



Ricerca di Sistema elettrico

1.

Identificazione del ciclo di potenza assorbita e dimensionamento di un sistema di accumulo per una tranvia

Massimo Ceraolo, Romano Giglioli, Giovanni Lutzemberger

IDENTIFICAZIONE DEL CICLO DI POTENZA ASSORBITA E DIMENSIONAMENTO DI UN SISTEMA DI ACCUMULO PER UNA TRANVIA

Massimo Ceraolo, Romano Giglioli, Giovanni Lutzemberger (Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni, DESTEC)

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto: A.3.2. Sistemi Avanzati di accumulo dell'energia

Obiettivo: Identificazione di cicli rappresentativi di sistemi di accumulo elettrochimico

Responsabile del Progetto: Mario Conte, ENEA



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Identificazione del ciclo di potenza assorbita e dimensionamento di un sistema di accumulo per una tranvia"

Responsabile scientifico ENEA: Manlio Pasquali

Responsabile scientifico Università di Pisa: Romano Giglioli

Un particolare ringraziamento è dovuto al Prof. Stefano Barsali, Prof. Davide Poli e al Signor Fabio Bonsignori per la loro fattiva partecipazione allo sviluppo dell'attività di ricerca.

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 RICHIAMI DEL MODELLO DI SIMULAZIONE	5
2.1.1 <i>Architettura del modello sviluppato</i>	5
2.1.2 <i>Modellazione delle sottostazioni</i>	6
2.1.3 <i>Modellazione della linea di contatto</i>	7
2.1.4 <i>Modellazione dei tram</i>	7
2.1.5 <i>Modellazione del sistema di accumulo</i>	8
2.2 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI	9
2.2.1 <i>Configurazione con accumulo al litio direttamente connesso alla rete</i>	10
2.2.2 <i>Configurazione con accumulo al litio con convertitore DC/DC</i>	12
2.2.3 <i>Strategia di controllo in frenatura</i>	13
2.3 ANALISI DEI FLUSSI ENERGETICI NEL SISTEMA DI ALIMENTAZIONE DELLA TRAMVIA	15
2.3.1 <i>Il sistema di misura</i>	15
2.3.2 <i>Misura dei flussi energetici</i>	16
2.3.3 <i>Validazione del modello di simulazione</i>	18
2.4 PROGETTAZIONE DEL SISTEMA DI ACCUMULO	19
2.4.1 <i>Progettazione dell'accumulo</i>	19
2.4.2 <i>Considerazioni economiche</i>	22
3 CONCLUSIONI.....	23
4 APPENDICE: MISURE SPERIMENTALI	24
5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	31
CURRICULA DEL GRUPPO DI LAVORO	32

Sommario

L'attività è stata orientata all'identificazione del ciclo di potenza assorbita e al dimensionamento di uno più sistemi di accumulo da installare sull'alimentazione di una tranvia per il risparmio energetico ed il servizio di "demand-response" per la rete di distribuzione in media tensione. E' stato inoltre previsto lo studio e la successiva installazione di un sistema di misura per l'individuazione degli assorbimenti energetici delle sottostazioni di alimentazione delle linee di contatto. L'attività è stata così strutturata:

- Mediante il modello di simulazione della tranvia (sviluppato nell'ambito dell'attività di Ricerca di Sistema 2012) sono state effettuate nuove simulazioni orientate all'affinamento della soluzione proposta.
- Sulla base dei risultati è stata definita una campagna di misure sperimentali da effettuare sulla rete, per validare lo strumento di simulazione. Attraverso il programma di simulazione validato, sono state stimate le sollecitazioni cui sono sottoposti i sistemi di accumulo.
- Infine si è proceduto al dimensionamento dei sistemi di accumulo e ad analisi economiche.

1 Introduzione

Nei più comuni sistemi tranviari le sottostazioni di alimentazione non sono reversibili. Per questo motivo l'energia di frenatura di un tram può essere recuperata solo quando altri tram in transito sono in grado di assorbirla, mentre ogni quota aggiuntiva viene persa.

Una interessante soluzione per incrementare in maniera significativa la quantità di energia recuperata è quella di installare, in corrispondenza di una o più sottostazioni, dei sistemi di accumulo capaci di assorbire energia durante la frenatura e restituirla nelle fasi di accelerazione.

Una valutazione della quantità di energia recuperabile richiede la messa a punto di un simulatore in grado di rappresentare la rete di alimentazione, la dinamica dei veicoli, i profili di conducente e le diverse tipologie di percorso. Lo sviluppo del simulatore è già stato descritto nel precedente report di Ricerca di Sistema 2012 [1], e basato su un caso studio reale.

Per valutare i flussi di energia effettivi sul sistema di alimentazione è stata effettuata una campagna sperimentale volta a misurare i flussi energetici, nonché gli andamenti di tensione e corrente lungo il percorso. I risultati sono stati utilizzati per validare lo strumento di simulazione nello scenario esistente, per dimensionare il sistema di accumulo in esame e per effettuare un'analisi costi/benefici al fine di valutare la convenienza economica dell'investimento.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Richiami del modello di simulazione

2.1.1 Architettura del modello sviluppato

Una tramvia è normalmente composta da diverse fermate e sottostazioni di alimentazione. Il modello realizzato deve dunque consentire la simulazione dell'esatto numero di sottostazioni e tram in transito.

Una versione semplificata della tramvia è riportata in Figura 1, contenente quattro sottostazioni e quattro tram. In corrispondenza della SSE3 è visibile anche un sistema di accumulo, attivabile o meno a seconda della configurazione considerata. Le linee di colore blu rappresentano connessioni di tipo elettrico, mentre quelle gialle rappresentano un *bus* di segnale che trasferisce informazioni dai sotto-modelli dei tram a quello della linea di contatto. In particolare, come sarà di seguito descritto, il modello della linea di contatto richiede di conoscere la posizione e la direzione di tutti i treni in transito.

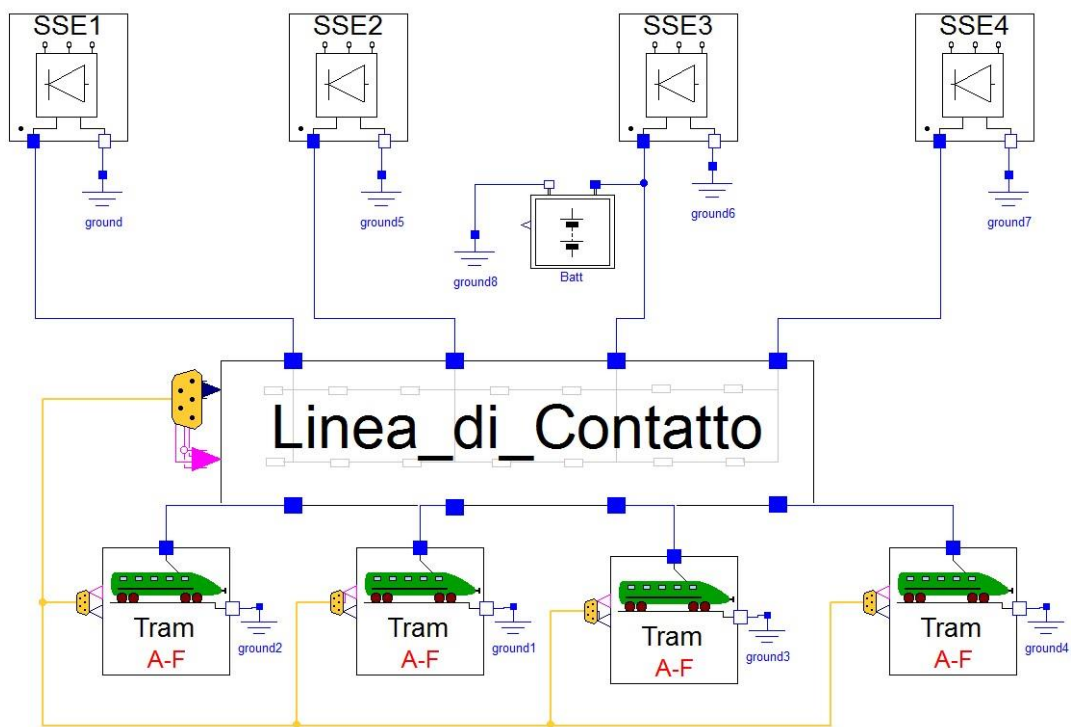


Figura 1: Schema del modello sviluppato

Da precisare che nelle simulazioni che saranno presentate in seguito verrà invece utilizzato il modello di una tramvia completa, formata da dieci sottostazioni e numero di treni in transito funzione dell'orario considerato.

2.1.2 Modellazione delle sottostazioni

Le sottostazioni di alimentazione della tramvia sono tipicamente basate su raddrizzatori a diodi. Molto comune è la configurazione in cui sono presenti due ponti a diodi trifase, alimentati da trasformatori trifase aventi diversi avvolgimenti: se i due avvolgimenti sono connessi a stella e a triangolo, e il numero di spire del secondario è opportunamente scelto, ciascuna sottostazione opera come un raddrizzatore a 12 impulsi. Poiché non è necessario per il presente studio valutare l'effetto delle armoniche essendo di interesse la sola componente DC, è stato utilizzato il noto circuito equivalente riportato in Figura 2 [1].

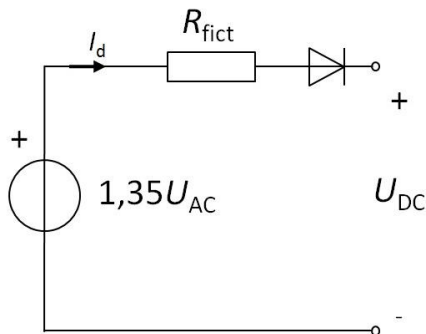


Figura 2: Circuito equivalente di sottostazione di alimentazione (SSE)

2.1.3 Modellazione della linea di contatto

Poiché durante la simulazione i tram si spostano lungo la linea, la linea di contatto è un sistema tempo-variante: la resistenza della linea tra un tram e il successivo varia infatti nel tempo. Tra l'altro, quando un treno si sposta da una sezione all'altra (ad es., quando un treno si sposta da sinistra a destra in Figura 1 e oltrepassa il punto di contatto corrispondente a SSE2, così che dal tratto SSE1-SSE2 si sposta nel tratto SSE2-SSE3), anche la topologia della linea di contatto si modifica. Questa complessità è superabile creando nuovi componenti in Modelica. Una possibile soluzione è, ad esempio, quella di rappresentare la linea di contatto secondo il circuito di Figura 3, che per semplicità illustra una sola direzione di marcia della linea e non necessita di gestire la scelta tra le due disponibili.

Il modello di linea di contatto utilizzato sfrutta le informazioni di posizione ricevute dai tram (*input* alla sinistra del sistema in Figura 3) per calcolare il valore delle resistenze variabili mostrate e per comandare l'interruttore SW. Quest'ultimo è un componente sviluppato in Modelica che, in funzione del valore della variabile intera in ingresso *z*, attiva una connessione elettrica tra il pin denominato *tram* e la posizione del tram lungo la linea: ad esempio, se il tram si trova nel tratto tra SSE1 e SSE2, il collegamento attivo sarà quello che connette SW con il punto intermedio tra R_{1c} e R_{2c} .

