



Ricerca di Sistema elettrico

## Dimensionamento di un sistema di accumulo per una tramvia con integrazione dell'alimentazione da fonte fotovoltaica

Massimo Ceraolo, Romano Giglioli, Giovanni Lutzemberger



Università di Pisa  
DESTEC

## DIMENSIONAMENTO DI UN SISTEMA DI ACCUMULO PER UNA TRAMVIA CON INTEGRAZIONE DELL'ALIMENTAZIONE DA FONTE FOTOVOLTAICA

Massimo Ceraolo, Romano Giglioli, Giovanni Lutzemberger (DESTEC – Università di Pisa)

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto: Sistemi avanzati di accumulo dell'energia

Obiettivo: Analisi sperimentali di identificazione di cicli rappresentativi e di sicurezza 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 "Dimensionamento di un sistema di accumulo per una tramvia con integrazione dell'alimentazione da fonte fotovoltaica"

Responsabile scientifico ENEA: Manlio Pasquali

Responsabile scientifico Università di Pisa - DESTEC: Romano Giglioli

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 VALIDAZIONE DEL SIMULATORE .....	5
2.1 RICHIAMI DEL MODELLO DI SIMULAZIONE E RISULTATI .....	5
2.2 ANALISI SPERIMENTALE DEI FLUSSI ENERGETICI NEL SISTEMA DI ALIMENTAZIONE.....	7
2.3 PROGETTAZIONE DELL'ACCUMULO .....	9
2.4 VALIDAZIONE DEL SIMULATORE SU BASE ANNUA .....	11
3 INTEGRAZIONE DELL'ALIMENTAZIONE DA FONTE FOTOVOLTAICA.....	12
3.1 INFLUENZA DEL NUMERO DI ACCUMULI SULL'UTILIZZO DELL'ENERGIA PRODOTTA DA SOLARE.....	15
3.2 INFLUENZA DEL NUMERO DI TRENI SULL'UTILIZZO DELL'ENERGIA PRODOTTA DA SOLARE. ....	16
3.3 INFLUENZA DEL DIMENSIONAMENTO DEI DISPOSITIVI SULL'UTILIZZO DELL'ENERGIA PRODOTTA DA SOLARE. ....	16
4 CONCLUSIONI.....	18
5 APPENDICE: MISURE SPERIMENTALI .....	19
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	27
7 CURRICULA DEL GRUPPO DI LAVORO .....	27

## Sommario

La produzione di energia elettrica da fonte fotovoltaica per alimentare i trasporti su rotaia è un'applicazione di significativo interesse. Si tratta tra l'altro di un'applicazione a basso costo, grazie all'installazione sui tetti delle sottostazioni e con l'eliminazione di uno stadio di conversione del vettore elettrico. La produzione inoltre è "sincrona" con l'utilizzazione, in quanto la tramvia funziona tutti i giorni dell'anno e durante le ore di insolazione. Nello specifico però, l'andamento della potenza assorbita dai sistemi di trazione dei treni ha un andamento molto variabile per cui, per brevi periodi di tempo, la produzione solare può non avere un carico in grado di assorbirla.

Avendo già studiato e monitorato (nei due anni precedenti) una tramvia e sviluppato i sistemi di accumulo da introdurre in sottostazione per il recupero dell'energia di frenatura (che si dimostra molto conveniente sia energeticamente che economicamente), questa stessa struttura può con piccole modifiche di dimensionamento e controllo essere in grado di sopperire alla non sincronità per brevi tempi tra produzione solare ed assorbimento dei treni.

Le attività hanno dunque previsto l'aggiornamento dello strumento di simulazione che è stato validato alla luce della campagna di prove della durata di oltre un anno solare. Sulla base di ciò, sono state effettuate nuove simulazioni anche con integrazione dell'alimentazione da fonte fotovoltaica, finalizzate ad analizzare i flussi energetici sul sistema a confronto con quanto già analizzato in precedenza.

## 1 Introduzione

La produzione di energia elettrica da fonte solare fotovoltaica per alimentare i trasporti su rotaia è un'applicazione di significativo interesse. A questo riguardo, avendo già studiato e monitorato una tramvia nonché sviluppato i sistemi di accumulo da introdurre in una o più sottostazioni per il recupero in frenatura [1, 2, 3, 4], la medesima struttura può con piccole modifiche di dimensionamento e controllo può essere in grado di sopperire alla non sincronità, per brevi periodi, tra produzione solare ed assorbimento di energia dei treni. E' stato dunque a questo proposito aggiornato il simulatore già descritto in dettaglio in [5, 6] sulla base dei risultati conseguiti attraverso una campagna sperimentale volta a misurare i flussi energetici nonché gli andamenti di tensione e corrente lungo il percorso. I risultati hanno consentito di validare lo strumento di simulazione, anche al fine di dimensionare più correttamente i sistemi di accumulo previsti. Una validazione sui risultati delle misure su base giornaliera è già presente in [7]. Estendendo la campagna di sperimentazione fino a oltre un anno, è stato successivamente possibile operare una validazione su base annua.

## 2 Validazione del simulatore

### 2.1 Richiami del modello di simulazione e risultati

Una tramvia è normalmente composta da diverse fermate e sottostazioni di alimentazione. Il modello realizzato e descritto in [1, 2, 3, 4] simula l'esatto numero di sottostazioni e tram in transito. 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 1.



Figura 1. 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 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.

In particolare nei riferimenti [2, 6] erano tra l'altro stati analizzati in dettaglio gli effetti dell'installazione di sistemi di accumulo in corrispondenza di una o più SSE, l'effetto della presenza del convertitore DC/DC e

delle strategie di controllo adottate. Nel seguito solo il primo aspetto, utile nel proseguo dell'analisi, verrà richiamato.

In particolare, 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.

Ci si è dunque orientati alla configurazione di accumulo al litio, interfacciata o meno alla rete mediante convertitore DC/DC. Le configurazioni selezionate sono riportate in Tabella 1.

**Tabella 1. Principali caratteristiche della batteria senza (a sinistra) e con (a destra) interposizione di DC/DC**

	configurazione senza DC/DC	configurazione con DC/DC
Numero di celle	220	190
Tensione nominale di cella (V)	3.7	3.2
Tensione nominale (V)	814	608
Capacità nominale (Ah)	100	160
Corrente massima (A/Ah)	10	6
Energia nominale (kWh)	81.4	97.3

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). Anche in questo caso, non sono presenti dispositivi di accumulo.
- Come per il caso B, ma con l'aggiunta di  $n$  dispositivi di accumulo dalle caratteristiche prima menzionate, installati in corrispondenza delle SSE (C- $n$ ).

Il grafico riporta i risultati ottenuti. 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.

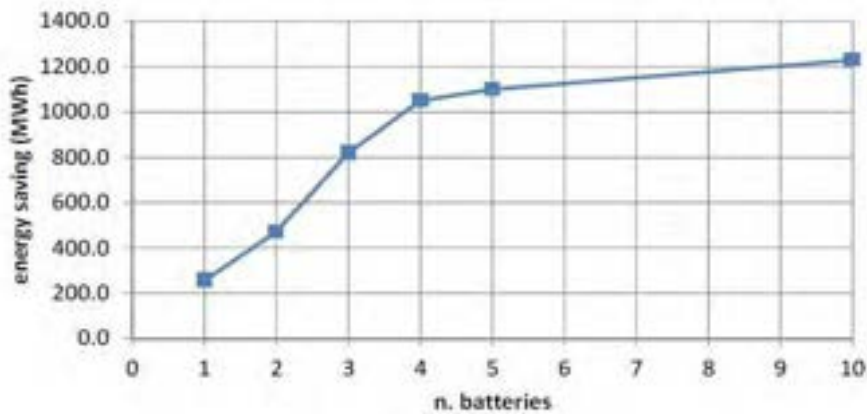


Figura 2. Risparmio energetico in funzione del numero di accumuli installati, configurazione senza DC/DC

## 2.2 Analisi sperimentale dei flussi energetici nel sistema di alimentazione

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 3.

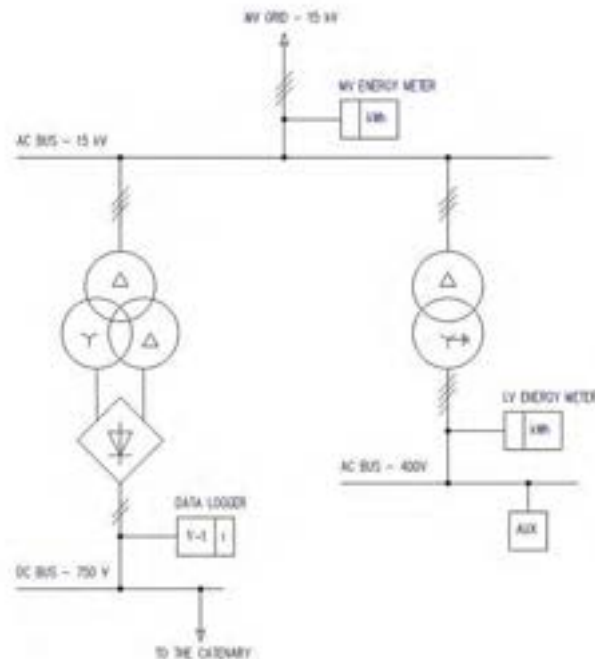


Figura 3. Posizionamento degli strumenti in una singola sottostazione

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.

