



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO

Accordo di Programma MISE-ENEA

RICERCA DI  
SISTEMA ELETTRICO

ENEA

AGENZIA NAZIONALE  
PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA  
E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

# Esempi applicativi dell'accumulo in reti elettriche

DESTEC



UNIVERSITÀ DI PISA

Massimo Ceraolo  
Romano Giglioli  
Giovanni Lutzemberger  
Davide Poli

Mario Conte  
Manlio Pasquali  
Francesco Vellucci  
Stefano Constà



.....  
ENEA, Unità di Progetto Ricerca di Sistema Elettrico  
Roma, 3 Luglio 2015



## Analisi sperimentale di applicazioni rappresentative e relativi cicli di lavoro di sistemi di accumulo elettrochimico

- Introduzione di un accumulo gestionale su sistemi basati sulla conversione di energia elettrica in energia meccanica per migliorarne l'efficienza energetica e gli scambi con la rete elettrica di alimentazione.
- Identificazione di microcicli rappresentativi di funzionamento per l'accumulo, caratterizzati da valori di potenza di scambio elevati rispetto alla energia scambiata, relativamente piccola, sintesi di cicli test ad essi equivalenti.
- Sviluppo di analisi tecnico-economiche basate su criteri di dimensionamento dell'accumulo le applicazioni considerate
- Sperimentazione per la verifica del comportamento dei dispositivi in relazione alla loro vita utile, quando sottoposti a centinaia di migliaia (milioni) di micro-cicli

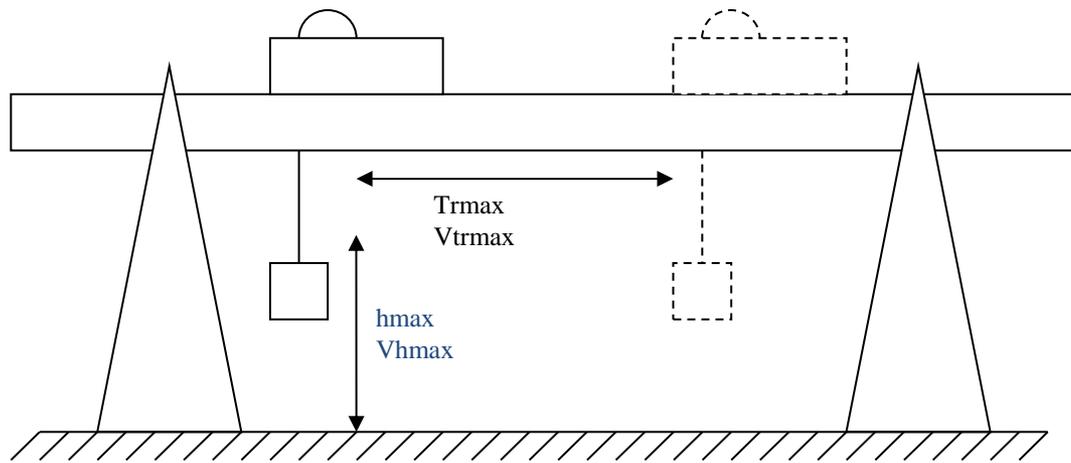
## Selezione di applicazioni diffuse o con caratteristiche generalizzabili ad altri casi di studio

### ➤ Sistemi per la mobilità di oggetti

- ✓ Carroponte (con uso di supercondensatori)

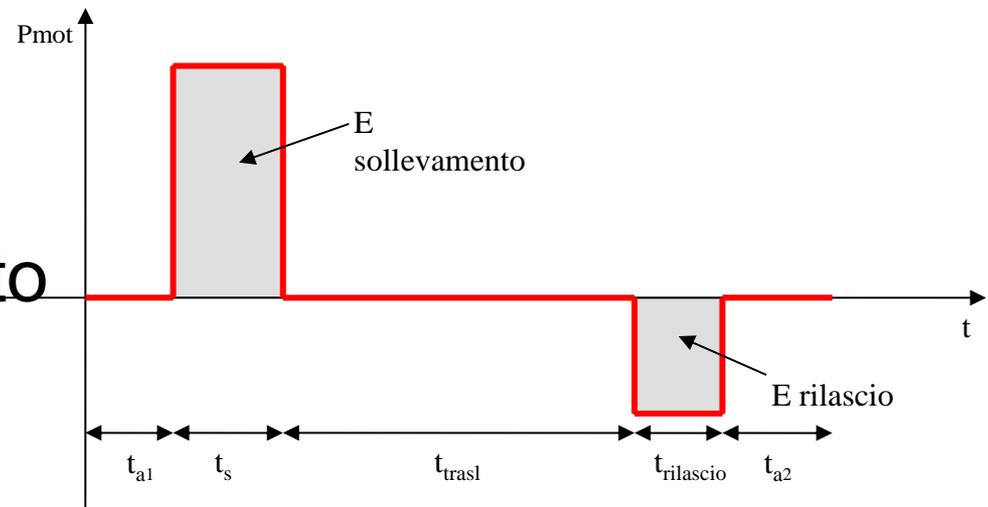
### ➤ Sistemi per la mobilità delle persone

