

**ENEA**

Ente per le Nuove tecnologie,  
l'Energia e l'Ambiente



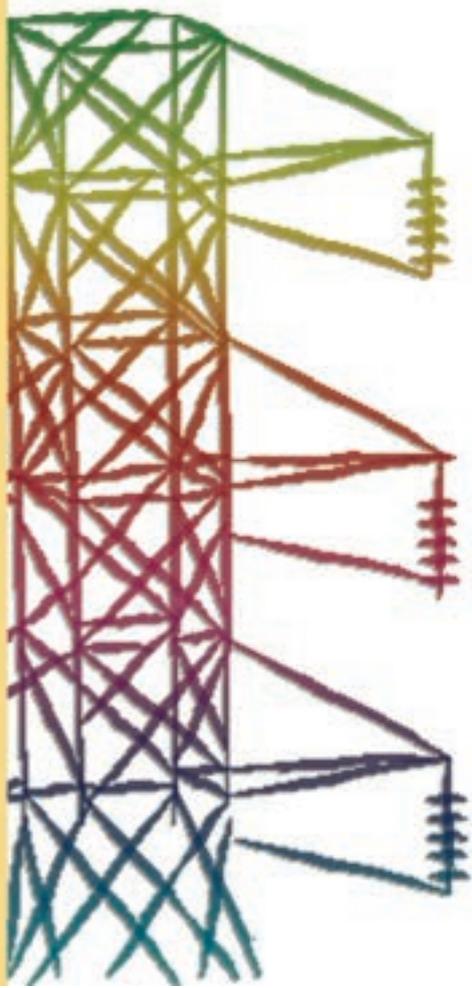
*Ministero dello Sviluppo Economico*

**RICERCA SISTEMA ELETTRICO**

---

## **Accumulo elettrico con batterie nel terziario: l'applicazione ad una funivia**

**Massimo Ceraolo, Antonio Di Donato**





Ente per le Nuove tecnologie,  
l'Energia e l'Ambiente



*Ministero dello Sviluppo Economico*

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

## Accumulo elettrico con batterie nel terziario: l'applicazione ad una funivia

*Massimo Ceraolo, Antonio Di Donato*



UNIVERSITÀ DI PISA

## ACCUMULO ELETTRICO CON BATTERIE NEL TERZIARIO: L'APPLICAZIONE AD UNA FUNIVIA

Massimo Ceraolo, Antonio Di Donato (Dipartimento di Sistemi elettrici e Automazione dell'Università di Pisa)