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.

I valori ottenuti per tre sottostazioni sono mostrati in Tabella 2. 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 2. Flussi energetici per tre SSE**

SSE	Energia giornaliera MT (kWh)	Energia ausiliari BT (%) <sup>1</sup>	Perdite SSE (%) <sup>1</sup>	Energia di trazione (%) <sup>1</sup>
<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

<sup>1</sup> percentuale relativa 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.

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 3 si riporta l'energia erogata dalle SSE misurata e simulata.

**Tabella 3. 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
<b>Totale</b>	<b>7316.4</b>	<b>7270.0</b>			

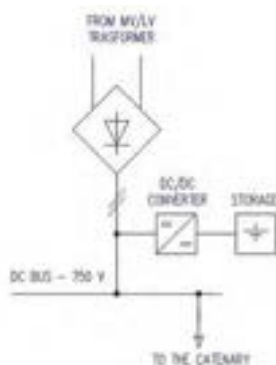
I parametri del modello utilizzati per la validazione sono stati infine scelti attraverso i seguenti criteri:

- I valori di tensione a vuoto e resistenza, sulla base dei criteri precedentemente menzionati, sono stati aumentati. Le differenze tra SSE è nel range  $\pm 5$  V e  $\pm 0.005$   $\Omega$ .
- 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 3 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 4, indicato come scenario Base.

### 2.3 Progettazione dell'accumulo

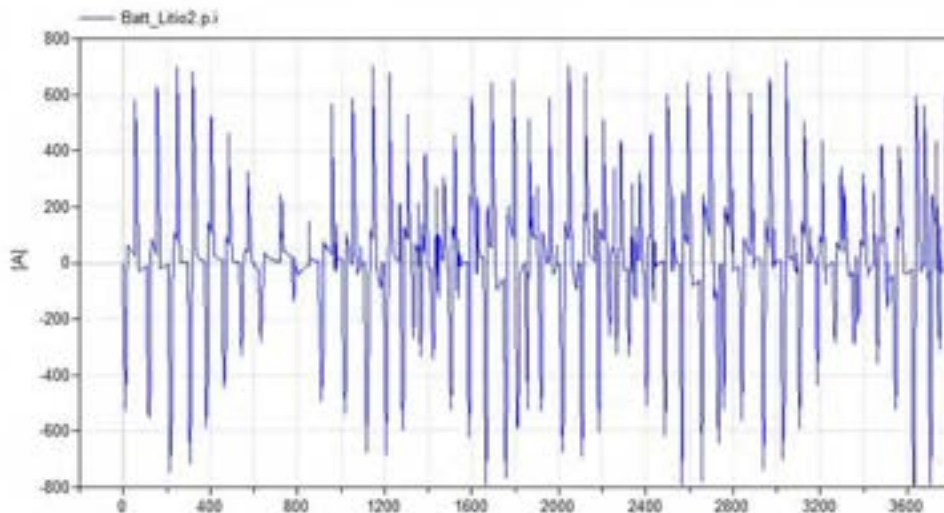
Come già precisato, la soluzione al litio può essere utilizzata con o senza interposizione del convertitore DC/DC. Sebbene la presenza di un componente addizionale può risultare poco vantaggiosa in termini di spazio occupato e complessità per l'intero sistema, l'introduzione del DC/DC garantisce in primo 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 operativa della linea. In conclusione, la corrente di batteria può così essere limitata a un valore di sicurezza. Lo schema ipotizzato è mostrato in Figura 4.



**Figura 4. Schema di installazione dell’accumulo in una SSE, da una estensione dello schema di Figura 3**

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 1, relativamente alla soluzione con DC/DC.

I risultati delle simulazioni sono riportati nella figura seguente. In particolare, sono riportati gli stress di sollecitazione su un accumulo, nel caso della configurazione con tre accumuli installati, in un’ora di morbida (5 tram sulla linea).



**Figura 5. Profili di corrente per l’accumulo, ora di morbida**

I risparmi di energia erogata dalle SSE calcolati su base annuale sono stati effettuati estrapolando i consumi giornalieri utilizzando il mix di giorni festivi, scolastici e non scolastici fornito dall’operatore della tramvia. In più, sono stati considerati gli assorbimenti ausiliari di climatizzazione e riscaldamento, considerati pari a 24 kW per le scaldiglie e di 48 kW per i condizionatori. I risultati sono mostrati in Tabella 4, 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 assenza di dispositivi di accumulo. Successivamente 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 4. Energia totale erogata dalle SSE simulata con 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 Validazione del simulatore su base annua

Come osservato al paragrafo precedente, il consumo annuale è stato calcolato estrapolando i risultati ottenuti dalle simulazioni per ore tipo (es. ora di punta, di morbida, ...) secondo il mix annuale fornito dall'operatore.

Una volta che le misurazioni effettuate hanno coperto l'intero anno solare di utilizzo, si è provveduto a validare il risultato delle simulazioni anche su base annua. A questo proposito, la Tabella 5 riporta i consumi energetici rilevati sperimentalmente, riportati in grafico anche in Appendice. In particolare:

- La misura in MT è quella rilevata dai contatori in MT dello schema di Figura 3. La misura indicata è quella rilevata su base annua, sommando i consumi di tutte le SSE.
- Le perdite, sulla base dello schema di Figura 3, possono essere rilevate solo nelle tre SSE nelle quali sono installate i data-logger. Il valore totale è stato dunque stimato estrapolando i risultati ottenuti, descritti in Tabella 2. Mediamente, le perdite complessive dei trasformatori e convertitori rappresentano circa il 20% dell'energia totale misurata in MT.
- Gli ausiliari BT sono quelli rilevati dai contatori BT dello schema di Figura 3. La misura indicata è quella rilevata su base annua, sommando i consumi di tutte le SSE.

**Tabella 5. Energia totale erogata dalle SSE, valore su base annua**

Misura	Energia totale SSE (MWh/y)
MT	4099.5
Perdite	737.9
Ausiliari BT	605.7
Trazione	2755.9

Come è possibile osservare, l'energia annua disponibile per la trazione è pari a 2756 MWh annui rispetto ai 2994 MWh simulati, dunque con un errore del 8.6% in eccesso.

La differenza è da ricercarsi nell'approssimazione condotta per stimare gli assorbimenti ausiliari, considerati come già detto ad assorbimento medio costante, e rispettivamente pari a 24 kW nel periodo invernale (ottobre-febbraio) e 48 kW nel periodo estivo (giugno-agosto). Peraltro, in parziale contrasto con quanto

dichiarato dall'operatore, appare verosimilmente sovrastimato l'assorbimento estivo per i sistemi di condizionamento. Ripetendo le simulazioni con un mix diverso, rispettivamente pari a 24 kW sia in inverno che in estate, si ottiene un consumo complessivo simulato annuo rispettivamente pari a 2829 MWh, con un errore in eccesso del 2.6% rispetto a quanto rilevato sperimentalmente. Si ritiene dunque plausibile che gli assorbimenti dei sistemi di condizionamento siano stati effettivamente sovrastimati da parte del gestore della tramvia. Una volta validato su base annua lo scenario Base, le simulazioni sono state effettuate nuovamente considerando la presenza di uno o tre accumuli. Come visibile da Tabella 6, i risparmi percentuali sono sostanzialmente analoghi a quanto riportato in Tabella 4.

**Tabella 6. Energia totale erogata dalle SSE simulata con diverse configurazioni dell'accumulo**

Caso studio	Energia totale SSE (MWh/y)	Risparmio energetico (MWh/y)
Base	2829	-
1-Storage	2627	202
3-Storage	2092	737

### 3 Integrazione dell'alimentazione da fonte fotovoltaica

La produzione di energia elettrica da fonte solare fotovoltaica per alimentare la tramvia è un'applicazione di notevole interesse in quanto la produzione è sincrona con l'utilizzazione, funzionando quest'ultima in tutti i giorni dell'anno, durante le ore di insolazione. Tuttavia, l'andamento della potenza assorbita dai sistemi di trazione dei treni ha un andamento molto variabile, dunque può capitare che la produzione solare possa non avere un carico in grado di assorbirla. In questo caso viene in aiuto l'accumulo, che per sua natura è in grado di sopperire alla non sincronità tra produzione solare e assorbimento da parte dei treni. Avendo già studiato e monitorato la tramvia, simulando inoltre l'installazione di uno o più accumuli, lo strumento di simulazione è stato aggiornato per la parte di produzione solare ed è stata effettuata una serie di simulazioni aggiuntive, finalizzate a verificare l'effetto dell'introduzione del solare.

Primo passo ha riguardato la scelta di un opportuno schema di installazione. A partire dagli schemi di Figura 3 e Figura 4, si è dunque definita l'integrazione dell'alimentazione da fonte PV. La scelta più ragionevole è stata quella di interfacciare l'alimentazione da fonte PV a un nodo DC mediante l'impiego di un convertitore, come mostrato in Figura 6. I principali vantaggi di questo schema risiedono nella flessibilità di regolazione e controllo.