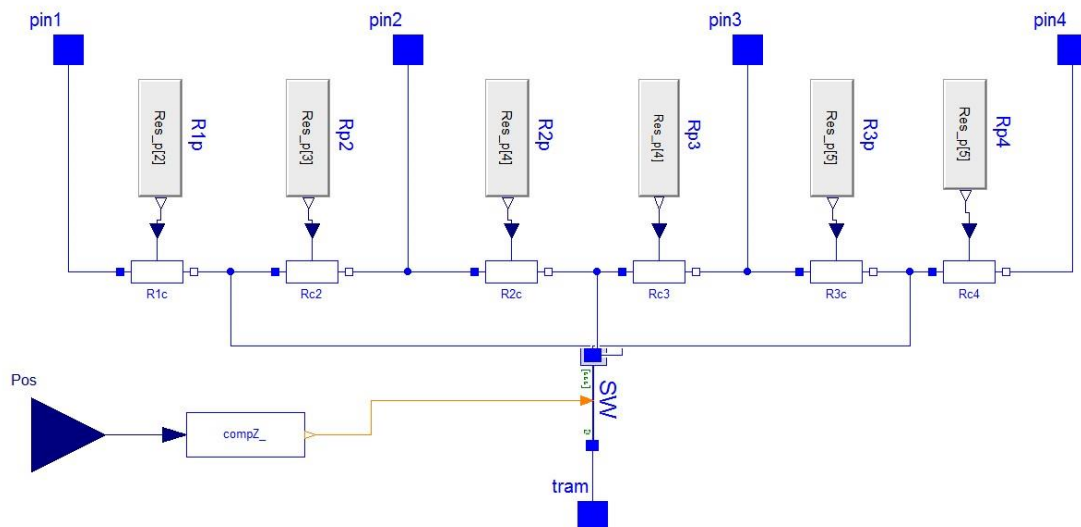


Figura 3: Circuito equivalente della linea di contatto

2.1.4 Modellazione dei tram

La modellazione del tram richiede di modellare il sistema di trazione, le azioni resistenti al moto e il comportamento del conducente. Il modello è stato definito in accordo allo schema di Figura 4, attraverso i componenti standard della MSL. I principali blocchi sono qui di seguito descritti.

- L'azionamento elettrico è simulato algebricamente: si tratta cioè di un sistema capace di generare la forza di trazione richiesta dal conducente, considerandone però le perdite, mediante un modello che le stima funzione della velocità di rotazione e della forza stessa. Il blocco *forza* converte quindi la richiesta di forza in una forza "fisica", mentre il blocco *efficienza* calcola le perdite dell'azionamento.
- Il blocco *massa* implementa la massa del tram, considerando la massa vera e propria (a pieno carico) più la massa inerziale equivalente dovuta alle parti rotanti;

Il blocco *sfioratore* rappresenta infine la logica di gestione della frenatura: quando la massa decelera, la potenza misurata dal blocco *mP* diventa negativa. In questo modo il blocco *sfioratore* riceve una potenza negativa, da cui vengono sottratte le perdite. Questa potenza diviene una potenza positiva convogliata sulla linea, finché la tensione misurata dal blocco *Vm* rimane nei limiti (la tensione nominale di linea è pari a 750 V, mentre quella massima consentita uguale a 900 V). In caso la tensione di linea tenda a superare il

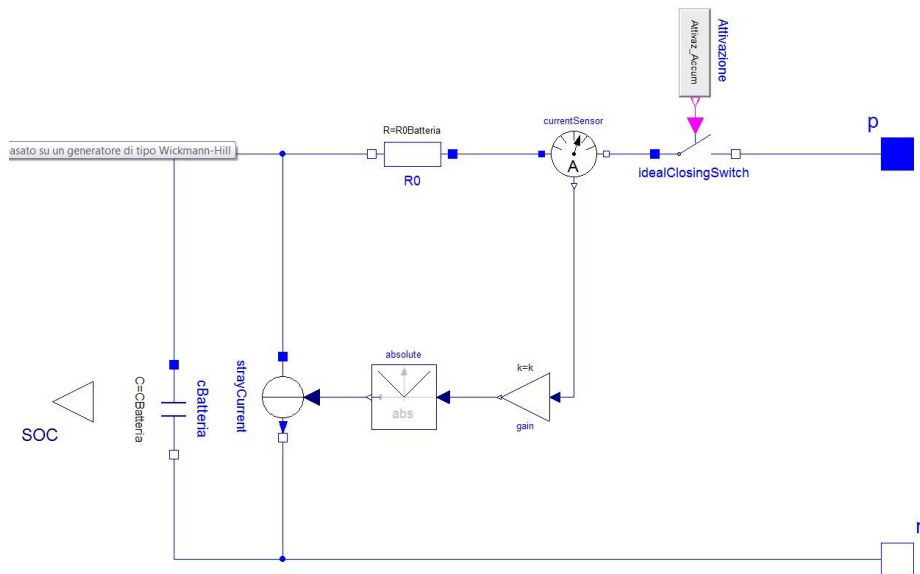


Figura 5: Modello del sistema di accumulo

2.2 Risultati delle simulazioni

Il caso studio in esame è riferito a una tramvia collocata a Bergamo. La lunghezza totale della linea è approssimativamente di 12 km, ed è composta da 10 sottostazioni (SSE), come visibile in Figura 6.

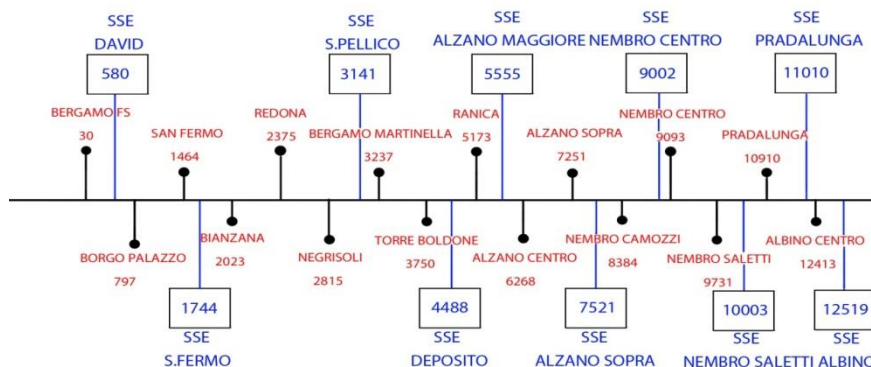


Figura 6: Schema della linea

Il numero di tram è variabile rispetto all'ora considerata, che può essere di punta (10 tram in transito), di morbida (5 tram), festiva (3 tram). La pendenza del percorso è stata inserita nelle simulazioni, ma non ha grande impatto sui risultati. Le simulazioni sono state ripetute considerando il mix annuale di giornate scolastiche, non scolastiche e festive, ciascuna caratterizzata da una diversa combinazione di ore. I risultati, già parzialmente presentati in [1], sono relativi ai flussi di energia erogata dalle SSE lungo il percorso, da e verso i tram, da e verso i sistemi di accumulo. Il risparmio è stato ricavato confrontando l'energia erogata dalle SSE nel caso considerato con quella di un caso di riferimento.

Rispetto a quanto già mostrato, principalmente rivolto all'analisi del caso a singolo accumulo direttamente connesso alla rete, le simulazioni sono state ripetute al fine di affinarne i risultati, in particolare:

- Verificare l'effetto del risparmio di energia legato all'installazione di più sistemi di accumulo in corrispondenza delle SSE.
- Analizzare l'effetto della presenza del convertitore DC/DC sui risparmi conseguiti.
- Valutare l'effetto della strategia di controllo del recupero dell'energia in frenatura sui risparmi conseguiti.

I diversi punti qui menzionati saranno presentati nei paragrafi successivi.

2.2.1 Configurazione con accumulo al litio direttamente connesso alla rete

Se nessun sistema di accumulo è installato lungo la linea di alimentazione, un tram può effettivamente recuperare l'energia di frenatura solo quando sono presenti altri tram nelle sue vicinanze in grado di assorbirla. Appare dunque lecito aspettarsi che quando sono installati lungo la linea uno o più sistemi di accumulo, il recupero energetico in frenatura sia incrementato. L'accumulo infatti, anche in assenza di richiesta di potenza degli altri tram sulla rete, può immagazzinare suddetta energia per rilasciarla successivamente, quando le richieste da parte del carico aumentano. Diverse sono le tipologie di accumulo che possono essere considerate:

- sistemi basati su supercondensatori interfacciati con la rete attraverso convertitori DC/DC;
- sistemi basati su batterie al litio ad alta potenza interfacciati alla rete attraverso convertitori DC/DC;
- sistemi basati su batterie al litio ad alta potenza direttamente connessi alla rete.

Poiché i tempi di arresto sono nell'ordine dei 10-20 secondi, la soluzione più frequentemente conosciuta si basa sull'utilizzo di supercondensatori, che richiedono tra l'altro in via obbligatoria la presenza di un convertitore DC/DC a causa delle notevoli variazioni di tensione in un ciclo completo di carica/scarica.

Tuttavia negli ultimi anni le batterie al litio ad alta potenza sono diventate sempre più idonee all'utilizzo in applicazioni orientate alle alte potenze, e appaiono dunque una soluzione di grande interesse. La prima investigazione si è orientata alla soluzione più semplice, in cui l'accumulo è direttamente connesso alla rete. Il numero di celle deve essere scelto in maniera tale che quando la linea di contatto è al valore di tensione nominale lo stato di carica si posiziona su un livello intermedio. La batteria scelta è riportata in Tabella 1.

Tabella 1: Principali caratteristiche della batteria (collegamento diretto)

Numero di celle	220
Tensione nominale di cella (V)	3.7
Tensione nominale (V)	814
Capacità nominale (Ah)	100
Corrente massima (A/Ah)	10
Energia nominale (kWh)	81.4

Dai risultati delle simulazioni si evince che il picco di corrente ottenuto nel caso peggiore, corrispondente alla configurazione di punta (10 tram) con un singolo sistema di accumulo installato, sono quelli mostrati in ed appaiono compatibili con le caratteristiche della cella. Lo stato di carica rimane stabile attorno al 55%, con oscillazioni durante i profili di carica-scarica attorno al 4% nel caso di punta, del 1-2% nel caso di morbida o festivo.

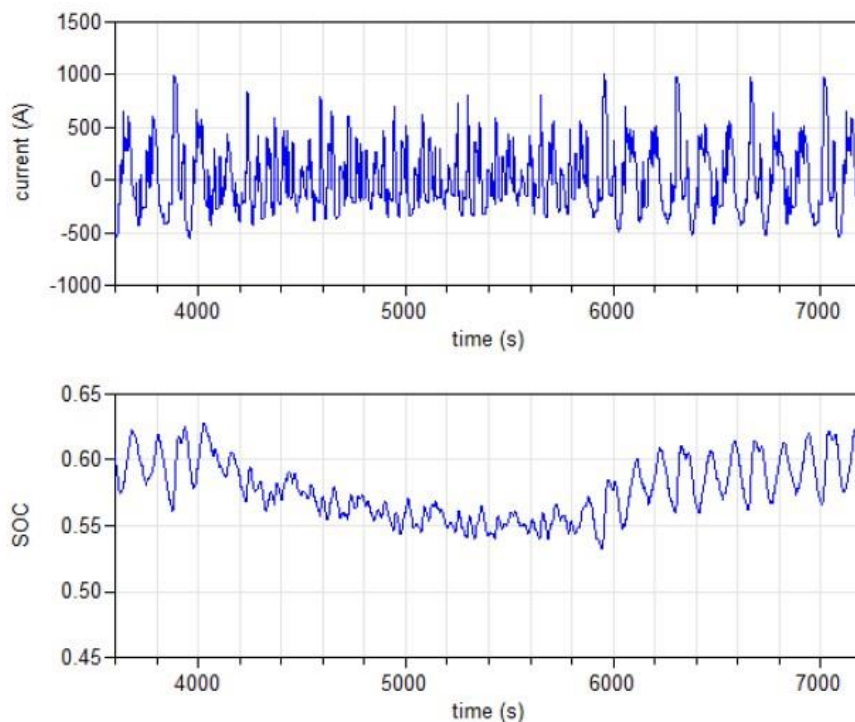


Figura 7: Corrente di batteria (a) e SOC (b) in corrispondenza di un'ora di punta

I risparmi sull'energia erogata dalle SSE sono stati valutati in diverse condizioni, di seguito elencate:

- I tram dissipano tutta l'energia di frenatura sui resistori di bordo (A).
- I tram mandano l'energia di frenatura sulla linea, finché quest'ultima non raggiunge il valore massimo di 900 V (B).
- Come per il caso B, ma con l'aggiunta di n dispositivi di accumulo dalle caratteristiche prima menzionate, installati in corrispondenza delle SSE (C- n).

I risultati sono riportati in Tabella 2, mentre la mostra il trend dell'energia risparmiata rispetto al numero di accumuli.