Aprile 2009

Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Usi finali

Tema: Promozione delle tecnologie elettriche innovative negli usi finali

Responsabile Tema: Ennio Ferrero, ENEA

## INDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE</b> .....	<b>5</b>
1.1	GENERALITÀ.....	5
1.2	POSSIBILITÀ DI INSERIZIONE DEL SISTEMA DI ACCUMULO.....	6
<b>2</b>	<b>ATTIVITA' 1: ANALISI DEI CARICHI DELLE FUNIVIA</b> .....	<b>7</b>
2.1	DESCRIZIONE DEL CASO-STUDIO CONSIDERATO.....	7
2.2	ANALISI DEI CARICHI DELL'IMPIANTO .....	8
<b>3</b>	<b>ATTIVITA' 2: ANALISI DEI POSSIBILI BENEFICI DELL'INTRODUZIONE DI SISTEMI DI ACCUMULO</b> .....	<b>10</b>
3.1	LOAD LEVELLING.....	11
3.2	PEAK SHAVING .....	14
3.3	TIPI POSSIBILI DI SISTEMI DI ACCUMULO .....	16
3.4	VALUTAZIONE DEI BENEFICI IN FUNZIONE DI TIPOLOGIA E TAGLIA DEL SISTEMA DI ACCUMULO.....	17
<b>4</b>	<b>ATTIVITA' 3: PROGETTAZIONE DI DETTAGLIO E LAYOUT</b> .....	<b>20</b>
4.1	PROGETTAZIONE NEL CASO DI UTILIZZO DI SUPERCONDENSATORI.....	20
4.2	PROGETTAZIONE NEL CASO DI UTILIZZO DI ACCUMULATORI AL PIOMBO-ACIDO .....	25
4.3	PROGETTAZIONE NEL CASO DI UTILIZZO DI ACCUMULATORI AL LITIO POLIMERO .....	29
4.4	DIMENSIONAMENTO E LAYOUT NEL CASO PRESCELTO .....	36
<b>5</b>	<b>ANALISI DEI COSTI</b> .....	<b>39</b>
5.1	DETERMINAZIONE DELLA FUNZIONE DI COSTO .....	41
5.2	VITA UTILE DELL'IMPIANTO .....	42
5.3	CONVERTITORE DI RETE.....	42
5.4	SISTEMA DI ACCUMULO .....	42
5.4.1	<i>Costi per la soluzione con Supercondensatori</i> .....	44
5.4.2	<i>Costi per la soluzione con accumulatori al Piombo</i> .....	45
5.4.3	<i>Costi per la soluzione con accumulatori al Litio-Polimero</i> .....	46
5.5	BALANCE OF PLANT (BOP) .....	47
<b>6</b>	<b>ANALISI DEI BENEFICI</b> .....	<b>47</b>
6.1	MODALITÀ DI FUNZIONAMENTO DELL'IMPIANTO .....	48
6.2	DETERMINAZIONE DEL COSTO DELL'ENERGIA CONSUMATA .....	49
6.3	CALCOLO DEI BENEFICI ECONOMICI IN NORMALI CONDIZIONI DI FUNZIONAMENTO DELL'IMPIANTO .....	49
<b>7</b>	<b>RISULTATI DELLE ANALISI PER LE VARIE TECNOLOGIE DEL SISTEMA DI ACCUMULO CONSIDERATE</b> .....	<b>51</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONI</b> .....	<b>53</b>
<b>9</b>	<b>ALLEGATO 1</b> .....	<b>54</b>
<b>10</b>	<b>GENERALITÀ</b> .....	<b>56</b>
<b>11</b>	<b>PREREQUISITI E PREPARAZIONE DEL TEST</b> .....	<b>57</b>
11.1	EQUIPAGGIAMENTO DI PROVA .....	57
11.2	PUNTI DI MISURA .....	58
<b>12</b>	<b>PROVE DA EFFETTUARE</b> .....	<b>59</b>
12.1	GENERALITÀ.....	59
12.2	DEFINIZIONE DELLE TIPOLOGIE DI PROVE .....	59
12.2.1	<i>Set di prove preliminari</i> .....	59
12.2.2	<i>Individuazione della massima potenza <math>P_{mxCVE}</math></i> .....	59

12.2.3	<i>Prove di Identificazione Parametri</i> .....	60
12.2.4	<i>Prova di invecchiamento</i> .....	61
12.3	ELENCO DELLE PROVE .....	61
<b>13</b>	<b>APPENDICE A: DEFINIZIONI E PROCEDURE DI PROVA</b> .....	<b>63</b>
13.1	DEFINIZIONI.....	63
13.1.1	<i>Terminazione assoluta</i> .....	63
13.1.2	<i>Scarica completa a corrente costante (S-C/n o S-nC)</i> .....	63
13.1.3	<i>Carica Standard (CS)</i> .....	63
13.1.4	<i>Pausa (P-## o P-###)</i> .....	63
13.1.5	<i>Potenza massima iniziale (<math>P_M</math>)</i> .....	63
13.2	PROVE E CICLI ELEMENTARI.....	64
13.2.1	<i>Ciclo-Vita Elementare (CVE)</i> .....	64
13.2.2	<i>Profilo di potenza della fase di scarica</i> .....	64
13.2.3	<i>Profilo di tensione e corrente della fase di carica</i> .....	65
13.3	DEFINIZIONE DELLA PROVA DI RESISTENZA INTERNA E TENSIONE A CIRCUITO APERTO .....	66
<b>14</b>	<b>APPENDICE B: RAPPRESENTAZIONE DEI RISULTATI</b> .....	<b>67</b>
14.1	RISULTATI DELLE PROVE PRELIMINARI .....	68
14.2	INDIVIDUAZIONE DELLA POTENZA DEL CICLO DI PROVA $P_{MxCVE}$ .....	68
14.3	PROVA COMPLETA DI IDENTIFICAZIONE PARAMETRI .....	69
14.4	PROVA PARZIALE DI IDENTIFICAZIONE PARAMETRI .....	69
14.5	PROVA DI INVECCHIAMENTO .....	69