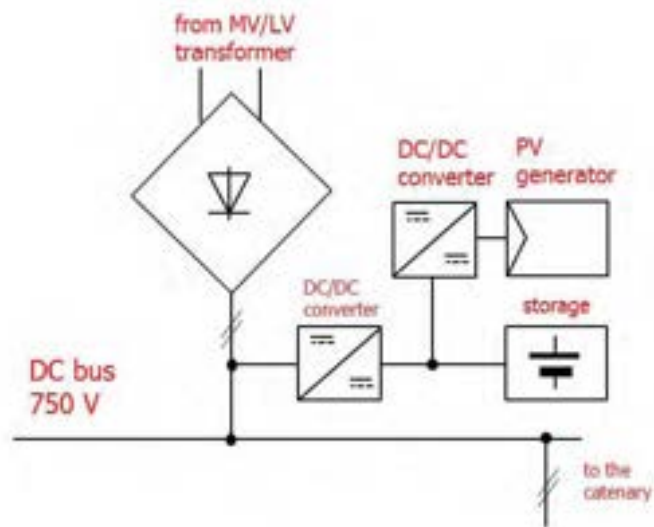


Figura 6. Schema di SSE dotata di sistema di accumulo e di generazione PV

Una volta scelta l'architettura più idonea, si è posto il problema di valutare la produzione di energia da parte di questi dispositivi. Tenuto conto delle superfici disponibili di installazione, pari a circa 100 m<sup>2</sup> per ciascuna SSE, è possibile contare su una potenza di picco prossima a 15 kW. Nota la potenza di picco e il posizionamento dei pannelli, è possibile attraverso software di calcolo PVGIS [8] valutare l'energia annua prodotta. Una volta identificate le principali caratteristiche, l'orientamento e le coordinate di installazione, come visibile in Figura 7, il software calcola l'energia prodotta su base annua.

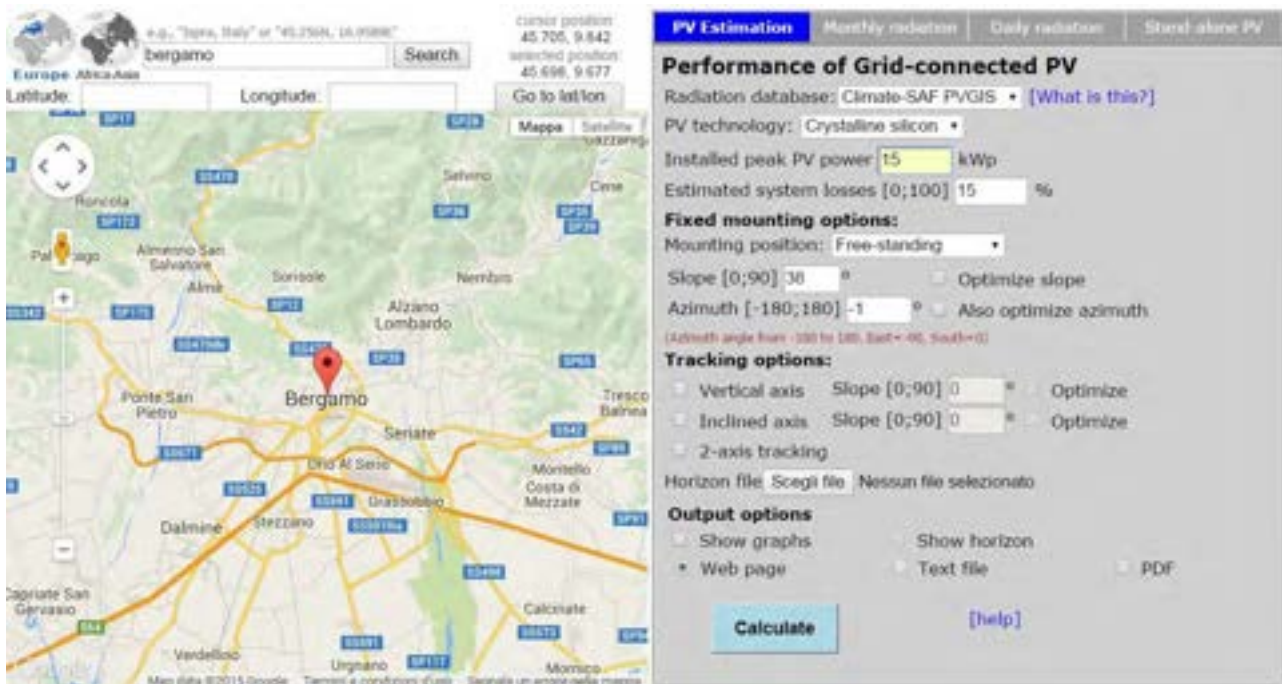


Figura 7. Schermata di calcolo del software utilizzato

I risultati sono stati riassunti in Tabella 7, nella quale sono riportate la produzione di energia media giornaliera e mensile, per tutto l'anno. Come è osservabile, la media mensile è pari a 1560 kWh, per una produzione totale annua di 18700 kWh, per ciascuna SSE. In prima approssimazione, la produzione annua è dunque calcolabile ipotizzando circa 1000 ore equivalenti alla massima potenza. Ipotizzando una produzione equivalente sulle 10 SSE in esame, si ottiene dunque una produzione da solare pari a 187 MWh.

**Tabella 7. Energia totale erogata dal sistema di produzione PV per singola SSE**

Mese	Energia quotidiana (kWh)	Energia mensile (kWh)
Gennaio	30.0	931
Febbraio	45.9	1290
Marzo	57.6	1790
Aprile	57.3	1720
Maggio	63.5	1970
Giugno	66.3	1990
Luglio	72.2	2240
Agosto	66.7	2070
Settembre	57.7	1730
Ottobre	41.3	1280
Novembre	30.0	901
Dicembre	26.8	832
<b>Media</b>	<b>51.3</b>	<b>1560</b>
<b>Totale</b>	<b>18700</b>	

Si fa inoltre presente come in questo caso l'integrazione dell'alimentazione da solare rappresenti un significativo costo evitato, relativamente all'acquisto di energia da rete. Il risparmio è dunque stimabile moltiplicando l'energia annua risparmiata per il costo dell'energia, stimato pari a 150 €/MWh, per un totale di circa 28 k€ all'anno. Si comprende quindi come l'investimento legato ai pannelli, stimabile in 1000 €/kW di picco prodotto, per 150 k€ complessivi nelle citate condizioni di impiego, possa essere recuperato di gran lunga entro la metà della vita dell'impianto, pari a 15 anni. Anche questo tipo di investimento risulta dunque sostenibile, come già dimostrato in [7] relativamente all'acquisto e integrazione dei sistemi di accumulo. I risultati sono riassunti in Tabella 8.

**Tabella 8. Valutazione economica dell'investimento per il sistema di generazione PV**

Costo dell'energia (€/MWh)	150
Costo sistema generazione PV (€/kW)	1000
Costo totale sistema generazione PV (€)	150000
Energia risparmiata annua (kWh)	187000
Costo evitato annuo (€)	28050
Tempo di rientro (y)	5.3

Una volta nota la massima produzione annua, ci si è posti il problema di valutare l'interazione tra la produzione solare e l'assorbimento di energia da parte dei treni. Per far questo, una serie di casi studio sono stati introdotti e simulati, descritti di seguito.

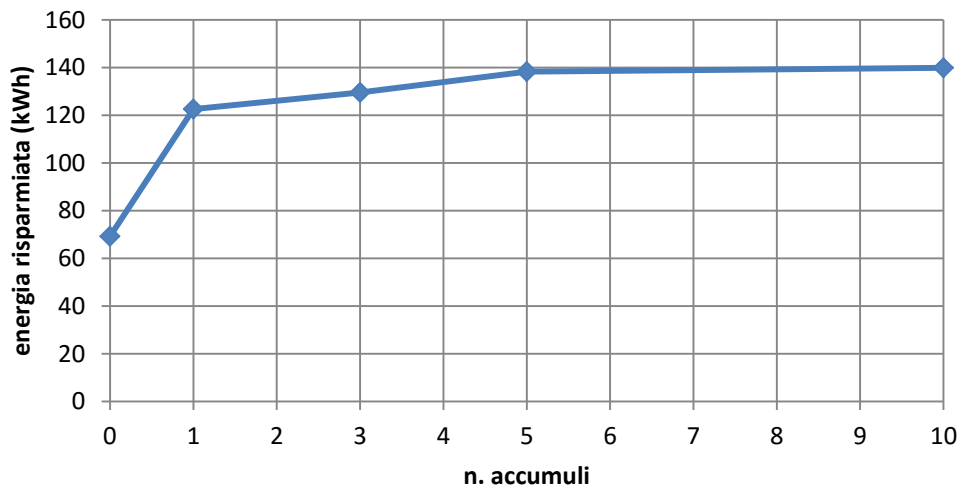
### 3.1 Influenza del numero di accumuli sull'utilizzo dell'energia prodotta da solare

Questo aspetto è stato analizzato prendendo a riferimento i consumi di energia erogata dalle SSE in un'ora di morbida, caratterizzata da 5 tram sulla linea. In assenza di accumulo, l'energia erogata dai pannelli solari può solo alimentare il carico, ovvero i tram in transito sulla linea. In caso di assenza di treni, l'erogazione di energia viene tagliata, a seguito dell'innalzamento di tensione lungo la linea medesima. I risultati sono riassunti in Tabella 9, in cui il risparmio di energia  $\Delta$  indicato si riferisce alla differenza di energia erogata tra il caso standard, senza pannelli solari, e il caso in esame, che include il contributo di produzione da solare, con i pannelli funzionanti alla massima potenza (15 kW). Come osservabile, in assenza di un accumulo su una produzione massima teorica di 150 kWh sul totale delle 10 SSE considerate, il risparmio è risultato pari a circa la metà: ciò vuol dire che una significativa quota parte viene tagliata. Diversamente, con l'introduzione di uno o più accumuli di energia nominale pari a 97.3 kWh come riportato in Tabella 1 (a destra), il risparmio energetico sale significativamente, pur non raggiungendo mai la produzione massima teorica di 150 kWh, per via delle perdite.