Tabella 2: Energia erogata SSE in funzione del numero di accumuli installato

Caso	Energia totale erogata SSE (MWh/y)	Risparmio energetico (MWh/y)
A	3100	-
B	2869	0
C-1	2612	257
C-2	2397	472
C-3	2049	820
C-4	1820	1049
C-5	1769	1100
C-10	1641	1228

Come si può osservare, il risparmio energetico cresce spostandosi dalla configurazione ad accumulo singolo fino a quella dotata di quattro accumuli. Al contrario, per un numero di accumuli più elevato, il livello del risparmio energetico tende a saturare verso un limite superiore.

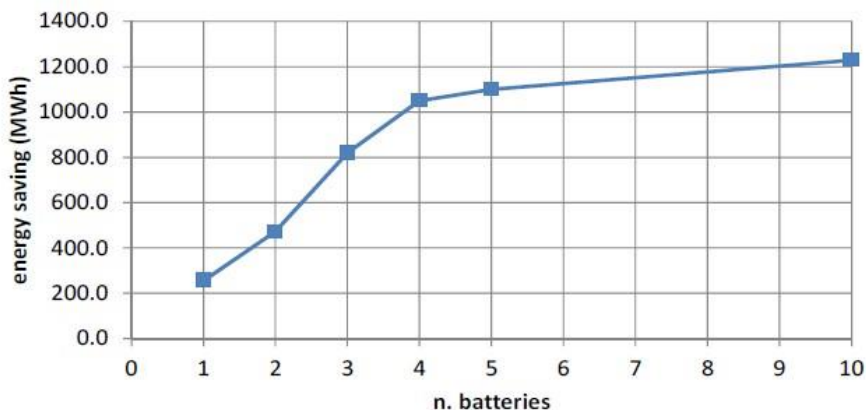


Figura 8: Risparmio energetico in funzione del numero di accumuli installati

2.2.2 Configurazione con accumulo al litio con convertitore DC/DC

Sebbene la presenza di un componente addizionale possa risultare poco vantaggiosa in termini di spazio occupato e complessità per l'intero sistema, l'introduzione del DC/DC garantisce in primo luogo di mantenere lo stato di carica dell'accumulo a un dato valore di riferimento. In più garantisce molta più flessibilità nel dimensionamento dell'accumulo stesso, essendo la tensione di batteria non direttamente vincolata alla tensione operativa della linea. Infine la corrente di batteria può essere limitata a un valore di sicurezza. Questi aspetti contribuiscono a incrementare la durata dell'accumulo, ed è per questi motivi che la presenza del DC/DC è piuttosto raccomandabile. Il sistema di accumulo si modifica come riportato nella successiva Tabella 3. Si nota chiaramente come la soluzione precedente basata su celle NMC espressamente dedicate ad applicazioni ad alta potenza e sottoposte a stress prossimi alle massime prestazioni dichiarate dal costruttore, possono essere sostituite con una tecnologia più affidabile ed economicamente vantaggiosa.

Tabella 3: Principali caratteristiche della batteria (collegamento mediante DC/DC)

Numero di celle	190
Tensione nominale di cella (V)	3.2
Tensione nominale (V)	608
Capacità nominale (Ah)	160
Corrente massima (A/Ah)	6
Energia nominale (kWh)	97.3

D'altra parte, la presenza del DC/DC implica una riduzione in termini di risparmio di energia erogata dalle SSE, per via delle perdite. La Figura 9 mostra la regolazione di tensione effettuata dal convertitore, mentre le differenze in termini di energia erogata dalle SSE sono mostrate in Tabella 4.

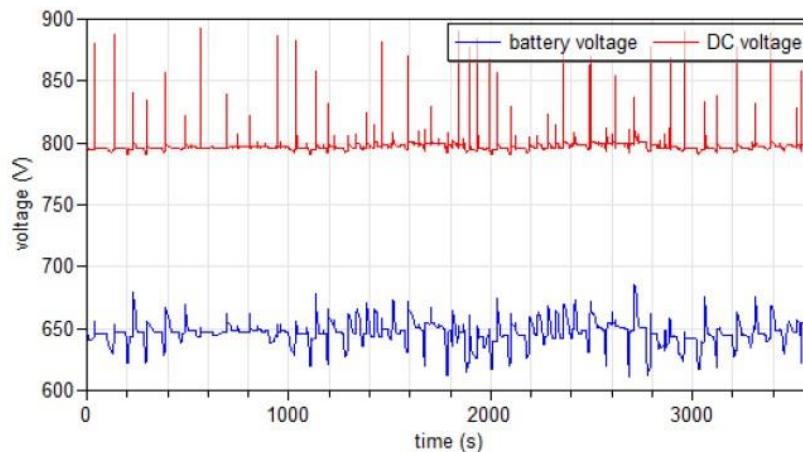


Figura 9: Tensione input/output per il DC/DC Converter

Si consideri ad esempio la configurazione basata su tre accumuli. A questo proposito, la riduzione in termini di risparmio energetico per la presenza del DC/DC oscilla nel range 2-8%, a seconda che il DC/DC non operi o meno una limitazione sulla corrente della batteria. Nel caso in esame, la riduzione corrispondente all'8% si riferisce a una limitazione di corrente pari a 800 A, corrispondente a 5C per la batteria in esame.

Tabella 4: Energia risparmiata nel caso di DC/DC Converter

Caso	Energia risparmiata (MWh/y)
A	-
B	0
C-3	819.5
C-3 DC/DC	803.1
C-3 DC/DC Limit	753.9

2.2.3 Strategia di controllo in frenatura

L'azione di recupero dell'energia in frenatura, come già riportato in [1], può essere effettuata in due modalità:

- Senza alcun tipo di modulazione della potenza frenante immessa sulla catenaria. In questo modo, la tensione raggiunge immediatamente il massimo limite ammesso, e il recupero dell'energia interrotto. La potenza frenante è dunque interamente dissipata sui resistori a bordo treno.
- Modulando la potenza frenante immessa sulla linea, al fine di non raggiungere istantaneamente la massima tensione ammessa. Questo garantisce un più esteso recupero dell'energia.

Le due strategie descritte implicano differenti livelli di energia erogata dalle SSE, che può essere significativamente ridotta nel caso della strategia di recupero modulato (*advanced*) rispetto a quello convenzionale (*baseline*). La Figura 10 mostra l'andamento della tensione per le due strategie in esame. E' possibile osservare come il taglio istantaneo nel caso della strategia di base di fatto impedisca di trasmettere energia in linea.

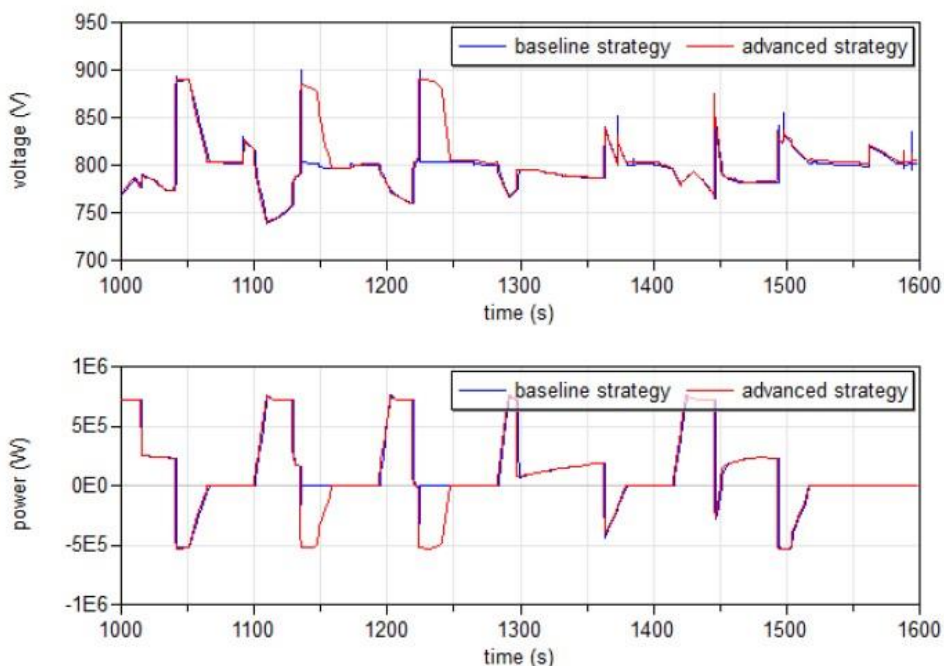


Figura 10: Tensione e potenza in un intervallo per differenti strategie di controllo

I risultati sono riportati per tre situazioni di riferimento:

- Nessun recupero dell’energia di frenatura (A).
- Recupero dell’energia in assenza di sistemi di accumulo (B).
- Recupero dell’energia con l’aggiunta di un sistema di accumulo (C-1).

Chiaramente, per i casi B e C-1 la distinzione è stata effettuata tra recupero di tipo base (*baseline*) e di tipo modulato (*advanced*).

Tabella 5: Energia erogata dalle SSE per differenti strategie di gestione dell’energia di frenatura

Caso	Energia erogata SSE (MWh/y)	
	strategia baseline	strategia advanced
A	3100	3100
B	2869	2497
C-1	2612	2143

I risultati mostrano una riduzione in termini di energia erogata dalle SSE nel range 13-18%, a seconda del caso considerato.

2.3 Analisi dei flussi energetici nel sistema di alimentazione della tramvia

2.3.1 Il sistema di misura

Il sistema di misura installato lungo il percorso si caratterizza per l'utilizzo di diversi strumenti, come meglio specificato di seguito. Tutte le sottostazioni sono normalmente equipaggiate con un contatore, al fine di valutare i consumi energetici in media tensione MT (15 kV). In aggiunta è stato installato un secondo contatore, per misurare i consumi energetici dei dispositivi ausiliari di stazione in bassa tensione BT. Questi ultimi includono lampade, segnali visivi e acustici installati nella SSE in esame e nella più vicina stazione. In un numero più ristretto di SSE è stato installato anche un data logger per la misura di tensione e corrente. Tutti gli strumenti sono stati sincronizzati, al fine di evitare disallineamenti tra le registrazioni effettuate. Il posizionamento degli strumenti all'interno di una singola sottostazione (SSE) è mostrato schematicamente in Figura 11, mentre la Figura 12 mostra alcune immagini relative agli strumenti installati.

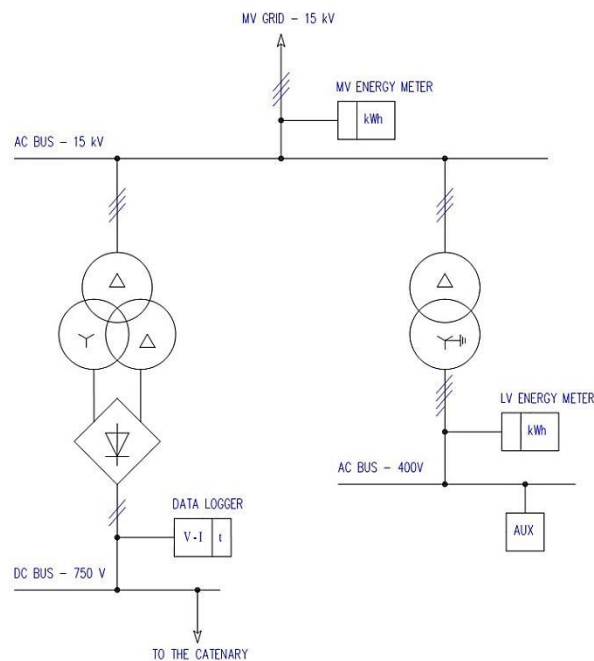


Figura 11: Posizionamento degli strumenti in una singola sottostazione

A partire dalle misure effettuate è stata effettuata una valutazione delle perdite energetiche di ciascuna sottostazione e dell'energia richiesta dai tram durante diverse condizioni operative (ore di punta, ore di basso carico e giorni festivi). In particolare, dalle tre sottostazioni completamente strumentate sono stati estrapolati trend anche per le altre SSE e confrontati con le misure disponibili, in particolare quelle in bassa e media tensione rilevate dai contatori. A corredo delle informazioni disponibili sono stati utilizzati anche i consumi in media tensione MT degli ultimi tre anni forniti dall'operatore della linea.