# 1 INTRODUZIONE

## 1.1 Generalità

Gli impianti di trasporto per brevi distanze, quali metropolitane, impianti a fune, a nastro, ecc., sono caratterizzati da un moto e da un carico trasportato estremamente variabili nel tempo. Ciò si ripercuote sulla potenza richiesta all'azionamento, che, nella maggior parte dei casi, è di tipo elettrico. Questa forte variabilità dell'assorbimento di potenza penalizza l'esercente dell'impianto sia per l'acquisto dell'energia, sia per le accresciute perdite di energia nello stesso impianto. Dall'altro lato il distributore dell'energia a fronte di una potenza, anche rilevante, da mettere a disposizione con i propri impianti vede un transito di energia piuttosto limitato (basso numero di ore equivalenti di carico annuo).

La possibilità di inserire un sistema di accumulo sull'alimentazione dell'impianto può migliorare notevolmente l'esercizio dell'intero sistema sia in termini di minore potenza richiesta che di minore energia richiesta. Occorre, però, una precisa analisi economica per decidere se i maggiori investimenti nel sistema di accumulo sono utilmente bilanciati dai risparmi di esercizio.

Il presente studio concerne il dimensionamento di un sistema accumulo elettrochimico applicato all'alimentazione di un impianto a fune.

Il sistema di alimentazione è chiamato ad inseguire la richiesta di potenza, variabile nel tempo, rendendo disponibile un vettore energetico di qualità (per garantire un corretto funzionamento dei dispositivi alimentati).

In questo contesto l'accumulo di energia può essere indispensabile o, comunque, importante ai fini del corretto esercizio dell'intero sistema.

In generale le funzioni che l'accumulo può svolgere sono:

- *Strategica*: quando l'accumulo è necessario affinché il sistema, di cui è parte, possa espletare la funzione assegnata (l'esempio più immediato è quello dell'accumulo energetico sottoforma di energia potenziale chimica nel combustibile presente nel serbatoio di un automobile).
- *Gestionale*: quando l'accumulo, ancorché non indispensabile, è utilizzato nel sistema per migliorare (ottimizzare) il funzionamento e/o la qualità del prodotto.
- *Intrinseco (funzionale)*: quando è comunque presente nel sistema fisico (esempio le inerzie nei sistemi meccanici) per condizioni "naturali" o funzionali.

## 1.2 Possibilità di inserzione del sistema di accumulo

Il sistema di accumulo deve essere posto tra la rete di alimentazione e il sistema di propulsione dell'impianto. Quest'ultimo, negli impianti tradizionali, è un azionamento elettrico che prelevando potenza da una sezione trifase alternata alimenta motori elettrici asincroni con frequenza variabile.