- ✓ Funicolare (Bergamo San Vigilio, utilizzo di un modulo di batterie)
- ✓ Metropolitana leggera (Bergamo, utilizzo di più moduli di batterie)

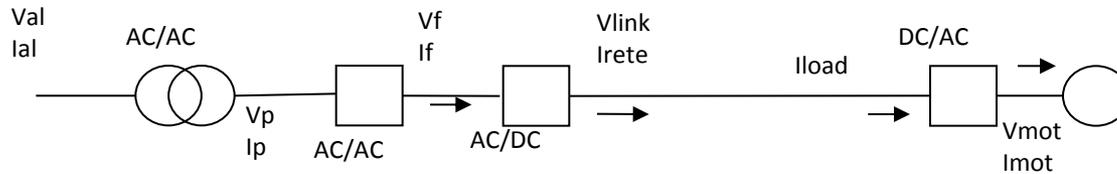


Possibilità di recuperare l'energia potenziale

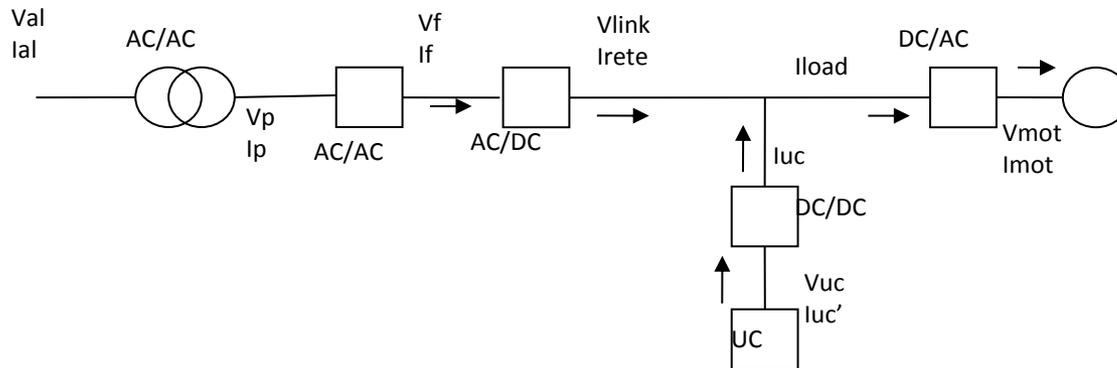
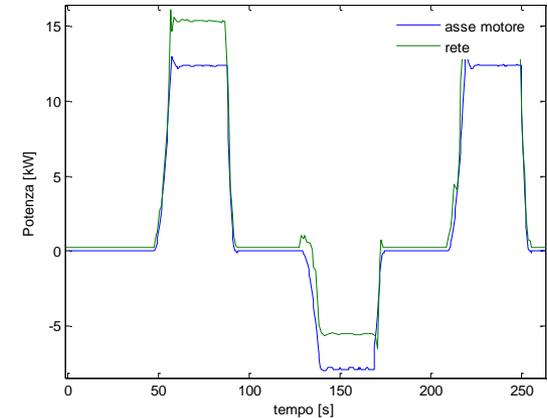
Potenza/Energia  
All'asse dell'azionamento



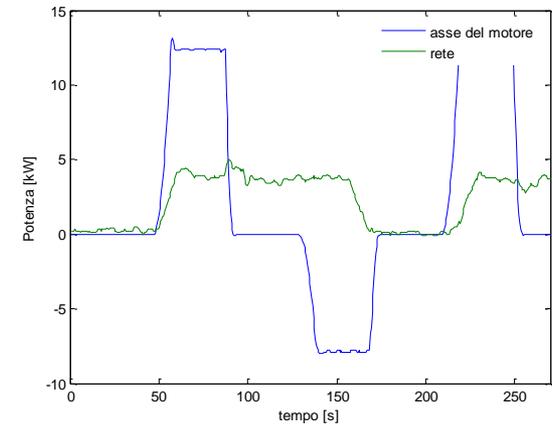
# Accumulo con Supercondensatori - Carroponte



Configurazione senza accumulo



Configurazione con accumulo



Riduzione Potenza/Energia richiesta alla rete



Azionamento del carroponte per prove in banco

## Carroponte – risultati dei test al banco

Ciclo	Recupero	SC	Max Ptraz [kW]	Max Prec [kW]	Erete [Wh]
Max load	no	no	15.40	0	1.260
Max load	no	si	3.9	0	1.317
Max load	si	no	15.40	-5.54	0.748
Max load	si	si	3.9	0	0.862
½ load	no	no	10.08	0	0.917
½ load	no	si	3.9	0	1.004
½ load	si	no	10.08	1.9	0.651
½ load	si	si	3.9	0	0.745