**Tabella 9. Energia totale erogata dalle SSE con e senza generazione PV in un'ora di morbida, per varie configurazioni di accumulo**

numero accumuli	numero di treni	Energia oraria senza PV (kWh)	Energia oraria con PV (kWh)	Risparmio energetico $\Delta$ (kWh)
0	5	383.6	314.4	69.2
1	5	366.1	243.5	122.6
3	5	269.5	139.9	129.6
5	5	244.5	106.2	138.3
10	5	235.9	96.0	139.9

Come visibile, e come riportato anche in Figura 8, 5 accumuli sono sufficienti per sfruttare l'intera produzione energetica PV.



**Figura 8. Curva di risparmio energetico dovuto alla generazione PV in funzione del numero di accumuli, ora di morbida**

### 3.2 Influenza del numero di treni sull'utilizzo dell'energia prodotta da solare.

In questo caso si è invece valutato, in assenza di dispositivi di accumulo installati, come il numero di treni sulla linea influenza il risparmio energetico dovuto alla produzione da solare. Infatti, nel caso di maggior richiesta da parte del carico, una parte maggiore di produzione da solare può essere sfruttata, riducendo così la quota da tagliare al fine di mantenere le tensioni di linea nei limiti. Ciò è ben visibile in Tabella 10.

**Tabella 10. Energia totale erogata dalle SSE senza e con PV in un'ora di punta, di morbida e festiva, in assenza di accumulo**

numero di treni	numero accumuli	Energia oraria senza PV (kWh)	Energia oraria con PV (kWh)	Risparmio energetico Δ (kWh)
3	0	199.6	160.4	39.1
5	0	383.6	314.4	69.2
10	0			142.5

Come si può osservare, l'incremento del carico consente com'era prevedibile di sfruttare maggiormente la produzione di energia solare. In particolare con 10 tram in marcia, appare chiaro come vi sia praticamente sempre la possibilità, a meno delle perdite, di trasferire l'energia generata dai pannelli PV agli azionamenti dei tram in marcia. All'opposto il caso festivo, quando con soli tre tram in marcia solo una ristretta quota dell'energia prodotta può essere trasferita al carico.

### 3.3 Influenza del dimensionamento dei dispositivi sull'utilizzo dell'energia prodotta da solare

In questa sezione sono state effettuate ulteriori verifiche, condotte secondo quanto riportato di seguito.

Si è innanzitutto valutato di quanto si modifica il risparmio nel caso di produzione di energia dimezzata, dunque in un'ora non corrispondente alla massima insolazione, nel caso di 5 tram sulla linea. In questo caso i risultati mostrano come una riduzione di potenza consenta di incrementare percentualmente i risparmi ottenuti. Ciò è ben visibile dalla Tabella 11, nella quale sono riportate le energie orarie erogate dalle SSE nel caso standard senza generazione da solare, nel caso di generazione da solare di potenza limitata a 7.5 kW, e nel caso di generazione da solare alla potenza massima di 15 kW.

**Tabella 11. Variazione del risparmio energetico in funzione della potenza di generazione da solare considerata**

numero accumuli	Energia oraria senza PV (kWh)	Energia oraria con PV 7.5 kW (kWh)	Energia oraria con PV 15 kW (kWh)	Risparmio energetico $\Delta$ (kWh)
0	383.6	-	-	-
0	-	343.3	-	40.3
0	-	-	314.4	69.2

Come visibile, nel caso a potenza limitata il risparmio è pari a 40.3 kWh, dunque pari al 54% dell'energia massima risparmiabile, ovvero 75 kWh. La percentuale di risparmio scende al 46% nell'altro scenario, evidentemente per via dell'incremento delle perdite dovuto alle maggiori potenze in gioco, mantenendosi inalterata la frequenza dei treni.

Successivamente si è valutato di quanto si modifica il risparmio conseguito nel caso di modifica della taglia di accumulo installata, in particolare passando dai 97.3 kWh dell'accumulo sin qui considerato ad una taglia dimezzata, rispettivamente pari a 48.7 kWh. Tale modifica è particolarmente utile nel caso in cui tutte le SSE siano dotate di accumulo, consentendo un significativo risparmio dei costi di installazione. In tutti i casi considerati, la potenza massima del sistema di generazione da solare è pari a 15 kW. I risultati sono riportati in Tabella 12, sempre riferiti alla consueta ora di morbida, con 5 tram sulla linea.

**Tabella 12. Variazione del risparmio energetico in funzione della potenza di generazione da solare considerata**

numero accumuli	Energia oraria RESS 48.7 kWh senza PV (kWh)	Energia oraria RESS 97.3 kWh senza PV (kWh)	Energia oraria RESS 48.7 kWh con PV 15 kW (kWh)	Energia oraria RESS 97.3 kWh con PV 15 kW (kWh)	Risparmio energetico $\Delta$ (kWh)
10	-	235.9	-	96.0	139.9
10	241.4	-	101.0	-	140.4

Come osservabile, il dimezzamento della taglia dell'accumulo, che comporta anche la conseguente riduzione delle massime correnti tollerabili da quest'ultimo, non comporta significative variazioni del risparmio energetico conseguibile dall'introduzione della generazione da fonte fotovoltaica. Infatti, sia nel caso di accumulo standard che di accumulo ridotto, il risparmio energetico è sostanzialmente allineato a 140 kWh nei due casi. Ai fini di una corretta gestione, sarebbe quindi sufficiente installare per ciascuna SSE un accumulo caratterizzato da una energia nominale pari a 48.7 kWh.

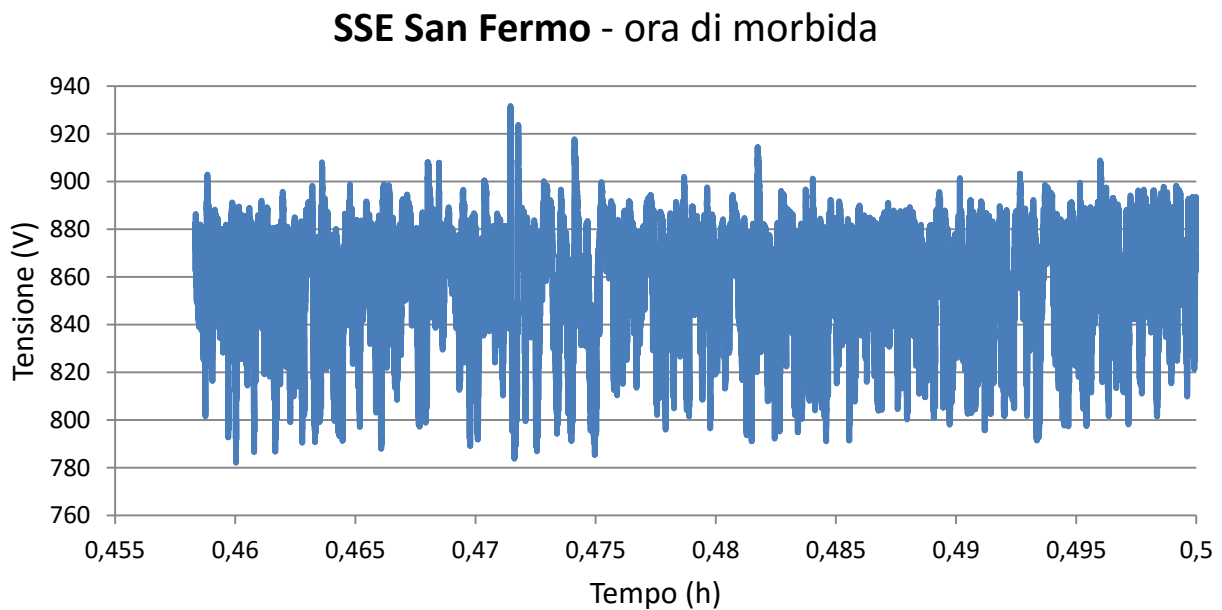
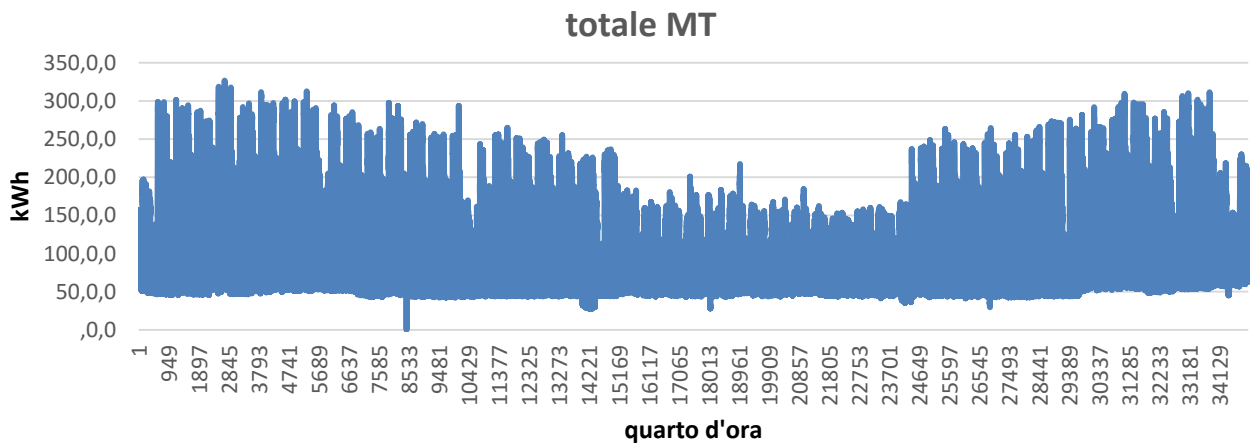
## 4 Conclusioni