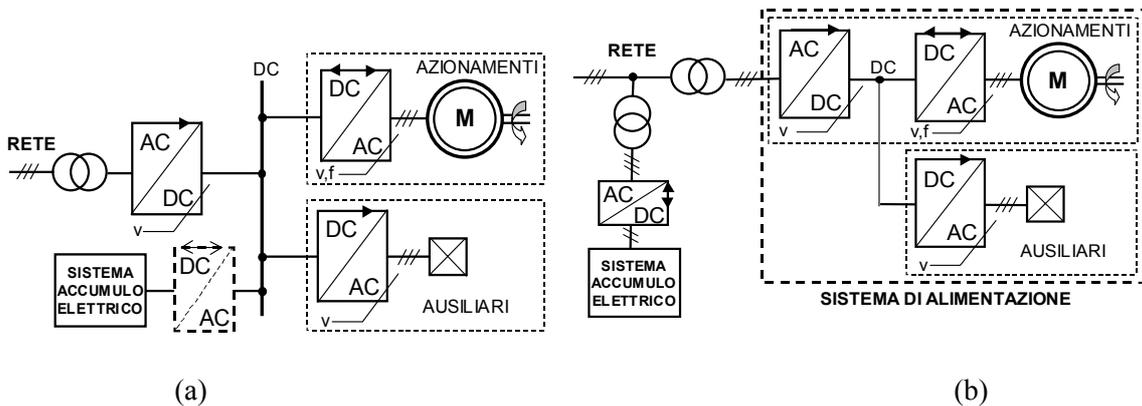


Fig. 1: Possibili schemi del sistema d'alimentazione con accumulo per un impianto a fune (la a risulta la soluzione prescelta per il dimensionamento).

In linea di principio sono possibili due schemi di inserzione del sistema di accumulo nell'attuale tipologia di impianto di alimentazione.

Lo schema (a) di figura 1 prevede un convertitore di interfaccia, collegato alla rete elettrica mediante trasformatore dedicato, che alimenta una sbarra in continua al quale sono collegate il sistema di accumulo, l'azionamento elettrico e i carichi ausiliari.

Lo schema (b) invece presenta sul punto di consegna dell'energia da parte del distributore l'attacco per il sistema di accumulo con relativo convertitore di interfaccia e trasformatore dedicato, e l'attacco del sistema di alimentazione dell'impianto (azionamento e carichi ausiliari).

Nella soluzione (a) è presente ai morsetti dell'accumulo elettrico un convertitore opzionale (realizzato a linee tratteggiate) che, se presente, ha lo scopo di adattare la tensione ai morsetti del sistema di accumulo con quella sulla sbarra (denominata in figura "DC") a cui sono connessi tutti gli altri convertitori. In assenza di questo convertitore di interfaccia la tensione della sbarra DC è uguale a quella del sistema di accumulo, e quindi variabile al variare di quella dell'accumulo, in particolare più alta durante le fasi di carica e più bassa nelle fasi di scarica.

Nella soluzione (b) la tensione è normalmente mantenuta costante garantendo l'equilibrio dei flussi di potenza dalla rete all'azionamento.

Lo schema (a) è energeticamente preferibile per quanto riguarda i flussi di potenza entranti ed uscenti dall'accumulatore, infatti ad esempio nella fase di trazione l'energia fluisce dall'accumulo all'azionamento direttamente nel caso (a), mentre passa attraverso i convertitori di accumulo e di rete nel caso (b) con relative perdite nei componenti. Inoltre la soluzione (a) permette di risparmiare un trasformatore, ed un convertitore nel caso che la connessione al bus DC avvenga senza convertitore; in caso contrario si utilizzerebbe un semplice chopper bidirezionale (a), invece di un inverter bidirezionale (b).

Per queste ragioni, nel prosieguo del presente studio si farà riferimento sempre allo schema (a).

## **2 ATTIVITA' 1: ANALISI DEI CARICHI DELLE FUNIVIA**

### **2.1 Descrizione del caso-studio considerato**

A seguito di accordi intercorsi con ENEA è stato stabilito che il caso studio da considerarsi nell'ambito delle attività previste sia è costituito dall'applicazione di un sistema di accumulo SWVC all'alimentazione dell'azionamento elettrico della funivia monocabina FUNIFOR-SAN MARTINO.

Questa funivia è caratterizzata da un primo tratto sostanzialmente in salita, con dislivello verticale nel punto più alto rispetto alla stazione di partenza di 289,0 m, ed un successivo tratto in discesa, dislivello verticale fra la stazione di partenza e quella di arrivo di 66,6 m.

Come verrà specificato meglio nel seguente paragrafo di analisi dei carichi dell'impianto, durante il tratto iniziale in salita la funivia assorbe dalla rete elettrica potenze che possono arrivare a 959 kW, mentre durante il tratto in discesa la forza traente della fune si inverte, e quindi essa è in grado di erogare potenza elettrica che può essere utilizzata per caricare il sistema di accumulo, invece di dissiparla, come invece normalmente accade in assenza di accumulo.