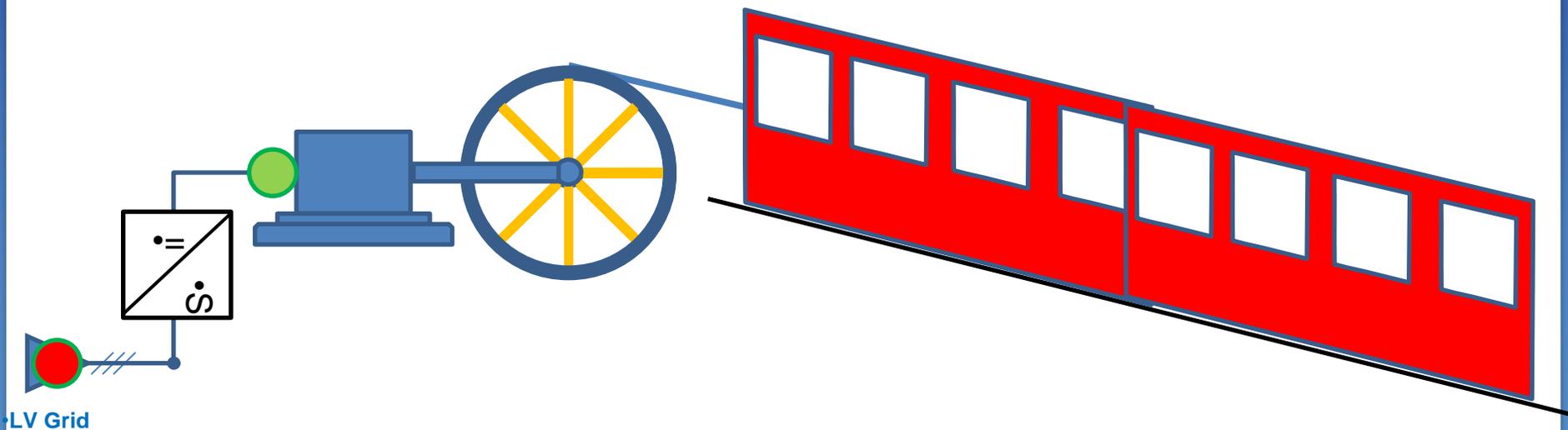
Ciclo	Recupero	SC	Ptr/Pt base	Δ% Ebase
Max load	no	no	1	0
Max load	no	si	0.25	+4.52
Max load	si	no	1	-40.63
Max load	si	si	0.25	-31.58
½ load	no	no	1	0
½ load	no	si	0.38	+9.48
½ load	si	no	1	-29.00
½ load	si	si	0.38	-18.76

SC → Prete=1/4 di Prete NO SC, Erete =- 31.58 %

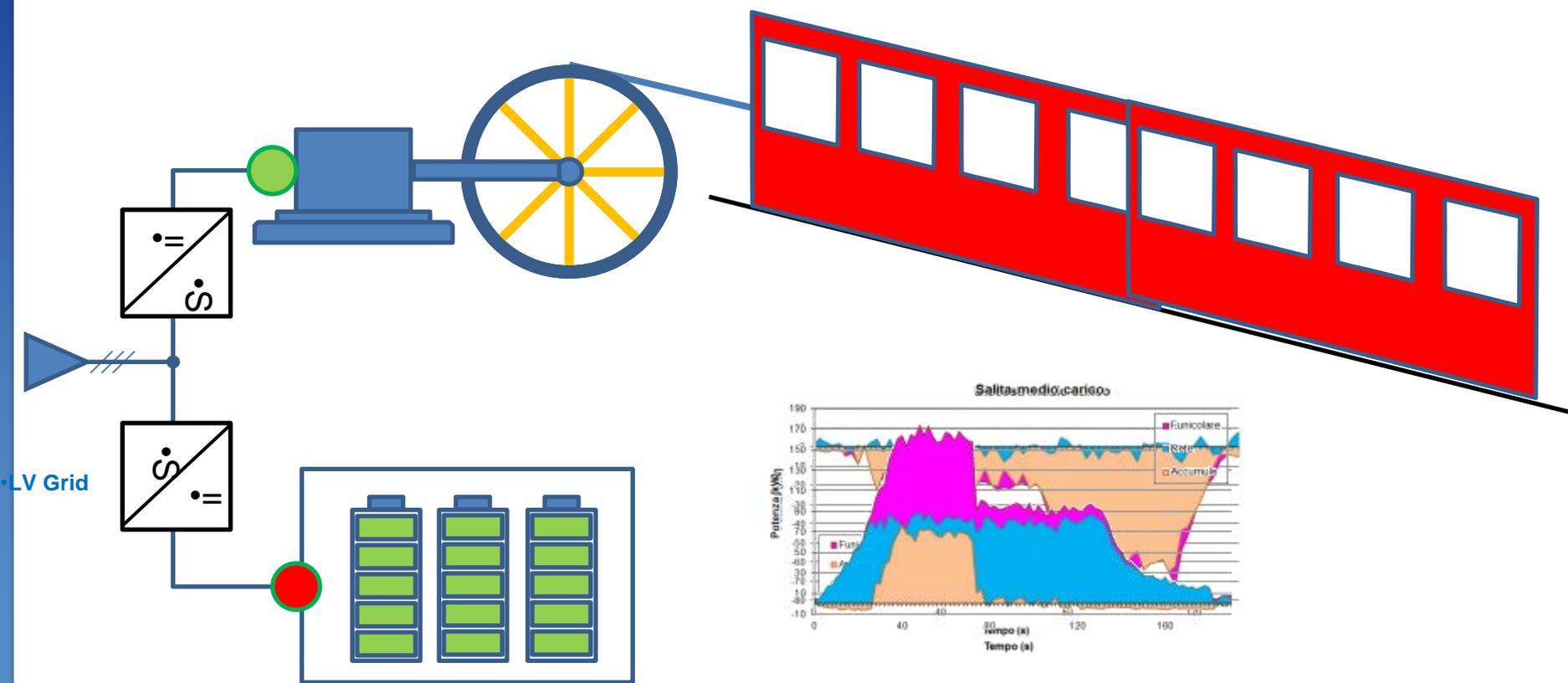
Sviluppo:

Algoritmi evoluti di stima del peso del carico e della posizione

## San Vigilio: Senza il Sistema di compensazione sull'impianto



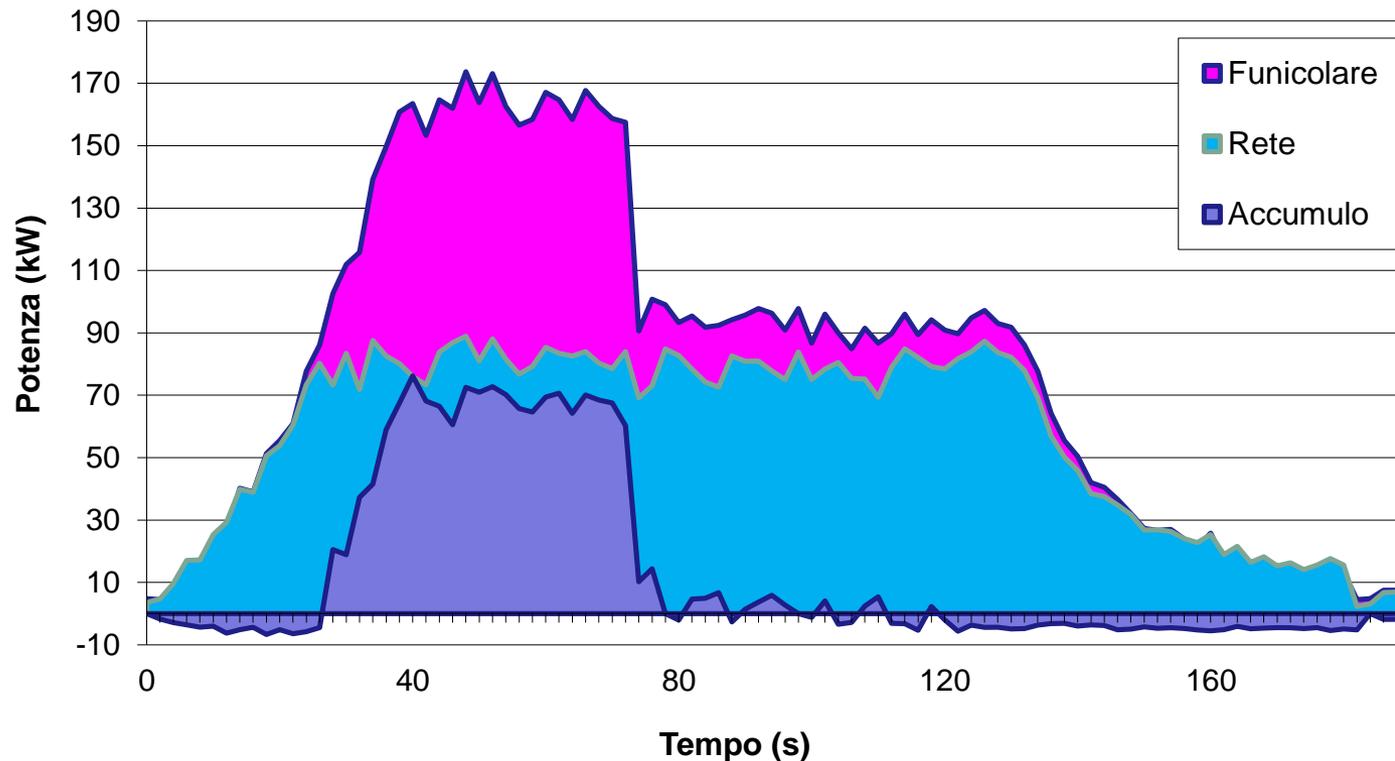
## San Vigilio: Con Il Sistema di compensazione