Figura 12: Strumenti installati. In alto a sinistra, porzione di linea; in alto a destra, contatore energia servizi ausiliari BT; in basso a sinistra, quadro servizi ausiliari BT; in basso a destra, data logger all'interno del quadro DC

2.3.2 Misura dei flussi energetici

Le misure hanno avuto l'obiettivo di analizzare i flussi energetici lungo il percorso, dalla linea in media tensione MT fino alla catenaria. Principale obiettivo è stato quello di separare i diversi contributi, come le perdite dei dispositivi installati in corrispondenza di ogni sottostazione (es. trasformatori e convertitore), l'energia richiesta dai tram per la propulsione e per l'alimentazione dei carichi ausiliari, l'energia richiesta per alimentare gli ausiliari di stazione in bassa tensione. Più in dettaglio, le seguenti considerazioni sono di seguito riassunte:

- La differenza tra misure in media e bassa tensione dà una indicazione dell'energia direttamente fornita alla catenaria e delle perdite dell'intero sistema, ovvero le perdite a vuoto dei trasformatori, le perdite sugli avvolgimenti e quelle sul convertitore. Nelle sottostazioni dotate di data-logger, è stato possibile separare ulteriormente il contributo delle perdite dall'energia fornita al carico (trazione e ausiliari di bordo).
- Le perdite a vuoto sui trasformatori sono state stimate dalle misure fornite dai contatori in MT durante le ore notturne. Infatti, relativamente al ramo di alimentazione della catenaria, quando nessun tram è in marcia le perdite sugli avvolgimenti e sul convertitore possono essere trascurate. D'altra parte, per il

ramo che alimenta i carichi in bassa tensione, le perdite sugli avvolgimenti possono essere sottratte da una stima preliminare, visto il loro ridotto contributo.

- Le perdite a pieno carico, che includono perdite a vuoto, sugli avvolgimenti e sui convertitori possono essere misurate durante il giorno, con tutti i treni in marcia. Comunque, i contributi aggiuntivi dovuti alla presenza del carico (perdite sugli avvolgimenti e sul convertitore) presentano una influenza limitata, essendo la durata del ciclo operativo all'interno di ciascuna sottostazione ridotta a pochi secondi. Dai dati nominali e dalle misure di corrente, è stata stimata una percentuale attorno al 5% dell'energia totale in MT.

I valori ottenuti per tre sottostazioni sono mostrati in Tabella 6. Ad esempio per un giorno lavorativo scolastico le perdite sono approssimativamente attorno al 20% dell'energia giornalmente consumata in MT, mentre una percentuale nell'intervallo 11-22% riguarda gli assorbimenti ausiliari. La differenza è spiegabile considerando che questa quota di assorbimento è circa costante, e dunque ha un'incidenza diversa nel consumo energetico giornaliero di ciascuna SSE. In maniera analoga, anche i giorni non scolastici e i giorni festivi vengono mostrati, mescolando diverse combinazioni di ore tipo (es. ore di punta, ore di basso carico, ore festive). I risultati sono certamente influenzati anche dalla stagione, per via dei differenti assorbimenti ausiliari a bordo. I risultati presentati sono in particolare riferiti ad un periodo primaverile, in cui è da ritenersi trascurabile sia il contributo del riscaldamento che del sistema di condizionamento.

Tabella 6: Flussi energetici per tre SSE

SSE	Energia giornaliera MT (kWh)	Energia ausiliari BT (%) ¹	Perdite SSE (%) ¹	Energia di trazione (%) ¹
<i>giorno scolastico</i>				
San Fermo	1231	16.3	18.4	65.3
Alzano	882	22.3	22.4	55.3
Albino	1167	10.8	18.5	70.7
<i>giorno non scolastico</i>				
San Fermo	1097	18.3	20.1	61.6
Alzano	636	25.9	24.1	50.0
Albino	966	13.0	21.4	65.6
<i>giorno festivo</i>				
San Fermo	787	25.5	26.0	48.5
Alzano	614	32.0	30.0	38.0
Albino	689	18.2	27.9	53.8

¹ percentuale relative alla corrispondente energia giornaliera in MT.

Da questi risultati il bilancio energetico è stato successivamente ricavato anche per tutte le altre SSE. Ad esempio, la distribuzione dell'energia giornaliera totale in un giorno scolastico si colloca attorno al 65% per la parte dovuta alla trazione, il 20% è dovuto alle perdite e il 15% agli ausiliari in BT.

2.3.3 Validazione del modello di simulazione

Uno degli aspetti più critici riguarda la messa a punto del modello equivalente di SSE. Come già precedentemente descritto e maggiormente dettagliato in [1], le SSE sono rappresentate mediante circuiti disaccoppiati equivalenti in DC, caratterizzati dalla seguente equazione:

$$V(t) = E_0(t) + R(t)I(t) \tag{1}$$

nel quale R simula le cadute di tensione sui diodi. In sintesi, il modello richiede di conoscere i valori di tensione a vuoto e i valori delle resistenze. Le prime possono essere ottenute dai data logger, quando nessun tram è in marcia. D'altra parte, i valori delle resistenze possono essere valutate dalle misure di tensione e corrente effettuate durante il giorno. E' stato in particolare osservato che:

- I valori delle resistenze sono stati calcolati misurando tensione e corrente durante profili tipici di impiego. La variazione in termini di tensione/corrente dipende dalle diverse condizioni di carico (es. tram in accelerazione o in frenatura). Come visibile in Figura 13 per una accelerazione tipica della durata di circa 30 secondi, è possibile tracciare una linea retta, che mostra come i valori delle resistenze possono essere assunti costanti nel tempo.
- Anche la variazione di tensione a vuoto E_0 durante il giorno, a causa della variazione degli altri carichi connessi alla rete MT, dovrebbe essere tenuta in considerazione. Tuttavia, come osservato dalle misure, questa variazione può essere trascurabile: a questo proposito, valori costanti nel tempo sono stati assunti.
- La decisione di considerare i sotto-modelli di sottostazione del tutto indipendenti l'uno dall'altro dipende dal fatto che l'accoppiamento ad alta tensione con la rete AT e i trasformatori AT/MT avrebbe ridotta influenza sulle variazioni di tensione dei sotto-modelli equivalenti di SSE.

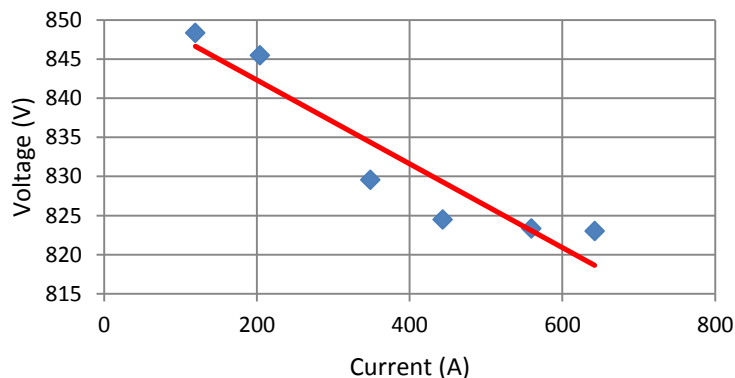


Figura 13: Tensione e corrente misurate per una tipica fase di accelerazione, SSE Alzano

I parametri sono stati valutati per tutte le SSE: in Tabella 7 sono in particolare riportati i parametri di tre sottostazioni. Come visibile, i parametri differiscono gli uni dagli altri. Va comunque anche considerato, dall'analisi riportata nel precedente report [1], che essi differiscono significativamente dai valori nominali di progetto (i.e. 796 V e 0.0125 Ω), assunti costanti per tutte le SSE. Questo aspetto ha confermato la necessità di effettuare una adeguata campagna di misure e una conseguente validazione del modello, essendo tale differenza in grado di influenzare il bilanciamento dei flussi energetici della tramvia.

Tabella 7: Parametri per tre SSE

SSE	E_0 (V)	R_{eq} (Ω)
San Fermo	871	0.084
Alzano	867	0.098
Albino	866	0.082

La validazione del modello è stata effettuata prendendo a riferimento un tipico giorno di utilizzo. A questo riguardo è stato scelto un giorno lavorativo non scolastico, composto da 17 ore di morbida. L'energia richiesta dai tram è stata valutata dalle misure in MT ridotte dalle perdite e dall'alimentazione dei carichi in BT. Va comunque precisato che i valori indicati includono i servizi ausiliari a bordo tram, come il riscaldamento e la climatizzazione. In Tabella 8 si riporta l'energia erogata dalle SSE misurata e simulata.

Tabella 8: Energia erogata dalle SSE, misurata e simulata

SSE	Energia misurata (kWh)	Energia simulata (kWh)	SSE	Energia misurata (kWh)	Energia simulata (kWh)
David	1126.7	1121.5	S. Fermo	954.7	999.2
S. Pellico	298.4	362.2	Deposito	1753.6	1752.5
Alzano M.	496.6	407.5	Alzano S.	661.6	553.9
Nembro C.	389.4	383.0	Nembro S.	345.7	441.1
Pradalungo	412.7	447.2	Albino	877.1	801.8
Totale	7316.4	7270.0			

I parametri del modello utilizzati per la validazione sono stati infine scelti attraverso i seguenti criteri:

- I valori di tensione a vuoto e resistenza, sulla base dei criteri precedentemente menzionati, sono stati aumentati. Le differenze tra SSE è nel range ± 5 V e ± 0.005 Ω .
- La strategia di recupero dell'energia di frenatura è stata adeguata sulla base delle acquisizioni del data logger. In particolare, il limite di tensione oltre il quale l'energia viene dissipata sui resistori è stato innalzato a 960 V, rispetto ai 900 V di progetto.
- Il consumo degli ausiliari è stato fissato a 2 kW, per via del ridotto assorbimento di riscaldamento e condizionamento durante le prove sperimentali.
- Il profilo di velocità è stato aggiornato, visto che in larga parte del percorso l'effettiva massima velocità misurata di 50 km/h è più bassa del valore fornito dall'operatore, rispettivamente pari a 70 km/h.

Come visibile sempre da Tabella 8 la differenza tra valore sperimentale e simulato, relativamente al totale dell'energia erogata, è al di sotto dell'1%. Stesso approccio è stato seguito per valutare i consumi energetici delle diverse SSE sia per i giorni scolastici che per quelli festivi. In sintesi, i consumi energetici annui sono stati valutati attraverso il mix di giornate caratteristiche fornite dall'operatore tramviario. Il risultato è mostrato in Tabella 10, indicato come scenario Base.

2.4 Progettazione del sistema di accumulo

2.4.1 Progettazione dell'accumulo

Come già precisato, la soluzione al litio può essere utilizzata con o senza interposizione del convertitore DC/DC. Sebbene la presenza di un componente addizionale può risultare poco vantaggiosa in termini di spazio occupato e complessità per l'intero sistema, l'introduzione del DC/DC garantisce in primo luogo di mantenere lo stato di carica dell'accumulo a un dato riferimento. In più, garantisce molta più flessibilità nel dimensionamento dell'accumulo stesso, essendo la tensione di batteria non direttamente vincolata alla

tensione operative della linea. In conclusione, la corrente di batteria può così essere limitata a un valore di sicurezza. Lo schema ipotizzato è mostrato in Figura 14.

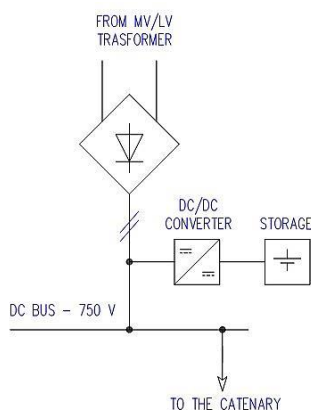


Figura 14: Schema di installazione dell’accumulo in una SSE, da una estensione dello schema di Figura 11

Il dimensionamento è stato effettuato in riferimento alla massima potenza ottenibile, al fine di consentire il recupero del maggior quantitativo possibile di energia di frenatura. A questo proposito, le celle al litio selezionate sono state valutate proprio in funzione della massima corrente di carica e scarica ammesse. I parametri dell’accumulo selezionato sono riportati in Tabella 9. Come osservabile, la configurazione prevista non è variata rispetto a quella definita nella fase di simulazione del modello non validato (Tabella 3).