Il presente documento ha dunque consentito il raggiungimento dei seguenti obiettivi, in particolare:

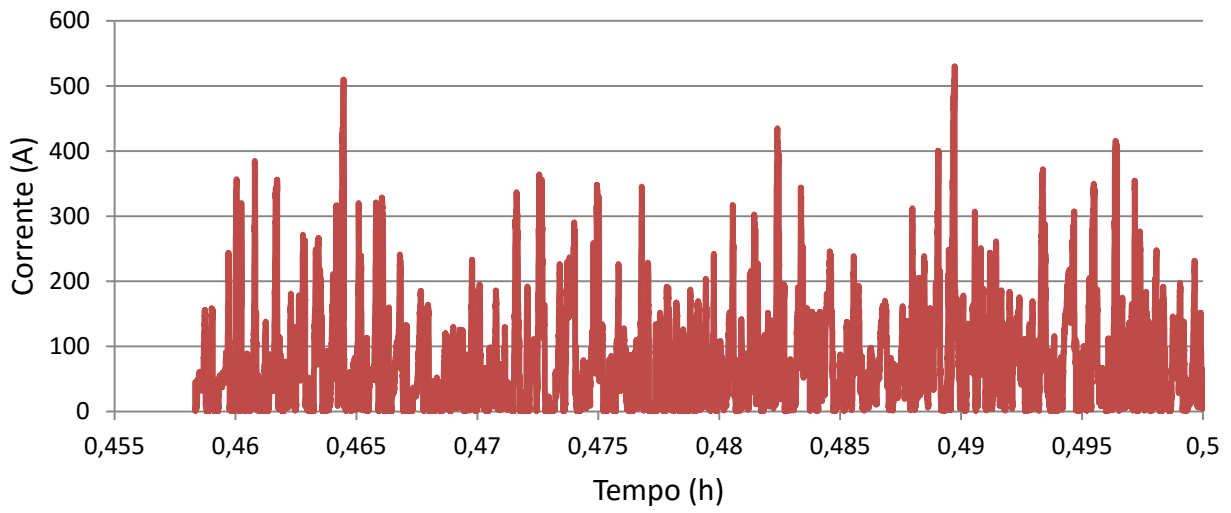
- La validazione del modello di simulazione attraverso i risultati di una estesa campagna di prove, che sono stati presentati ed analizzati in dettaglio.
- Lo strumento di simulazione validato è stato utilizzato per effettuare nuovamente lo studio dell'accumulo, valutando i risparmi energetici conseguenti alla sua installazione.
- In aggiunta sono state analizzate anche altre configurazioni del sistema, in particolare considerando una integrazione dell'alimentazione da fonte fotovoltaica.

## 5 Appendice: misure sperimentali

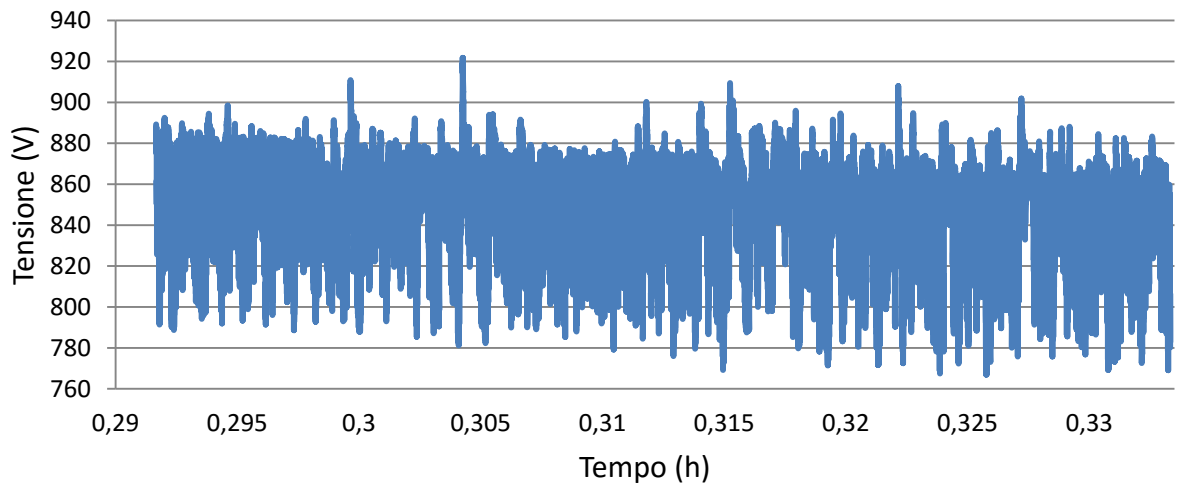
In questa sezione sono riportate le misure registrate durante la campagna sperimentale. In particolare si riportano gli andamenti dell'energia erogata dalle SSE in MT su base annuale, e i profili di tensione e corrente registrati dai data logger per le tre SSE di riferimento (San Fermo, Alzano Maggiore, Albino) all'interno di porzioni di ore tipo (di morbida, di punta).