## Assorbimenti

- Salita a medio carico: potenze elettriche.
- La rete eroga un valore di potenza costante, la batteria fornisce il picco di potenza richiesta

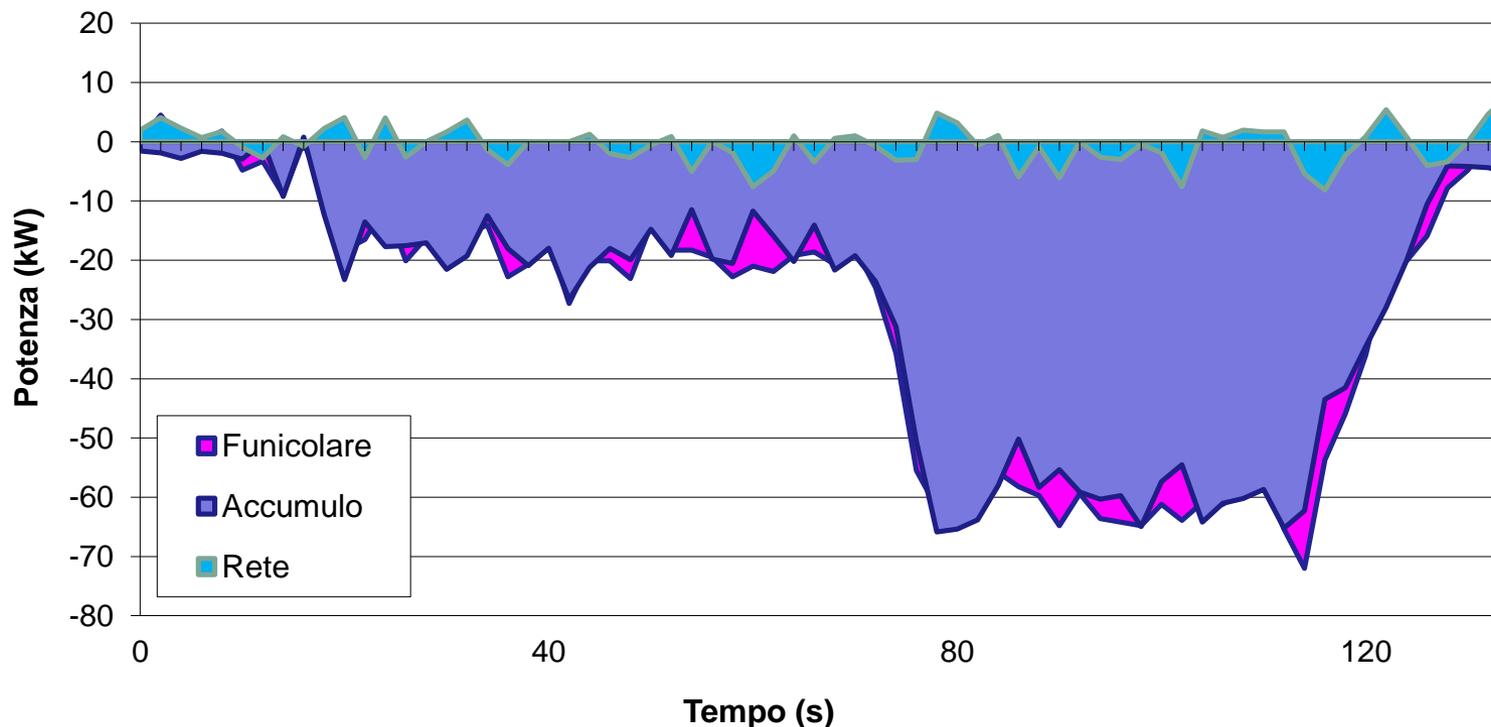
Salita medio carico



## Assorbimenti

- ❑ Discesa a medio carico: potenze elettriche.
- ❑ In questo caso tutta l'energia recuperata viene immagazzinata nell'accumulo, senza essere rimandata in rete

### Discesa medio carico





## Gestione termica del pacco batterie:

L'attività ha richiesto l'approfondimento del tema della gestione termica delle batterie.