Terminologia. Nel seguente paragrafo di analisi dei carichi meccanici ed elettrici della funivia considerata quando si parlerà di corse "in salita" o "in discesa" rispettivamente si intenderà

riferirsi rispettivamente a corse che vanno dalla stazione con quota più bassa a quella più alta o viceversa.

## **2.2 Analisi dei carichi dell'impianto**

A partire dal carico meccanico richiesto dalla fune, descritto per carichi tipici della cabina sono stati ricavati gli andamenti dei flussi di potenza scambiati dall'azionamento con la barra in continua.

Occorre notare che l'impianto può funzionare con un numero di persone per corsa variabile, fino ad un massimo di 100, e due modalità di salita, denominate rispettivamente *salita lenta* e *salita veloce*.

Evidentemente le condizioni di carico più gravose si hanno per la salita veloce con 100 persone, che dovrà evidentemente dimensionare il sistema. Per analisi relative alla vita del sistema di accumulo da installare, peraltro, occorre valutare il numero di volte che il numero di persone è tale da richiedere l'intervento del sistema di accumulo a supporto della potenza propulsiva.

Un'analisi del comportamento del sistema corrispondente al transito di 100 persone, con le due modalità di salita, può essere svolta con riferimento alla figura 2.

A partire dagli andamenti mostrati in tale figura, per ciascuno dei cicli di lavoro sono state calcolate le potenze medie, massime e minime e i volumi di energia scambiate dall'azionamento con la barra DC, riportati nella tabella I. Inoltre vengono riportati i tempi delle fasi di trazione e di frenatura con riferimento alla potenza media di queste sui rispettivi tempi di avvenimento.

Si osserva che nel caso in cui la cabina non è completamente caricata i picchi di potenza richiesti dall'azionamento si riducono, in particolare nel ciclo salita veloce con 66 persone in cabina (si veda grafico di figura 3), il picco massimo si riduce rispetto la condizione di massimo carico (100persone) di circa 110 kW.