Tabella 9: Parametri dell’accumulo

Numero di celle	190
Tensione nominale di cella (V)	3.2
Tensione nominale (V)	608
Capacità nominale (Ah)	160
Corrente massima (A/Ah)	6
Energia nominale (kWh)	97.3

I risultati delle simulazioni sono riportati nella figura seguente. In particolare, sono riportati gli stress di sollecitazione per la configurazione con tre accumuli installati. I tre scenari sono riferiti alla condizione più frequente nell’ambito della giornata lavorativa scolastica e non, ovvero all’ora di morbida.

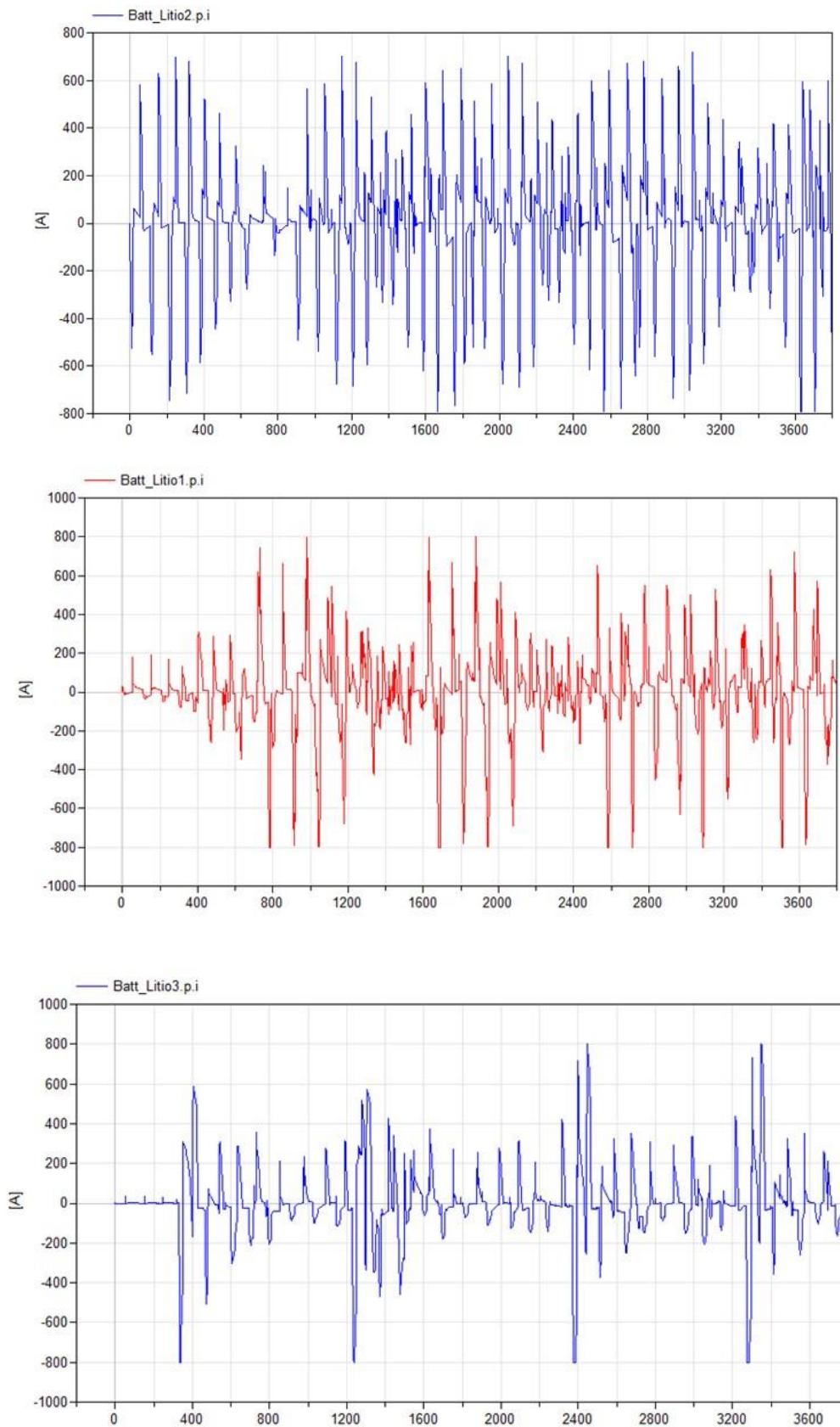


Figura 15: Profili di corrente per l'accumulo, ora di morbida. Dall'alto: SSE S. Fermo, SSE Alzano M., SSE Albino

In aggiunta sono state effettuate anche alcune considerazioni sulla vita della cella. Dai risultati delle simulazioni lo stato di carica rimane piuttosto stabile, con una oscillazione massima in termini di SOC attorno al 4% (v. paragrafo precedente). Pur in assenza di evidenze in letteratura, esperienze effettuate in [2] e alcuni dati del costruttore disponibili [3] hanno mostrato che la vita della batteria sottoposta a questo tipo di utilizzo può raggiungere il milione di cicli, consentendo così alla batteria di raggiungere la vita utile dell'impianto, stimata in 15-20 anni.

I risparmi di energia erogata dalle SSE sono infine mostrati in Tabella 10 e riferiti allo scenario Base, nel quale i tram inviano l'energia di frenatura lungo la catenaria finché la tensione massima non raggiunge il valore di 960 V. In particolare, sono state analizzate le configurazioni dotate di uno o tre accumuli, installati in corrispondenza delle SSE situate lungo il percorso. Il numero massimo di accumuli da considerare è stato posto pari a 3 in funzione del trend riportato al paragrafo precedente, che mostra come il risparmio di energia sale passando da 1 a 3 accumuli, mentre per un numero di accumuli più elevato il livello di energia tende a saturare verso un limite superiore.

Tabella 10: energia totale erogata dalle SSE per diverse configurazioni dell'accumulo

Caso studio	Energia totale SSE (MWh/y)	Risparmio energetico (MWh/y)
Base	2994	-
1-Storage	2787	207
3-Storage	2250	744

Questi risultati mostrano una riduzione in termini di energia erogata dalle SSE tra lo scenario considerato e quello di riferimento, rispettivamente, pari al 7% e il 25%. Si osservi infine che quest'ultimo appare non così lontano da quello ottenuto nelle analisi precedenti e riportato in precedenza, a conferma del trend già menzionato.

2.4.2 Considerazioni economiche

Lo scenario considerato si riferisce a compagnie di trasporto pubbliche e private desiderose di aggiornare i loro impianti esistenti. L'analisi costi/benefici effettuata considera dunque l'investimento iniziale e i flussi di cassa annuali di ritorno dell'investimento legati al risparmio di energia erogata dalle SSE. L'investimento iniziale, che include i sistemi di accumulo, i convertitori di potenza e le spese generali di impianto, è stato calcolato in accordo alla seguente espressione:

$$C_i = P_{PC}C_{PC} + E_{RESS}C_{RESS} \quad (2)$$

Dove E_{RESS} e C_{RESS} appresentano, rispettivamente, l'energia nominale dell'accumulo e il suo costo unitario. Va comunque precisato che sono stati utilizzati valori diversi per C_{RESS} , da 300 €/kWh a 600 €/kWh. D'altra parte, indicano la massima potenza gestibile dal convertitore di potenza e il suo costo unitario, includendo la spesa di impianto. A questo proposito si è considerato un valore costante pari a 200 €/kW.

Bisogna comunque precisare che E_{RESS} è stata determinata con l'obiettivo di mantenere le celle al litio internamente ai loro limiti di potenza, essendo il loro unico compito quello di gestire elevate correnti in carica e scarica per brevi intervalli di tempo. L'espressione precedente, sotto l'ipotesi che la massima potenza gestibile dall'accumulo sia uguale a quella del convertitore primario (dunque $P_{RESS}=P_{PC}$) può dunque modificarsi come segue.

$$C_i = P_{PC} \left(C_{PC} + \frac{C_{RESS}}{k_B} \right) \quad (3)$$

$$k_B = \frac{P_{RESS}}{E_{RESS}}$$

Dove k_B è il rapporto tra la massima potenza gestita dall'accumulo e la sua energia nominale. Più grande è il rapporto, maggiore la performance garantita. In aggiunta k_B è esprimibile in funzione di C_{RESS} , corrispondendo a celle maggiormente performanti prezzi più alti. Due valori sono stati in particolare scelti per l'applicazione in esame, uguali rispettivamente a 3 e 6 h^{-1} , corrispondenti a un costo di 300 €/kWh (celle economiche LFP) e 500 €/kWh (celle ad alta potenza NMC) ricavati da esperienze precedenti.

Anche per quanto riguarda il costo dell'energia sono stati utilizzati diversi valori, da 50 €/MWh fino a 150 €/MWh, al fine di considerare la variabilità del mercato dell'energia globale. Principali obiettivi sono stati quello di calcolare il tempo di rientro dell'investimento (PBT) e il valore netto dell'investimento (NPV) per una vita complessiva dell'impianto di 15 anni e un interesse del 6%, nel caso di un singolo o tre sistemi di accumulo installati. I risultati sono riportati Tabella 11 e Tabella 12.

Tabella 11: NPV e PBT, accumulo singolo

		P_E (€/MWh)		
		50	100	150
C_{RESS} (€/kWh)	k_B (1/h)	NPV (k€)		
300	3	-64	36	137
500	6	-55	45	146
C_{RESS} (€/kWh)	k_B (1/h)	PBT (y)		
300	3	>15	10.8	6.1
500	6	>15	9.9	5.7

Tabella 12: NPV e PBT, tre accumuli

		P_E (€/MWh)		
		50	100	150
C_{RESS} (€/kWh)	k_B (1/h)	NPV (k€)		
300	3	-134	228	589
500	6	-106	255	616
C_{RESS} (€/kWh)	k_B (1/h)	PBT (y)		
300	3	>15	8.3	4.9
500	6	>15	7.6	4.5

Come è possibile osservare il tempo di ritorno più breve si ha attorno ai 6 anni per la configurazione ad accumulo singolo, e verso i 4.5 anni per la configurazione con tre accumuli. L'ultima soluzione appare in particolare più interessante in termini di NPV, con 616 k€ al termine dei 15 anni. Per questi motivi, la configurazione con tre accumuli sembra la più efficace in termini di convenienza economica tra tutti i casi esaminati.

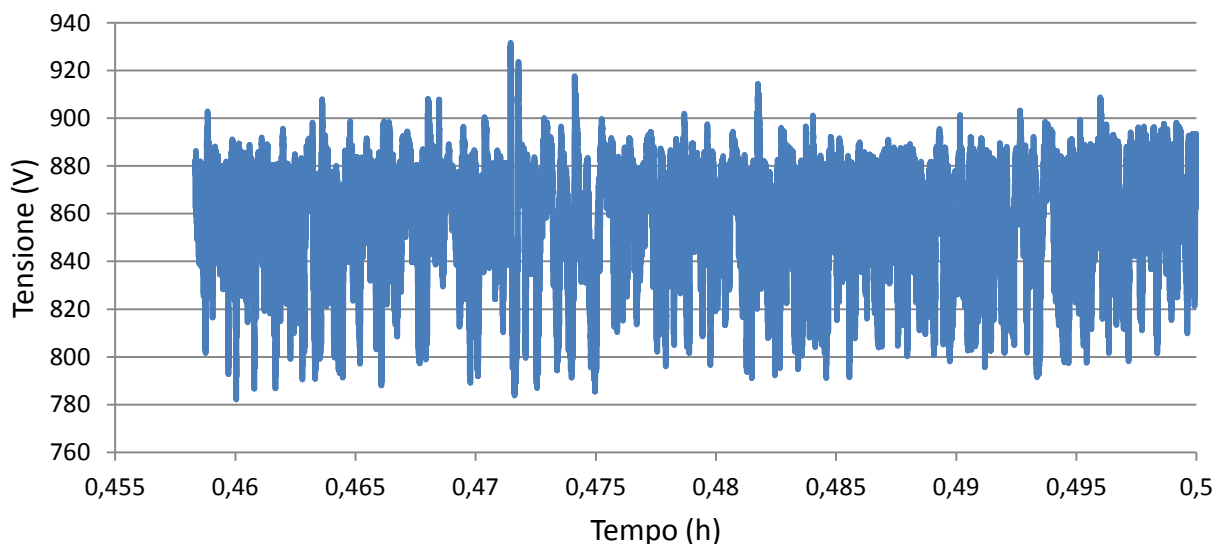
3 Conclusioni

Il presente documento ha dunque mostrato la validazione del modello di simulazione attraverso una estesa campagna di prove, i cui risultati sono stati presentati in dettaglio. Successivamente, a partire dagli effettivi profili di utilizzo è stato progettato il sistema di accumulo. Infine, è stata valutata anche la convenienza economica dovuta all'installazione di uno o più sistemi di accumulo, per valori diversi del costo della cella al litio in esame e del costo dell'energia.