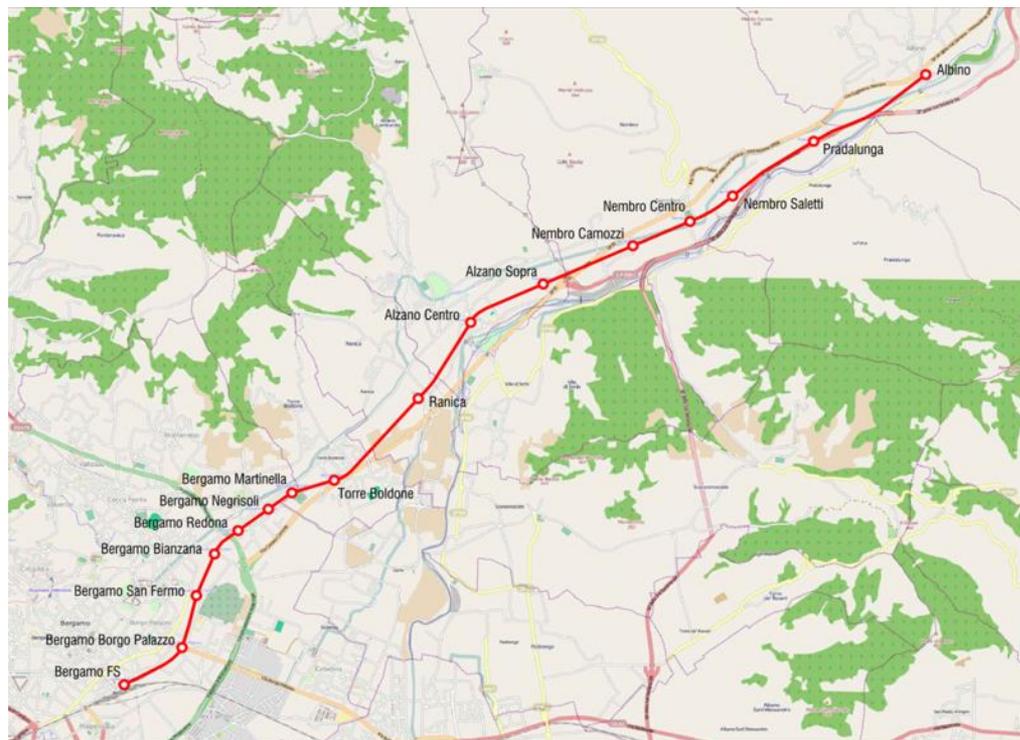
Il controllo della temperatura è stato ottenuto tramite un contenitore e delle procedure di controllo studiate per questa specifica applicazione ma che sono state la base per lo sviluppo di altri progetti

## Risultati ottenuti

- Misura dell'energia erogata dalle rete da Ottobre a Febbraio per due anni consecutivi in due configurazioni, senza e con accumulo.
- In assenza di accumulo, è stato rilevato un consumo pari a 51595 kWh.
- Con accumulo, l'energia erogata è risultata pari a 37851 kWh, la riduzione è stata dunque pari al 27%.
- La potenza richiesta alla rete di alimentazione primaria è diminuita del 50 %

# Metro leggera di Bergamo

- Lunghezza linea: 12413 m
- Numero di sottostazioni: 10
- Tram in contemporanea:
  - ✓ 10 (Orario di Picco)
  - ✓ 5 (Orario basso hours)
  - ✓ 3 (feste)
- Percorso con tratti inclinati



Studio per l'installazione di uno o più moduli batterie nelle sottostazioni di alimentazione della rete tranviaria (SSE)