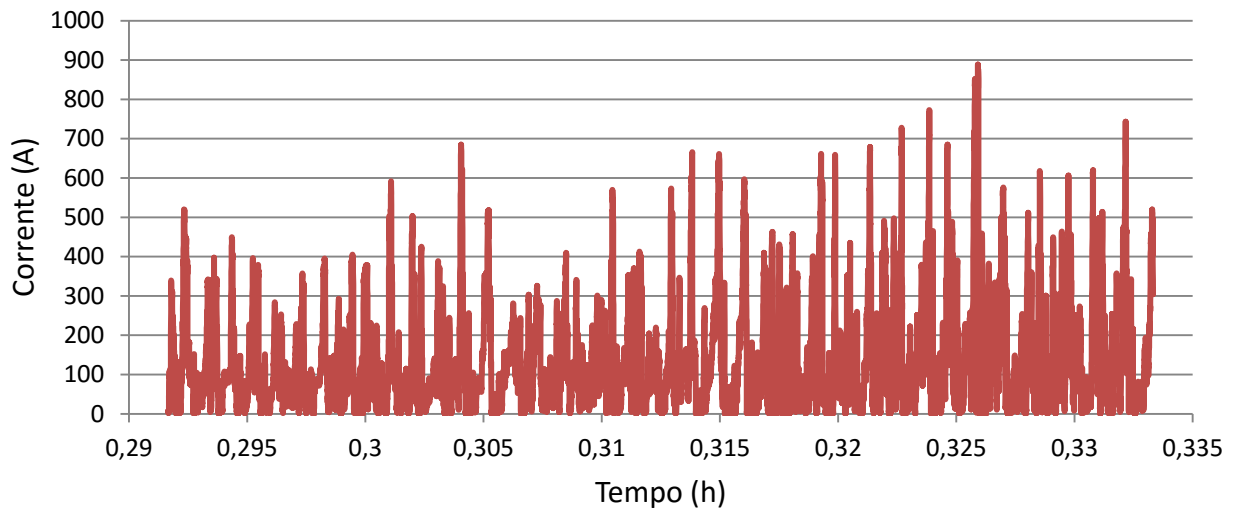
### SSE San Fermo - ora di morbida



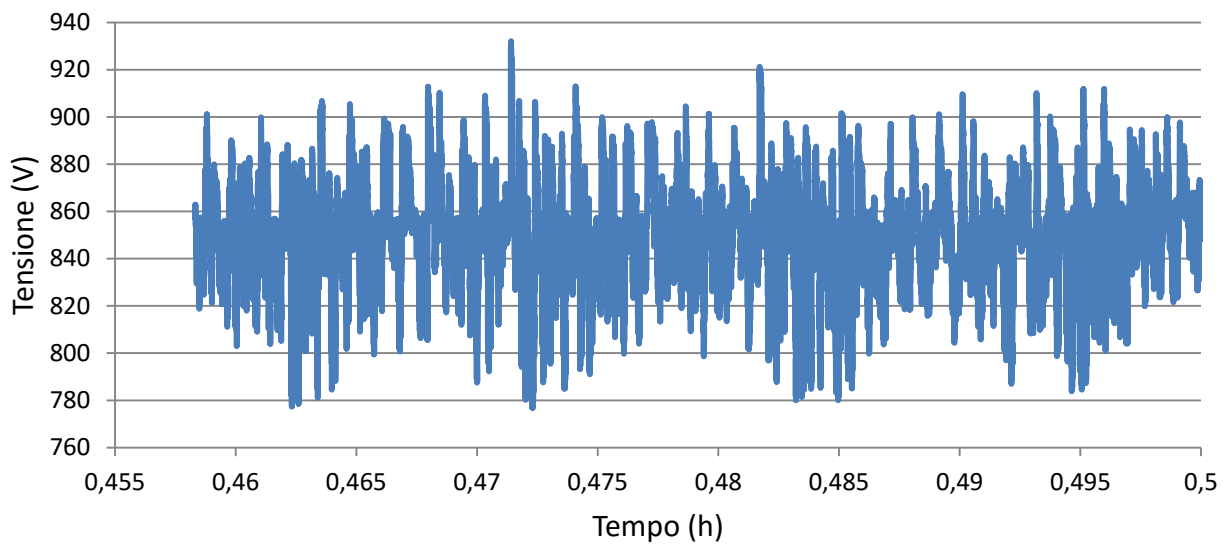
### SSE San Fermo - ora di punta



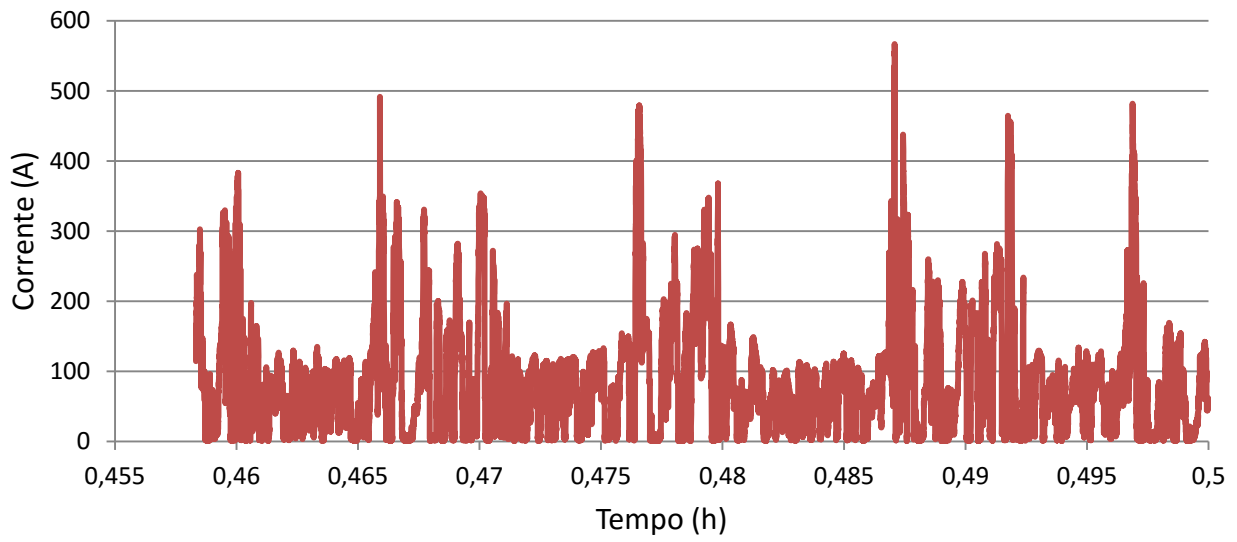
### SSE San Fermo - ora di punta



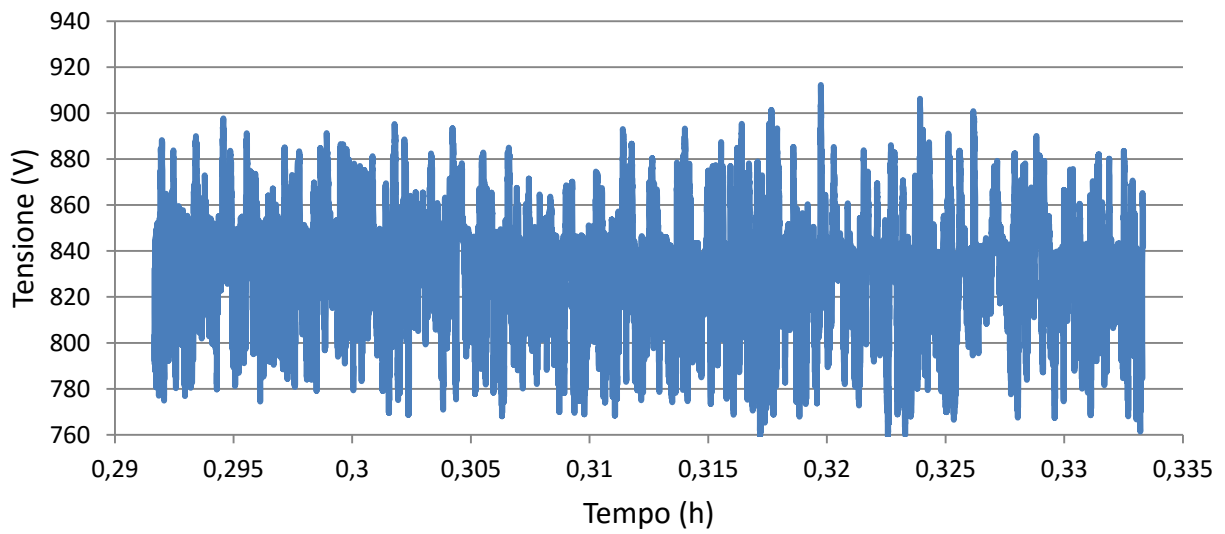
### SSE Alzano - ora di morbida



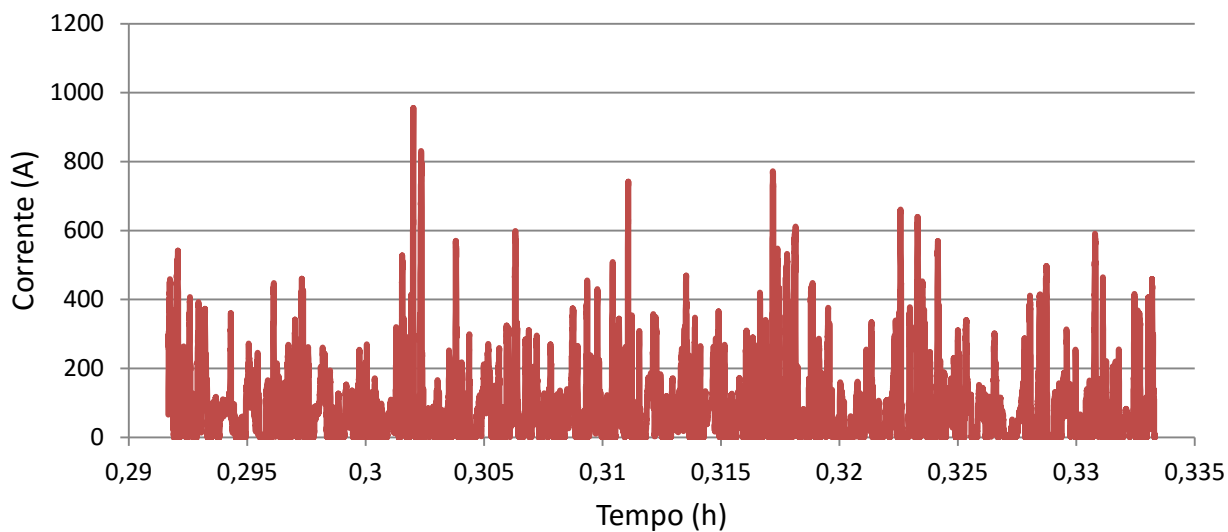
### SSE Alzano - ora di morbida



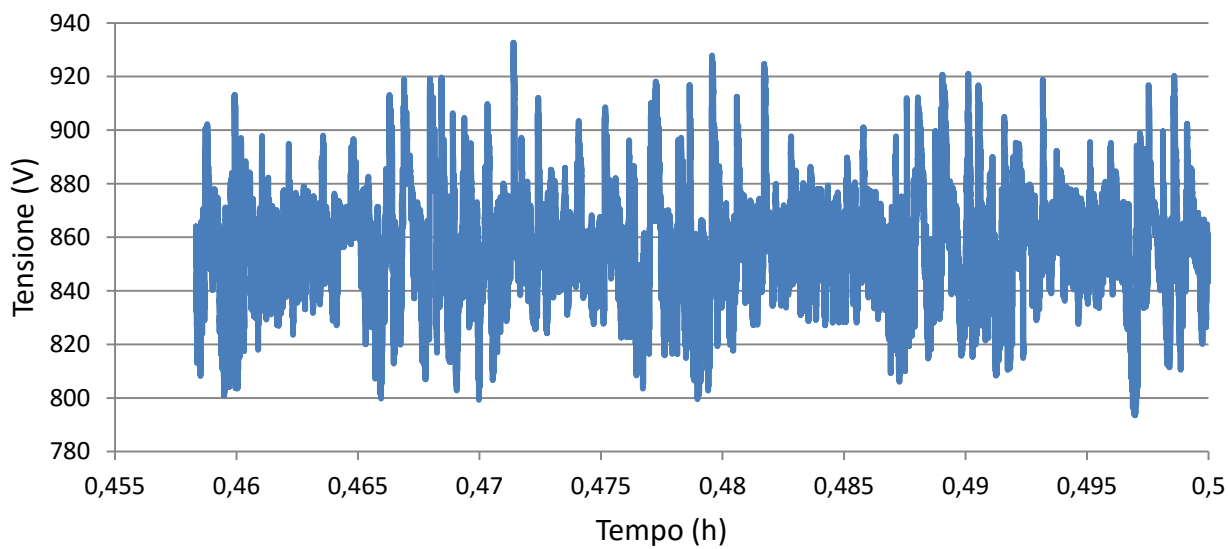
### SSE Alzano - ora di punta



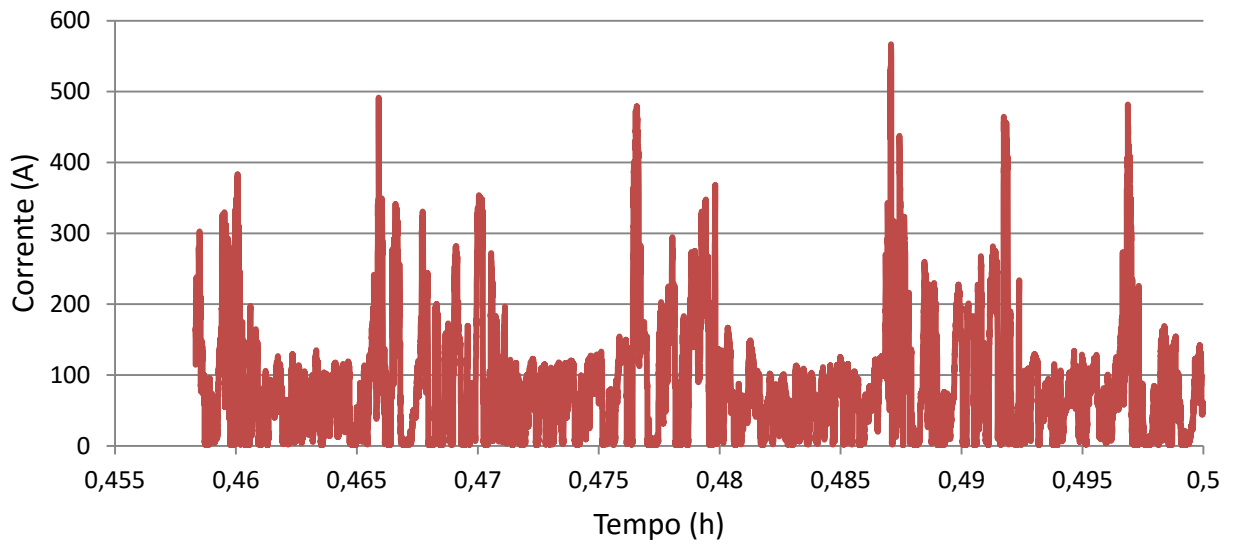
### SSE Alzano - ora di punta



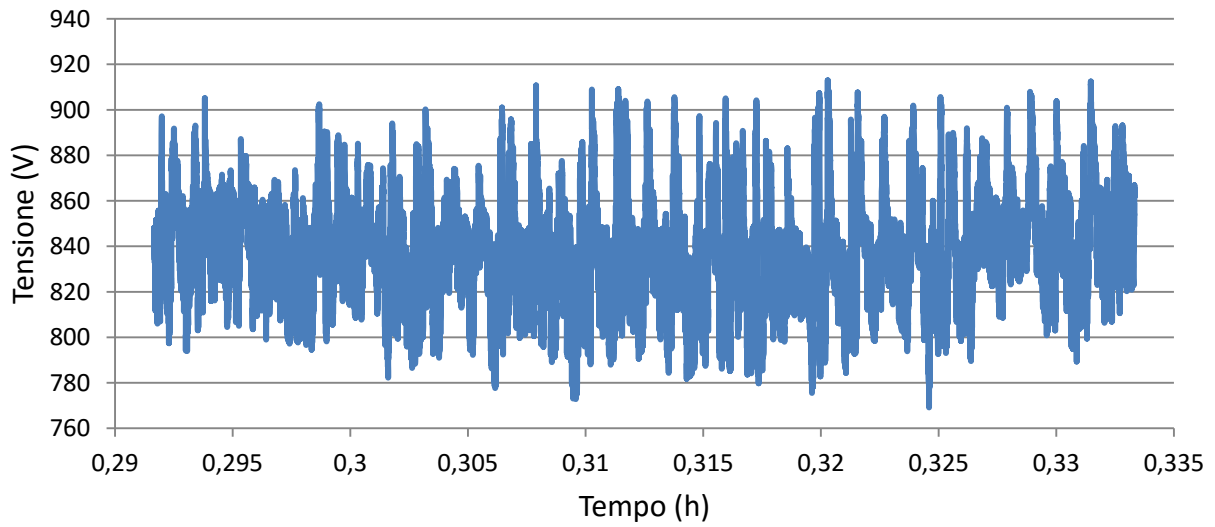
### SSE Albino ora - di morbida



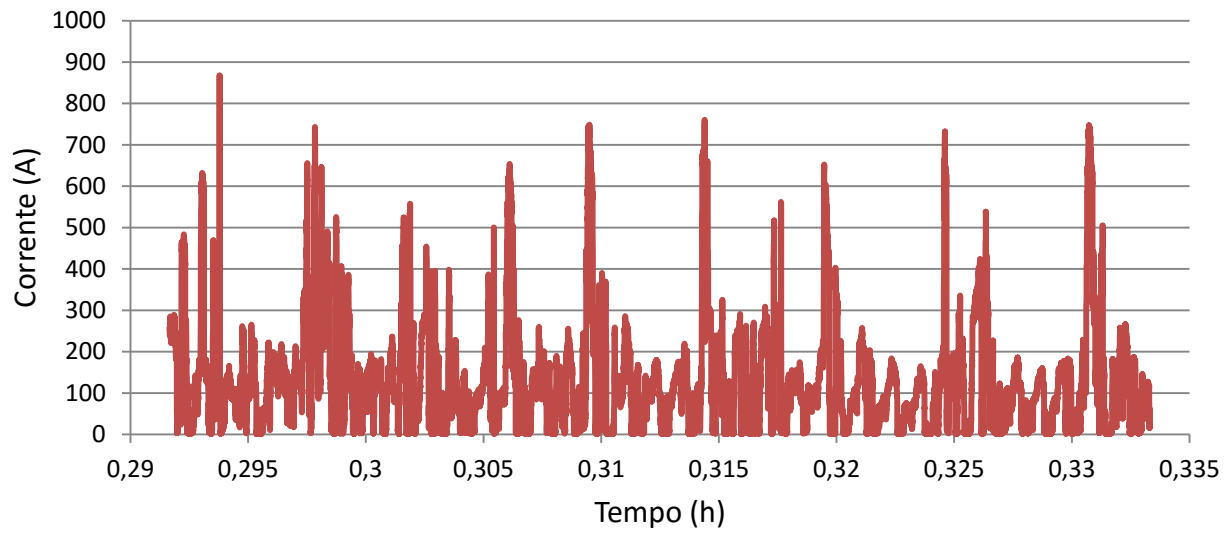
### SSE Albino - ora di morbida



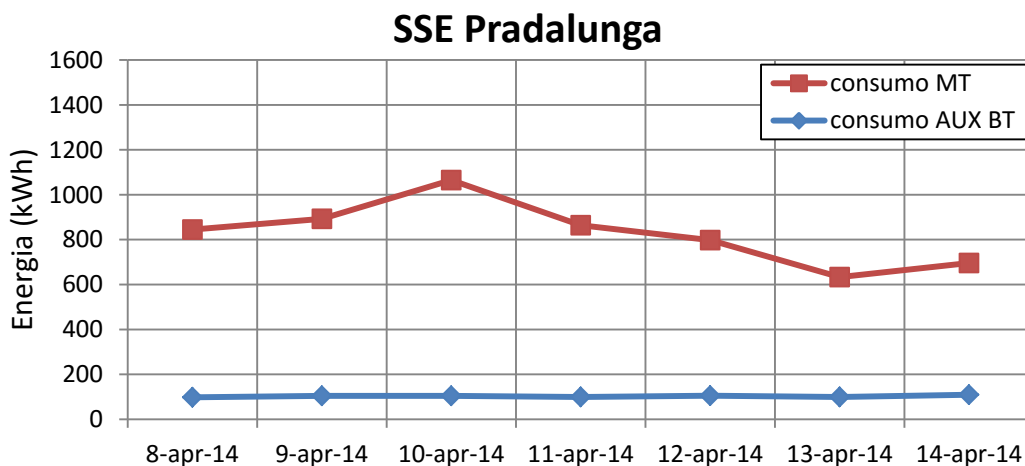
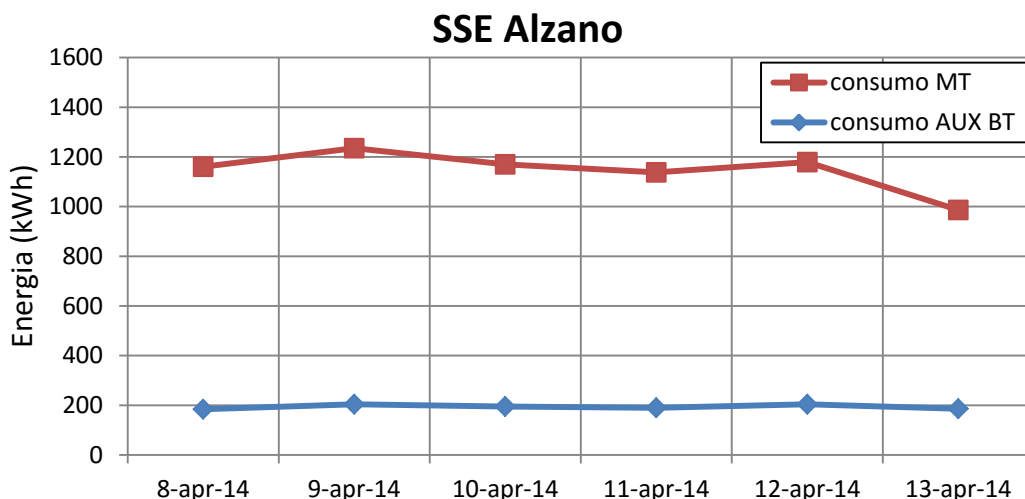
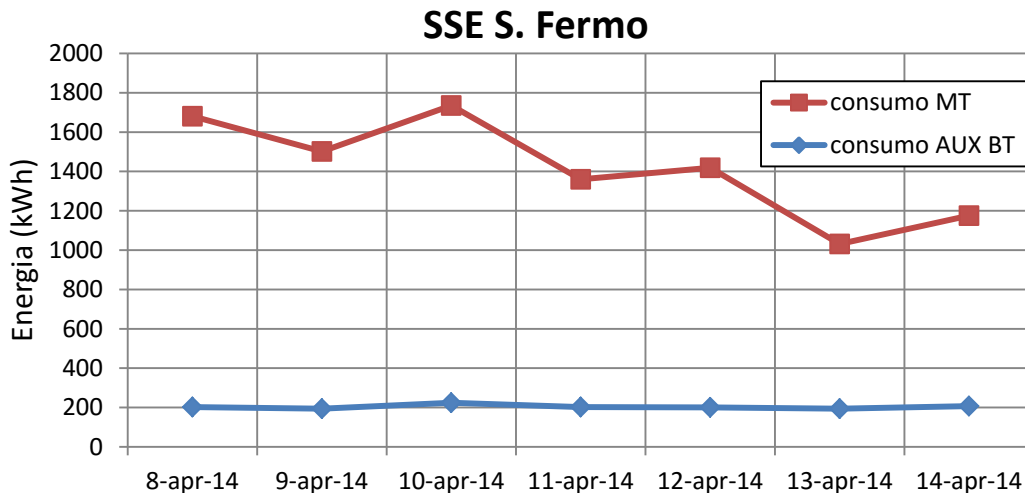
### SSE Albino - ora di punta



### 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 3. I grafici sono riferiti a tre sottostazioni di alimentazione, all'interno di una settimana tipo.



## 6 Riferimenti bibliografici

1. M. Ceraolo, M. Conte, R. Giglioli, G. Lutzemberger, M. Pasquali: "Use of electrochemical storage in substations to enhance energy and cost efficiency of tramways", AET Annual Conference, 3-5 Oct. 2013, Mondello (Palermo).
2. M. Ceraolo, G. Lutzemberger, M. Funaioli, L. Sani, D. Poli: "Electricity Storage to Enhance Energy and Cost Efficiency of Urban Rail-road Systems", The Second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance to be held in Ajaccio, Corsica, France 8-11 April 2014.
3. M. Ceraolo, R. Giglioli, G. Lutzemberger, M. Conte, M. Pasquali: "Sistemi di accumulo in linee tranviarie", AET, vol. 101, pagine 46-53, 2014, issn: 1825-828X.
4. M. Ceraolo, G. Lutzemberger: "Stationary and on-board storage systems to enhance energy and cost efficiency of tramways", Journal Of Power Sources, vol. 264, pp. 128-139, 2014.
5. S. Barsali, P. Bolognesi, M. Ceraolo, M. Funaioli, G. Lutzemberger: "Cyber-Physical Modelling of Railroad Vehicle System using Modelica Simulation Language", Railways 2014, 8-11 Apr. 2014, Ajaccio, Corsica.