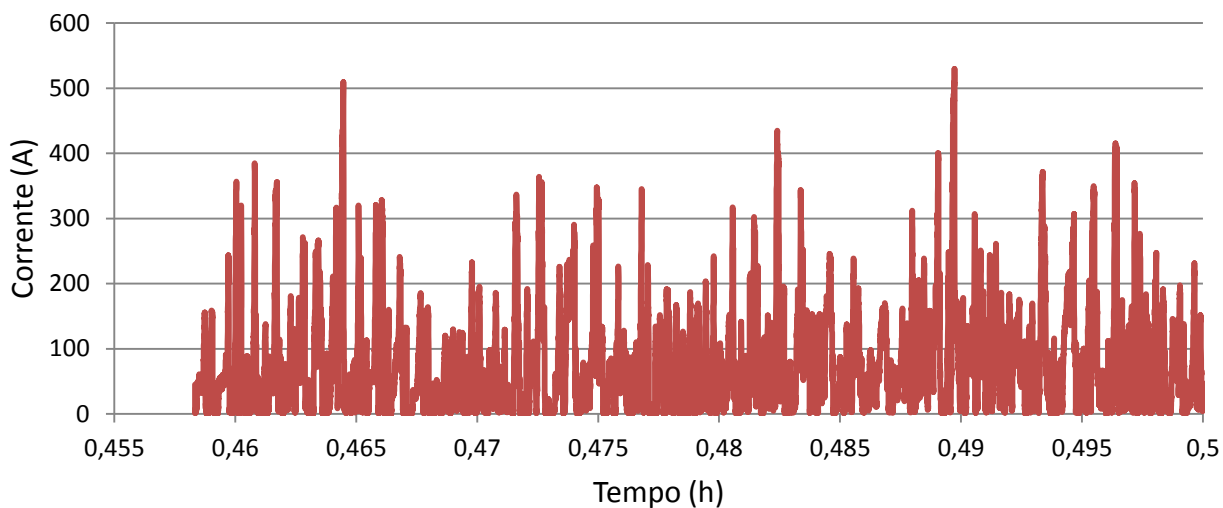
4 Appendice: misure sperimentali

In questa sezione verranno riportate le misure registrate durante la campagna sperimentale. In particolare si riportano gli andamenti di tensione e corrente registrati dai data logger per le tre SSE di riferimento (San Fermo, Alzano M., Albino) all'interno di porzioni di ore tipo (di morbida, di punta).