# Metro leggera di Bergamo

## Caratteristiche sottostazioni

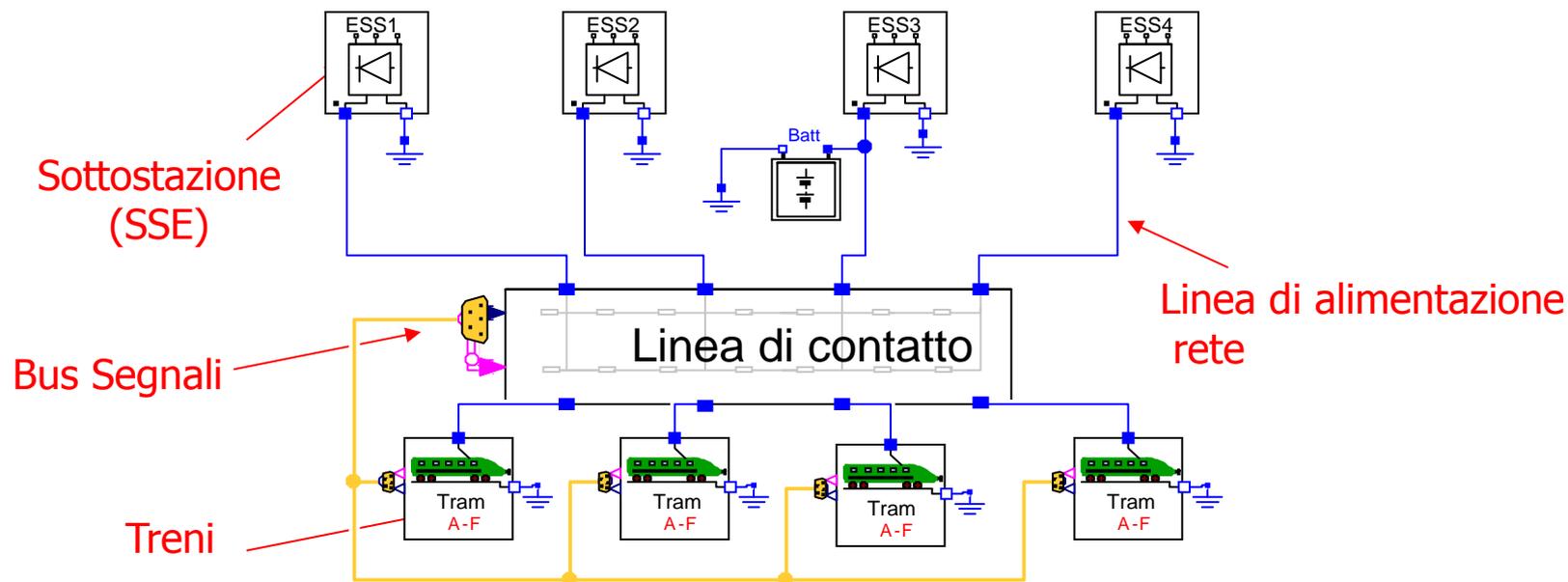
- Tensione a vuoto: 796 V
- Potenza nominale: 1800 kW
- Corrente nominale: 2400 A

## Caratteristiche vetture

- Massa a vuoto: 41.9 t
- Massa di carico: 17.4 t
- Potenza massima: 628 kW
- Massima tensione: 900 V
- Tensione nominale: 750 V
- Minima tensione: 500 V



## Simulatore della linea Tramviaria (UniPISA)



Simulazione della rete di alimentazione

Simulazione della dinamica – azionamento delle vetture

Parametri tempovarianti (Posizione delle vetture)

## Parametrizzazione e validazione del simulatore

### Confronto con misure di assorbimento delle SSE

SSE	Energia Misurata (kWh)	Energia Calcolata (kWh)	SSE	Energia Misurata (kWh)	Energia Calcolata (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
Nemb. C.	389.4	383.0	Nemb. S.	345.7	441.1
Pradal.	412.7	447.2	Albino	877.1	801.8
<b>Total</b>	<b>7316.4</b>	<b>7270.0</b>			



Lo scarto tra le misure sul campo ed i dati del simulatore è minimo

## Recupero Energia con moduli installati nelle SSE

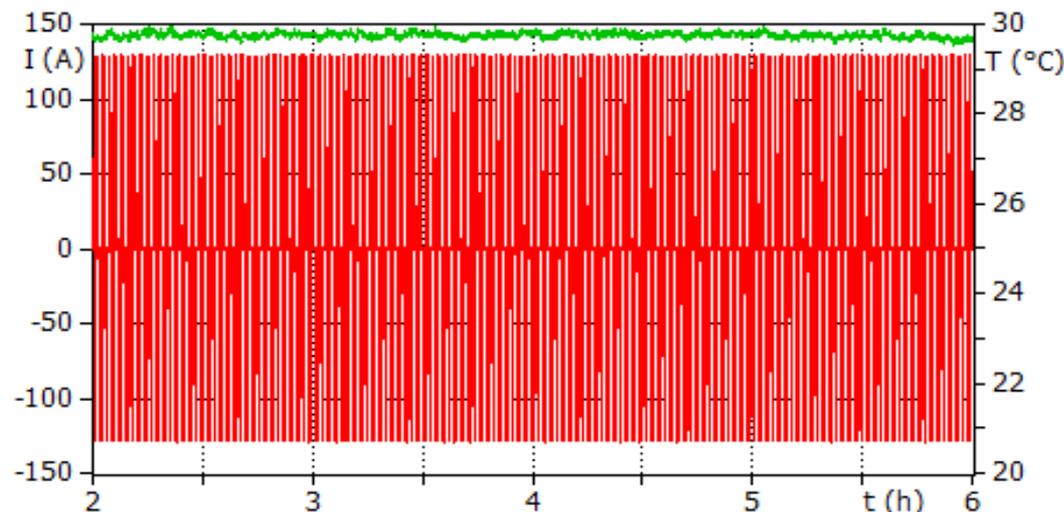
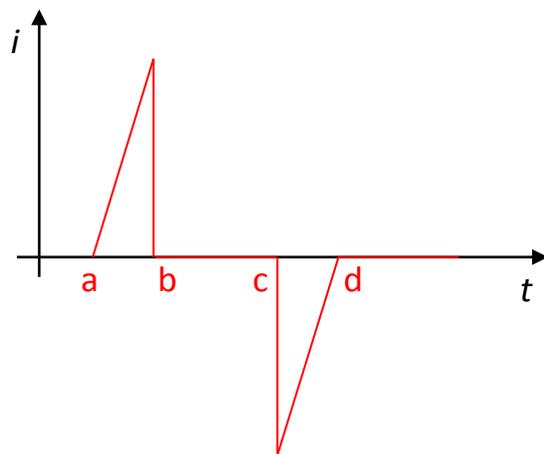
- ❑ Dissipazione di energia con la frenatura su resistenza (A).
- ❑ Recupero sulla catenaria con limite di tensione 900 V (B).
- ❑ Recupero energetico con catenaria a 900 e n moduli accumulo (C-n).
- ❑ Energia recuperata rispetto al caso B (recupero senza accumulo).