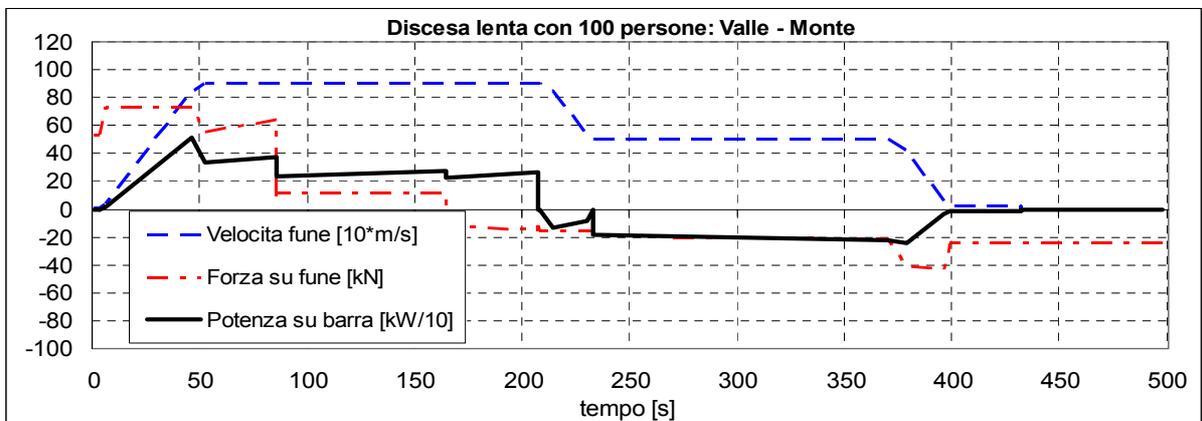
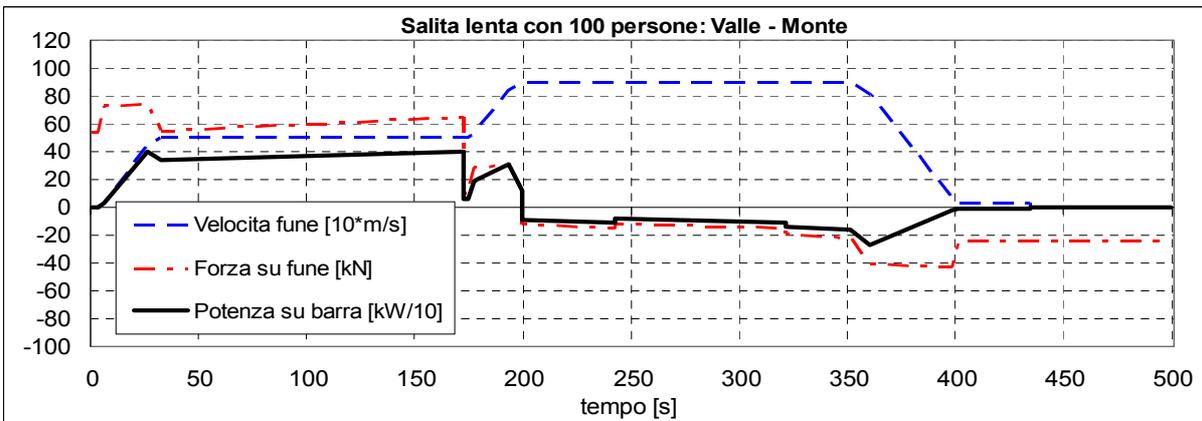
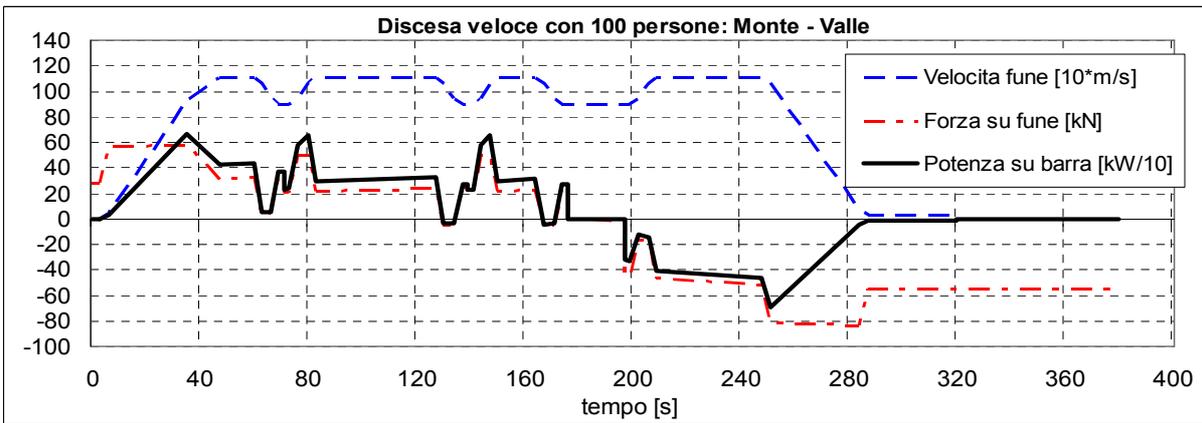
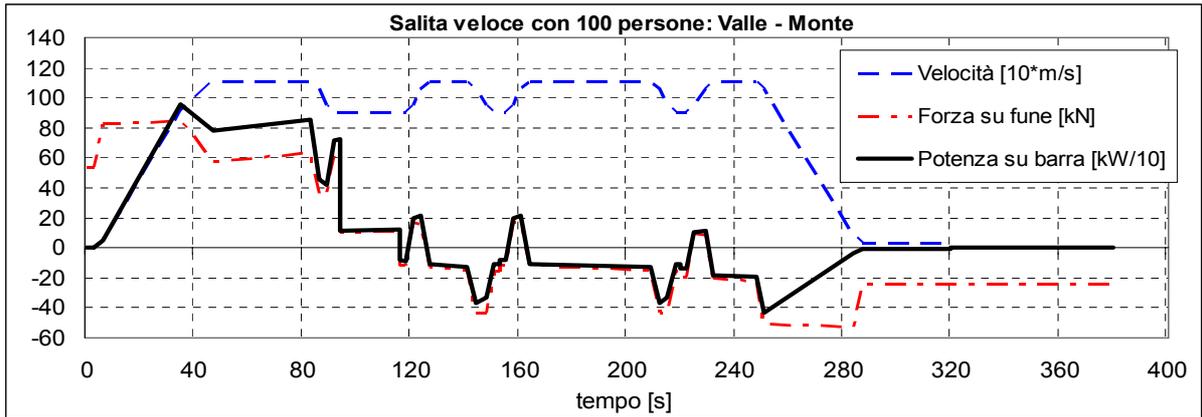