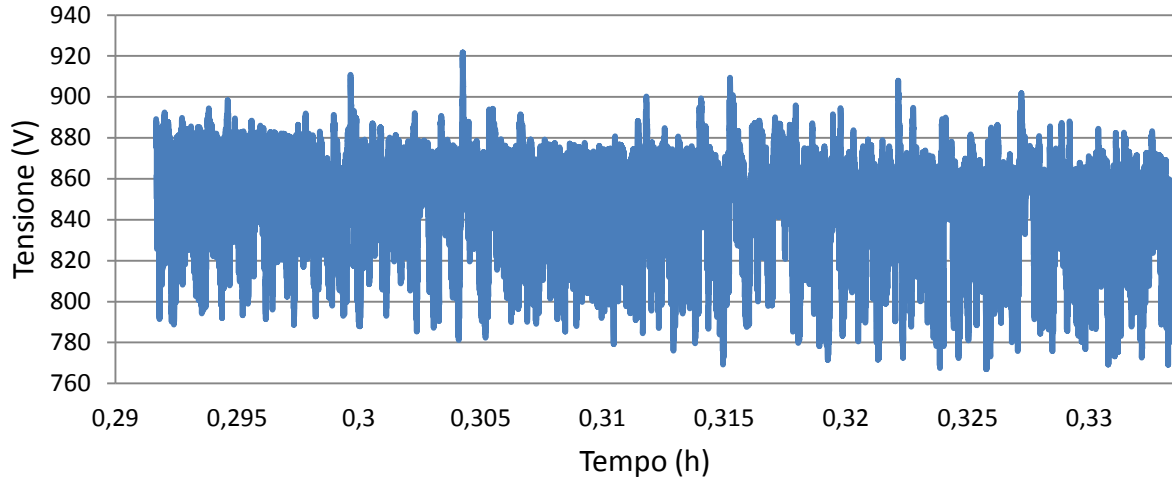
SSE San Fermo - ora di morbida



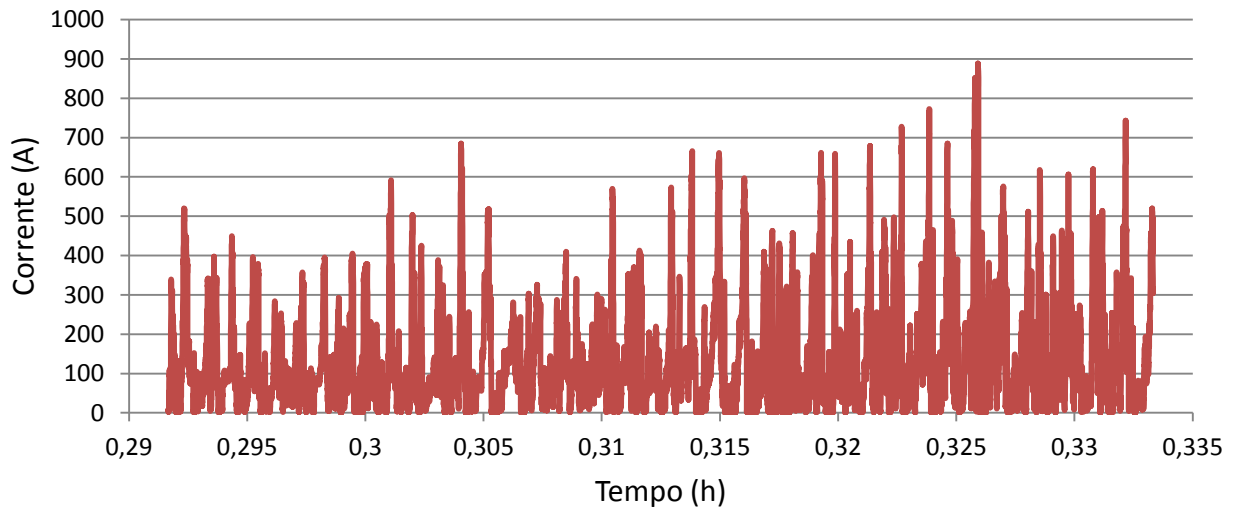
SSE San Fermo - ora di morbida



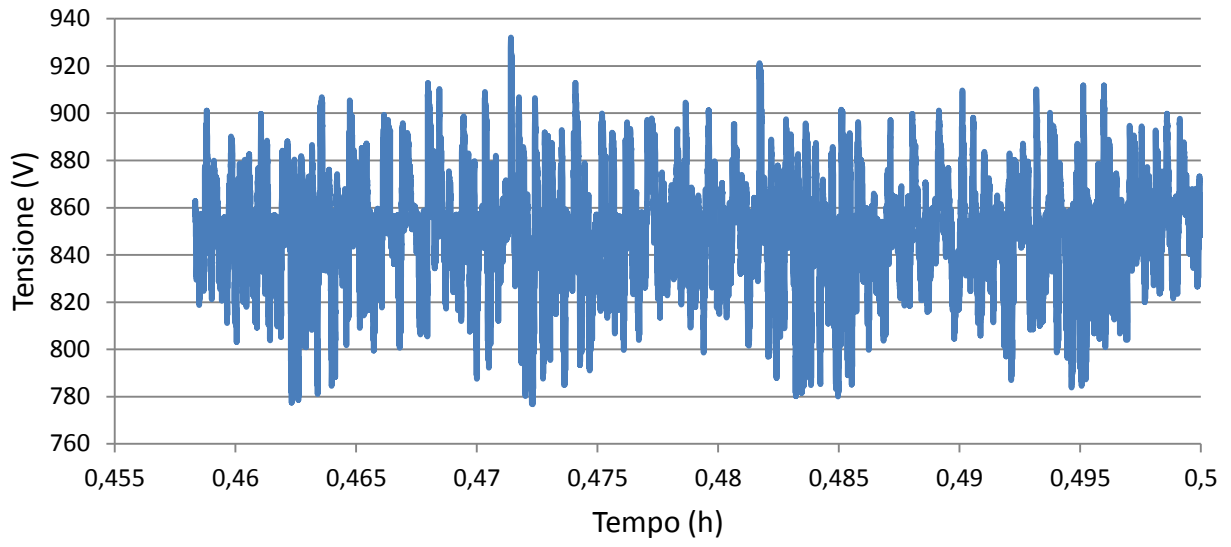
SSE San Fermo - ora di punta



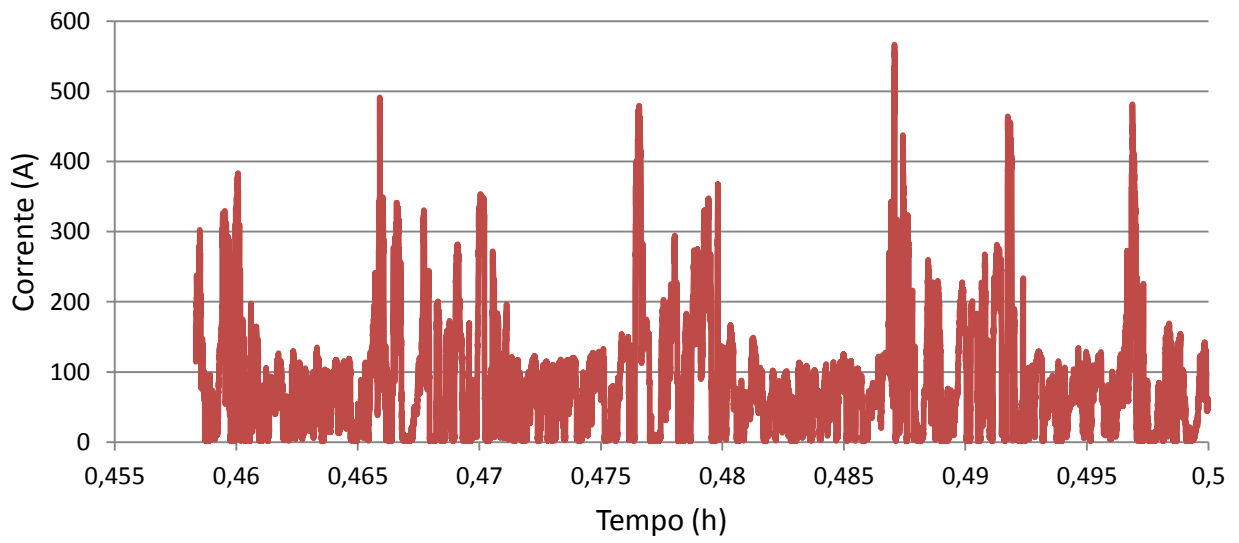
SSE San Fermo - ora di punta



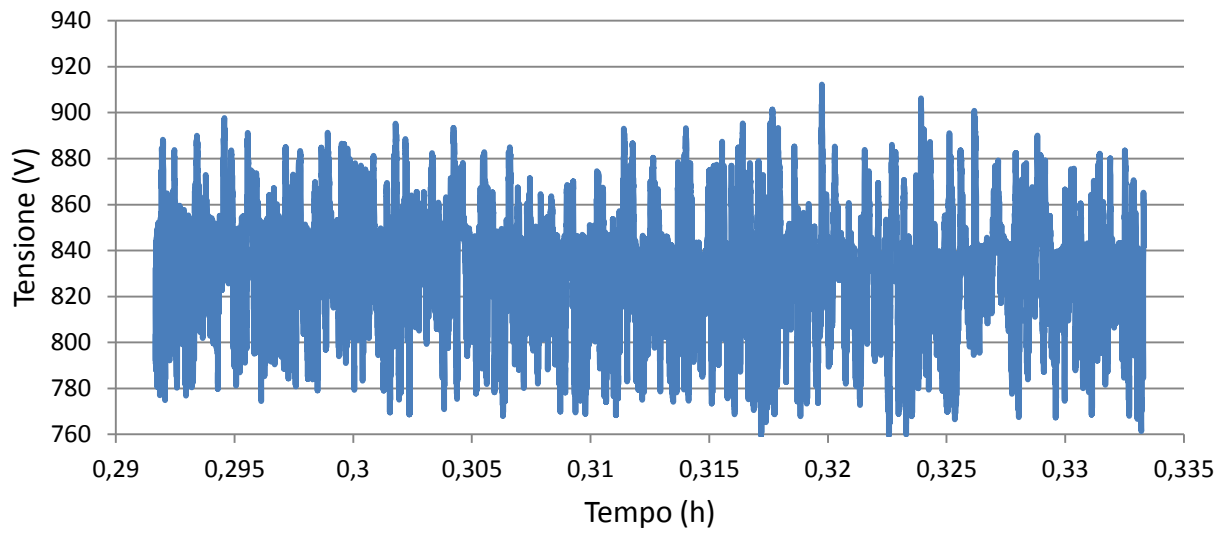
SSE Alzano - ora di morbida



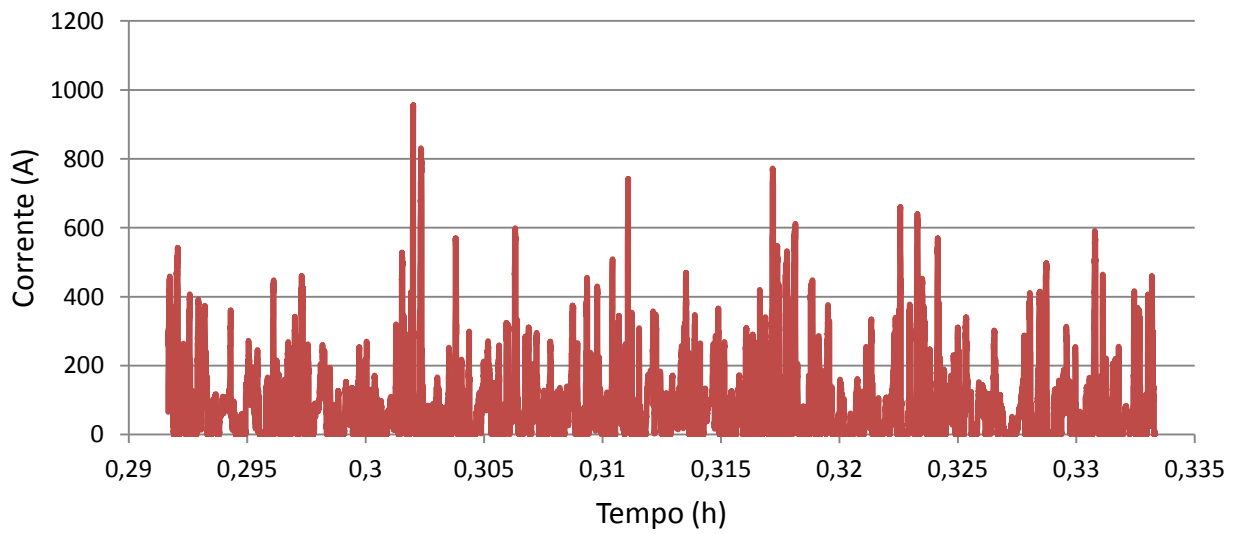
SSE Alzano - ora di morbida



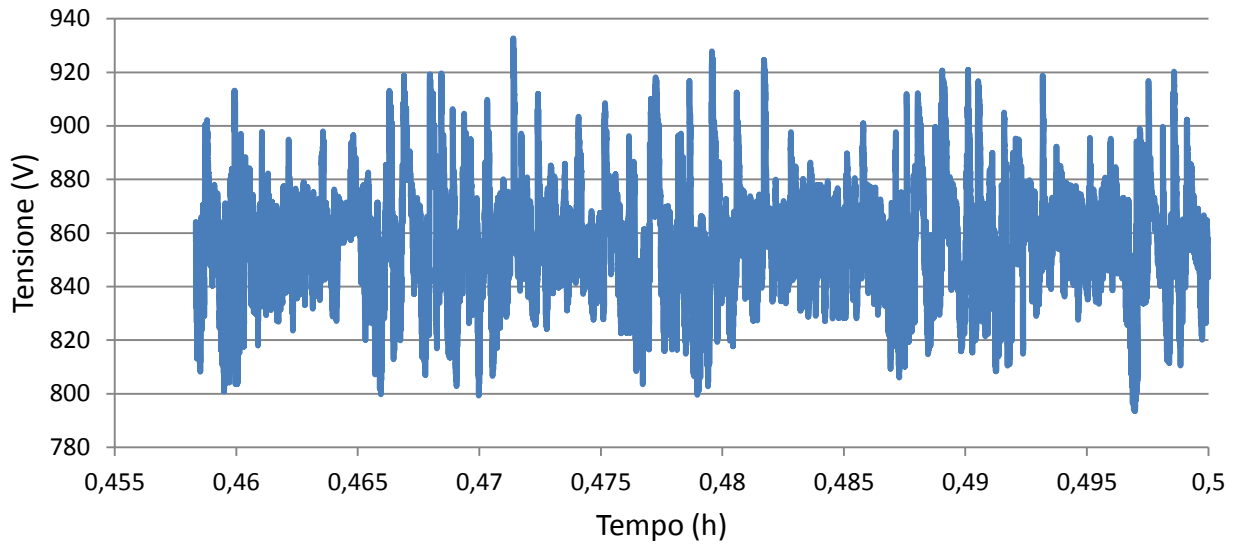
SSE Alzano - ora di punta



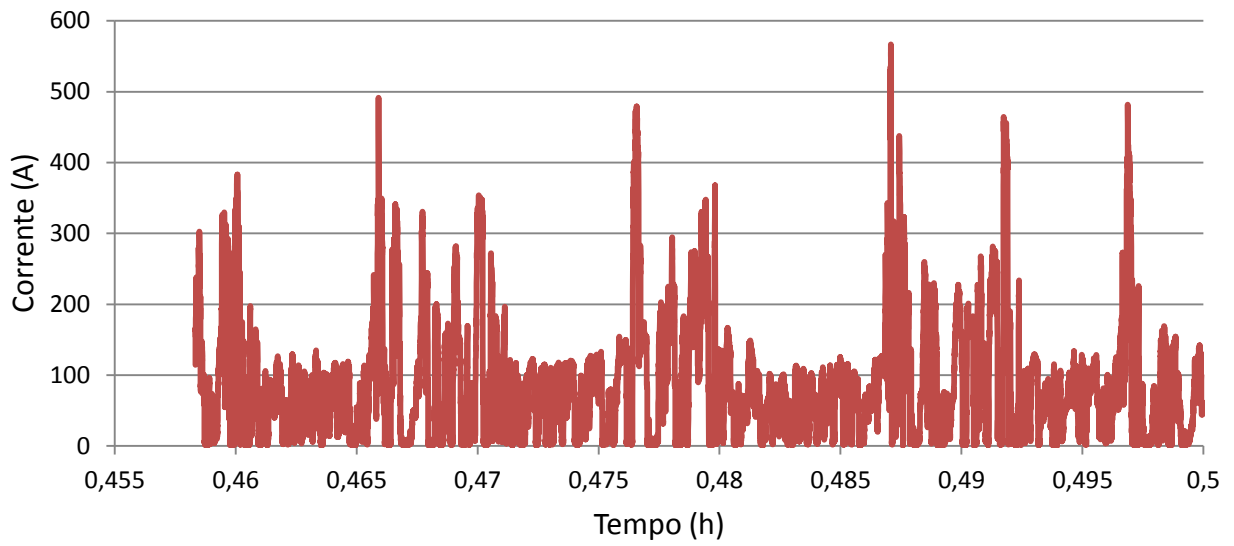
SSE Alzano - ora di punta



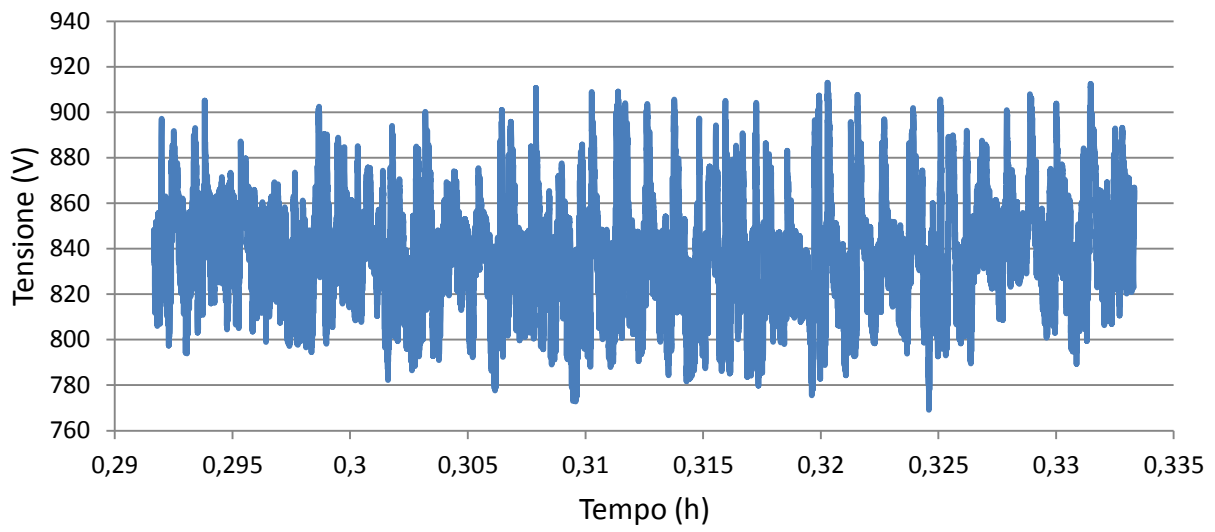
SSE Albino ora - di morbida



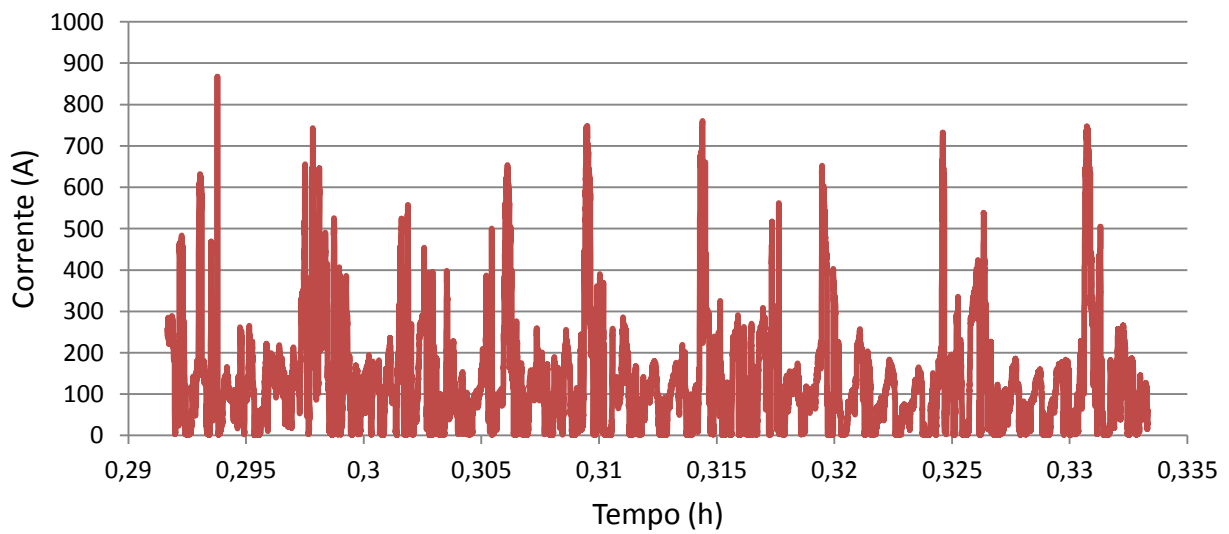
SSE Albino - ora di morbida



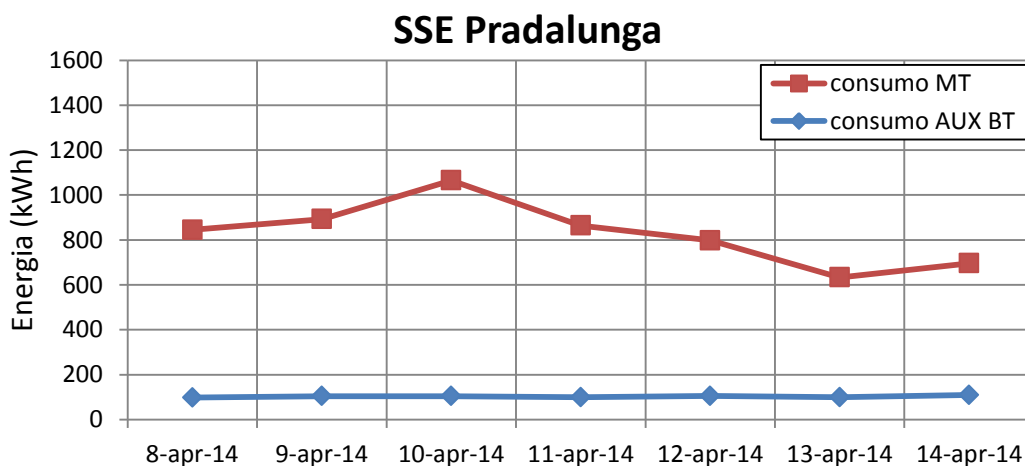
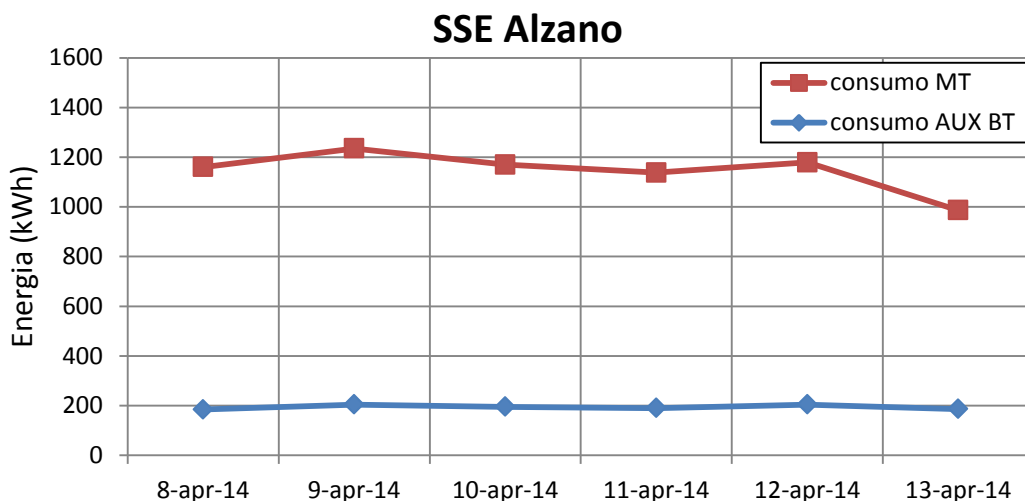
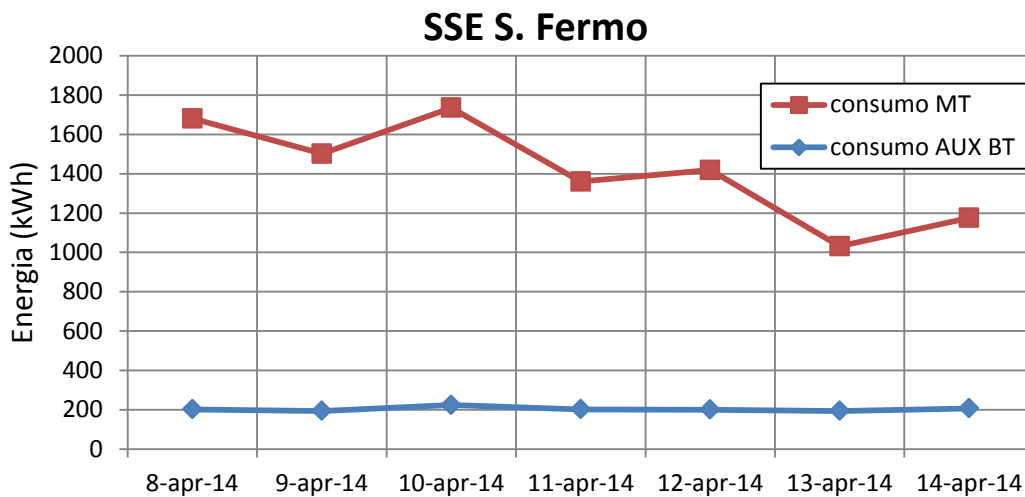
SSE Albino - ora di punta



SSE Albino - ora di punta

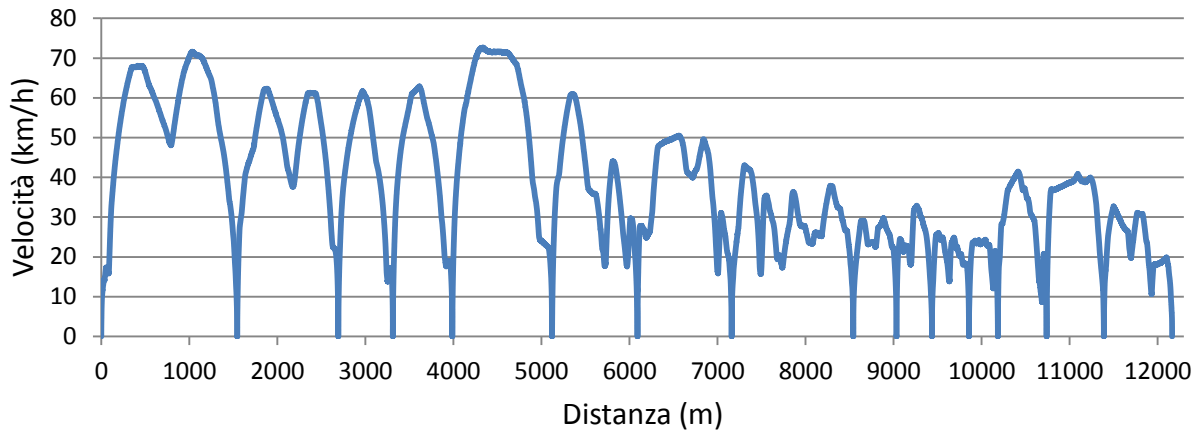


Di seguito, alcuni grafici che rappresentano i consumi energetici in media tensione MT (15 kV) e quelli in bassa tensione BT (dispositivi ausiliari di stazione). Per ulteriori dettagli si faccia riferimento allo schema di Figura 11. I grafici sono riferiti a tre sottostazioni di alimentazione, all'interno di una settimana tipo.



Significativa è anche la registrazione del profilo di velocità effettivo, come già detto significativamente distante da quello inizialmente ipotizzato dall'operatore, per via del fatto che la massima velocità di 70 km/h si raggiunge come già osservato in una porzione piuttosto ristretta dell'intera linea.

Velocità tram



5 Riferimenti bibliografici

I riferimenti bibliografici devono essere richiamati nel testo con numeri progressivi tra parentesi quadre e riportati a fine testo con il seguente formato:

1. M. Ceraolo, R. Giglioli, D. Poli: "Individuazione delle sollecitazioni e criterio di dimensionamento di un accumulatore al litio inserito in una stazione di conversione di una tranvia metropolitana", Accordo di Programma Ministero Sviluppo Economico-ENEA, Piano Annuale di Realizzazione 2012.
2. M. Ceraolo, G. Lutzemberger, M. Marracci: "High power Lithium Batteries usage in hybrid vehicles", VPPC Conference, 2010 IEEE, 1-3 Sept. 2010, Lille.
3. A123 Systems documentation: <http://www.a123systems.com/solutions-transportation-passenger-vehicles.htm>

Curricula del gruppo di lavoro

Massimo Ceraolo (1960)

Ricercatore universitario dal 1992 professore Ordinario di Sistemi Elettrici per l'Energia dal 2002 presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Pisa.