6. M. Ceraolo, G. Lutzemberger: "Electro-mechanical modelling and simulation of railroad vehicle system using Modelica language", The International Journal of Railway Technology, *accepted for publication*.
7. M. Ceraolo, R. Giglioli, G. Lutzemberger, A. Bechini: "Cost effective storage for energy saving in feeding systems of tramways", IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC 2014), 17-19 Dec. 2014, Firenze.
8. PVGIS sito web: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>

## 7 Curricula del gruppo di lavoro

### **Stefano Barsali (1969)**

ha conseguito laurea e dottorato di ricerca in Ingegneria Elettrica presso l'Università di Pisa nel 1994 e 1998 rispettivamente. Dal 2000 è stato ricercatore dall'ottobre 2006 è professore associato presso l'Università di Pisa dove è attualmente titolare degli insegnamenti di "Sistemi di produzione dell'energia elettrica" e "Dinamica e controllo dei sistemi elettrici per l'energia" del corso di laurea magistrale in Ingegneria Elettrica. Dal dicembre 2012 è presidente del Consiglio di Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica. Nel dicembre 2013 ha conseguito l'abilitazione scientifica nazionale alle funzioni di professore universitario di prima fascia nel settore concorsuale 09/E2 – Ingegneria dell'Energia 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 ed attualmente partecipa ai lavori del WG C6.30 "Impact of battery energy storage systems on distribution networks". I principali temi della ricerca svolta più di recente sono:

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

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

### **Fabio Bonsignori (1960)**

Fabio Bonsignori ha conseguito il diploma di perito industriale, specializzazione Elettrotecnica, presso l'I.T.I.S "L. da Vinci" Pisa, nell'a.s. 1978/79. Dal 1/06/1980 al 31/12/1988 ha lavorato come dipendente della ditta Montesi snc, settore impianti elettrici, con la qualifica di operaio. Dal 2/01/1989 è in servizio presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni-DESTEC (ex Dipartimento dei Sistemi Elettrici e dell'Automazione DSEA) dell'Università di Pisa, con la qualifica di dipendente tecnico di Livello D1. Successivi corsi frequentati: "Sicurezza, prevenzione e formazione sul luogo di lavoro", presso Università di Pisa, Corso di Lingua inglese (Livello elementare e pre-intermedio).