Caso	Energia assorbita (MWh/y)	Energia Recuperata (MWh/y)	Risparmio su sistema base (MWh/y)
A	3100	0	-
B	2869	206	0
C-1	2612	568	256.4
C-2	2397	843	471.6
C-3	2049	1225	819.5
C-4	1820	1471	1048.8
C-5	1769	1521	1099.5
C-10	1641	1606	1227.9

L'analisi costi benefici mostra la convenienza dell'installazione di tre moduli di batterie in tre sottostazioni distinte

- In tutti gli esempi riportati l'accumulo è sottoposto a cicli a ridotta profondità di carica-scarica, con variazioni del SOC nell'ordine di pochi punti percentuale.
- E' stata effettuata un'attività sperimentale per la verifica del comportamento dei dispositivi, in particolare riguardo alla vita a cicli.
- Si sono sviluppati cicli equivalenti a quelli di esercizio ma riproducibili in laboratorio

mmetrica in carica e  
iplessiva 60 secondi).



Dopo circa 200 000 micro-cicli, la capacità estratta dalla cella in prova è rimasta sostanzialmente immodificata rispetto al valore iniziale.

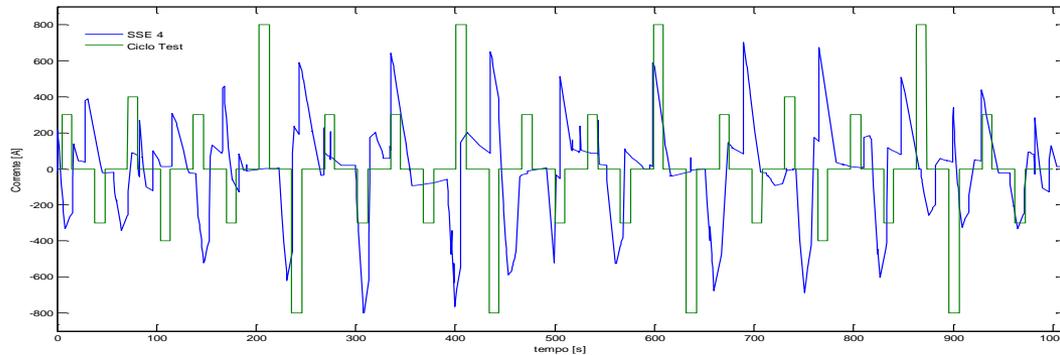
Ciò lascia presumere che sotto questa sollecitazione la cella sia in grado di sostenere diverse centinaia di migliaia di micro-cicli (probabilmente un milione).

# Costruzione cicli test da laboratorio

Ciclo di lavoro reale ➡ Ciclo equivalente di prova da laboratorio per prova vita

Ciclo di laboratorio ➡ “Classi” di cicli di prova raggruppabili tra di loro

Utilità: stima della vita di un sistema di accumulo su applicazioni reali equivalenti alla ‘Classe’ considerata (equivalenza = corrente di picco, dissipazione delta soc)



Sottostazione	Corrente Massima[A]	Corrente Minima [A]	$\Delta SOC_{if}$	$\Delta SOC_{max}$	Ejoule [kJ]
SSE 1	800	-800	-0.01	-0.04	168
SSE 4	701	-800	-0.02	-0.03	198
SSE 9	426	-470	-0.01	-0.03	45
Ciclo Test	800	-800	0.00	-0.02	224

- ✓ L'analisi sviluppata sui casi studio presentati ha messo in evidenza l'importanza di caratterizzare le sollecitazioni da micro-cicli e sulla base di questa definire la vita utile dell'accumulatore.
- ✓ I risultati ottenuti sia in termini di criteri di dimensionamento che di benefici nella gestione energetica ed economica in relazione ai casi studio, sono estendibili a moltissime altre applicazioni degli accumulatori elettrochimici come dispositivi in grado di migliorare la gestione di un sistema.
- ✓ Individuati cicli per la caratterizzazione in laboratorio