E' docente degli insegnamenti di Sistemi Elettrici di Bordo presso l'Università di Pisa e presso l'Accademia Navale di Livorno.

La sua attività di ricerca nell'ultimo decennio si è prevalentemente sviluppata nel settore dell'accumulo elettrochimico dell'energia, e dei veicoli a propulsione elettrica e ibrida.

Su questi ultimi temi stato autore negli ultimi 10-15 anni di oltre 40 pubblicazioni, prevalentemente a carattere internazionale, di cui si allegano i riferimenti.

Attualmente coordina lo sviluppo di un veicolo a propulsione elettrica alimentato a fuel-cell ad idrogeno.

E' presidente del Corso di Dottorato in Veicoli Terrestri e Sistemi di Trasporto e membro del Comitato di Presidenza della Commissione Veicoli Elettrici Stradali.

Romano Giglioli (1951)

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”. E’ 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.

Giovanni Lutzemberger (1981)

Nato a Pisa il 31/12/1981, ha conseguito il Diploma di Maturità classica nel Luglio dell’anno 2000. Ha conseguito la Laurea Specialistica in Ingegneria dei Veicoli Terrestri nel 2007 presso l’Università di Pisa, ed è risultato tra i vincitori con borsa del Concorso di ammissione al Dottorato di Ricerca in Veicoli Terrestri e Sistemi di Trasporto (Ciclo 2008-2010) presso la Scuola di Dottorato Leonardo da Vinci.

Nel 2011 ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca discutendo la tesi dal titolo “Battery, Hybrid and Fuel Cell vehicle propulsion systems”.

Nel 2011 è risultato vincitore della Selezione pubblica per il conferimento di un assegno di ricerca di durata biennale sul tema “Modellazione e sperimentazione di batterie al litio per applicazioni veicolari”, presso il Dipartimento di Ingegneria dell’energia e dei sistemi (Università di Pisa), di cui ha ottenuto il rinnovo nel 2013.

Nel 2014 è risultato vincitore della Selezione pubblica per l’assunzione di un Ricercatore a tempo determinato L.240/2010 presso il Dipartimento di Ingegneria dell’Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni (Università di Pisa), Settore concorsuale 09/E2 “Ingegneria dell’energia elettrica”, Settore scientifico-disciplinare ING-IND/33 “Sistemi elettrici per l’energia”.

La sua attività di ricerca si è prevalentemente sviluppata nel settore dei veicoli a propulsione elettrica e ibrida e dell’accumulo elettrochimico dell’energia. Su questi ultimi temi è stato autore di 22 pubblicazioni, prevalentemente a carattere internazionale.