili", istituito dall'Università di Pisa con ENEL Produzione, CONFINDUSTRIA, Kyoto Club, Legambiente.

Dal 2006 è nel comitato direttivo del consorzio Interuniversitario CRIBE per la ricerca sulle biomasse ad uso energetico, che ha contribuito a costituire.

Dal 2007 è nel comitato direttivo del consorzio Nazionale Interuniversitario ENSIEI per la ricerca sui Sistemi per l'Energia, che ha contribuito a costituire.

Dal gennaio 2007 è membro del Consiglio di Amministrazione dell'Università di Pisa

#### **Incarichi in strutture esterne all'Università.**

Dal 2003 al 2009 è membro del Consiglio di Amministrazione della società ITALCERTIFER (del gruppo Ferrovie dello Stato), società per la ricerca nell'ambito dei sistemi di trasporto e per l'omologazione dei mezzi di trasporto ferroviario. Dal 2005 al 2008 è stato delegato italiano nel mirror europeo per le "smart grids". È coordinatore scientifico nell'ambito del Consorzio Regionale per l'energia CET, di cui è stato promotore. Dal maggio del 2007 è membro del Consiglio del CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano per la normativa elettrica). Valutatore di progetti di sviluppo precompetitivo L.n. 46/82 per conto del Ministero delle Attività Produttive e, per lo stesso Ministero, nel 2008 ha fatto parte del gruppo di esperti, con il compito di sviluppare l'analisi fattuale in ambito energia ed ambiente, per l'indirizzamento dei fondi strutturali per le regioni del mezzogiorno. Esperto per la valutazione dei progetti di Ricerca di Sistema per il Settore Elettrico per la CCSE. Esperto per la valutazione per il MIUR dei progetti PRIN e dei progetti PON.

#### **Davide Poli**

Davide Poli è nato a Volterra (PI) nel 1972.

Nel luglio '97 si è laureato con lode in Ingegneria Elettrica con una tesi dal titolo "Simulazione tecnico-economica di un parco di generazione idro-termoelettrico: Una tecnica per la messa a punto di contratti tra Utility e Produttori Indipendenti".

Dal 1998 al 2001 ha frequentato il corso di Dottorato di ricerca in Ingegneria Elettrotecnica, essendo risultato vincitore del concorso relativo al XIV ciclo; in tale ambito si è occupato a tempo pieno di sistemi elettrici liberalizzati (California, Spagna, Inghilterra, PJM, Italia) e di evoluzione della tariffazione per clienti idonei e vincolati nel nostro Paese.

Ha concluso il corso di dottorato con una tesi dal titolo: "Mercati elettrici liberalizzati - Analisi del funzionamento e tecniche di simulazione".

Nel frattempo, ha svolto per conto dell'Università di Pisa attività di supporto alla didattica, relativamente ai corsi di "Sistemi elettrici per l'energia II" e "Pianificazione ed esercizio dei sistemi elettrici per l'energia".

Nello stesso periodo, ha collaborato con il Dipartimento di Sistemi Elettrici e Automazione (DSEA) dell'Università degli Studi di Pisa e con alcune società di ingegneria di Pisa e Lucca per attività di simulazione e progettazione di impianti e reti elettriche, nonché per assistenza in materia energetica a piccole-medie imprese pubbliche e private.

Nell'agosto 2001 ha vinto il concorso per ricercatore universitario nel settore Sistemi Elettrici per l'Energia, afferendo al Dipartimento di Sistemi Elettrici e Automazione dell'Università di Pisa.

E' stato per otto anni membro della Giunta del Dipartimento di Sistemi Elettrici e Automazione.

Dal 2004 al 2010 è stato titolare degli insegnamenti di "Sistemi Elettrici per l'Energia - Mantenimento della qualità del vettore elettrico" (Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Elettrica) e di "Sicurezza e qualità dei sistemi elettrici" (Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Elettrica).

Attualmente insegna "Qualità e affidabilità dei sistemi elettrici" al primo anno del corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica.

E' responsabile scientifico di contratti di ricerca con CESI Ricerca, ENEL Ricerca, TERNA e la Società Consortile Energia Toscana, struttura che ha contribuito a costituire e a gestire; tale consorzio aggrega le principali pubbliche amministrazioni della regione Toscana per l'acquisto di energia elettrica e gas sul libero mercato, la promozione delle fonti rinnovabili e l'uso razionale dell'energia.

Le sue principali attività di ricerca sono riconducibili alle problematiche di affidabilità e sicurezza dei sistemi elettrici e a quelle di produzione, trasmissione e tariffazione dell'energia in un contesto liberalizzato, in particolare per quanto riguarda il trattamento economico e di incentivazione della generazione distribuita da fonti rinnovabili. Si occupa inoltre di mercato elettrico e del gas, nonché di valutazioni tecniche, economiche e ambientali riguardanti le diverse forme di produzione e consumo dell'energia.

Dal 2006 è presidente della sezione PI-LI-LU-GR-MS della Federazione Italiana di Elettrotecnica, Elettronica, Automazione, Informatica e Telecomunicazioni, dopo averne ricoperto per anni il ruolo di segretario.

E' autore di circa sessanta pubblicazioni, di cui oltre la metà a carattere internazionale, nell'ambito dei sistemi elettrici per l'energia.