### **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.

### **Davide Poli (1972)**

Nel luglio 1991 ha ottenuto la maturità scientifica a pieni voti presso il Liceo Statale "Giosuè Carducci" di Volterra. Durante il periodo 1994-96 ha ricevuto una borsa di studio Siemens per studenti della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Pisa, su base di merito; tale borsa gli ha permesso vari soggiorni di studio e tirocinio in Germania. Nel luglio 1997 si è laureato con lode in Ingegneria Elettrica presso l'Università di Pisa, 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", con relatori i professori Luigi Paris e Paolo Pelacchi. Dal 1998 al 2001 ha frequentato presso la stessa Università il corso di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Elettrotecnica (XIV ciclo). In tale ambito si è occupato dell'analisi di sistemi elettrici liberalizzati (California, Spagna, Inghilterra, PJM, Italia) e di problematiche di tariffazione per clienti idonei e vincolati. Ha concluso il corso di dottorato con una tesi dal titolo: "Mercati elettrici liberalizzati – Analisi del funzionamento e tecniche di simulazione". Il 1° agosto 2001 è diventato ricercatore universitario nel settore scientifico disciplinare INGIND/33 "Sistemi Elettrici per l'Energia", con afferenza al Dipartimento di Sistemi Elettrici e Automazione dell'Università di Pisa, poi divenuto DESE e infine DESTEC (Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni). E' stato confermato in ruolo nel 2004. E' abilitato alla professione di ingegnere. Nel dicembre 2013 ha ottenuto l'Abilitazione Scientifica Nazionale (ASN 2012) al ruolo di professore di seconda fascia nel Settore Concorsuale 09/E2 "Ingegneria dell'energia elettrica". A fine ottobre 2014 è risultato vincitore di procedura selettiva ex art.18 legge 240/2010 per Professore di seconda fascia (professore associato) nel Settore Concorsuale 09/E2 "Ingegneria dell'energia elettrica" – Settore Scientifico Disciplinare ING-IND/33 "Sistemi Elettrici per l'Energia" ed è stato chiamato in ruolo dal DESTEC il 13 novembre 2014.