Fig. 2: Cicli di carico.

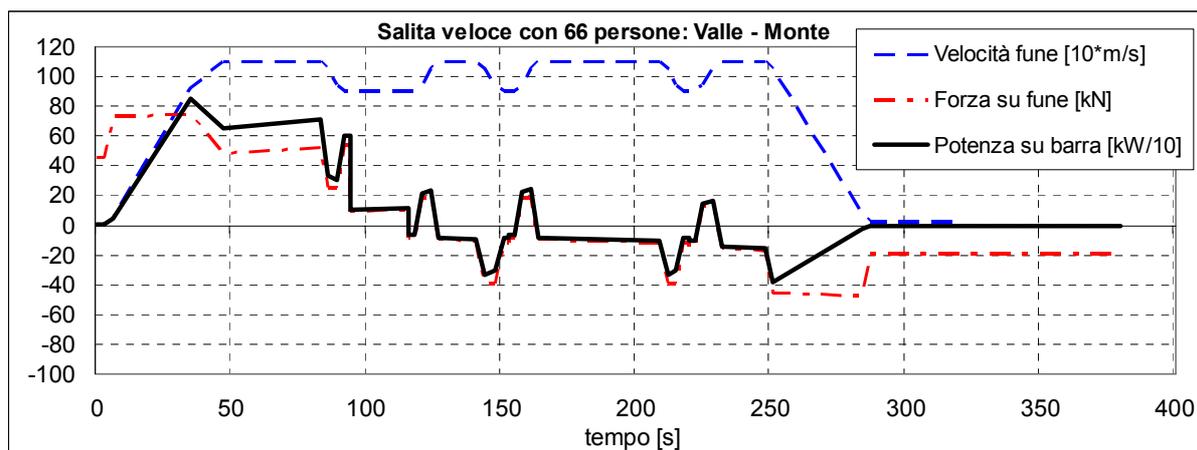


Fig. 3: Ciclo di carico Salita Veloce con 66 persone.

Tab. I: Potenze ed energie caratteristiche dei cicli di riferimento.

Cicli (carico 100 persone)	Salita Veloce	Discesa Veloce	Salita Lenta	Discesa Lenta	Salita Veloce (66persone)
Potenza media ciclo [kW]	<b>107.9</b>	54.9	80.1	41.7	95.9
Picco potenza trazione [kW]	<b>960</b>	661.3	400	508.3	847
Energia di trazione [kWh]	<b>18.55</b>	15.47	17.81	15.40	16.06
Tempo di trazione (Tt) [s]	137.6	167.8	199.7	208.8	139.4
Potenza media su Tt di trazione [kW]	<b>485.3</b>	332	321	265.5	414.7
Picco potenza frenatura [kW]	434.2	<b>694.5</b>	272.2	245	386.7
Energia di Frenatura [kWh]	7.16	<b>9.68</b>	6.69	9.61	5.94
Tempo Frenatura (Tf) [s]	183.2	153	234.9	225.8	181.4
Potenza media su (Tf) di frenatura [kW]	140.7	227.7	102.6	153.2	117.9
Tempo sosta [s]	60	60	60	60	60
Tempo totale ciclo [s]	380	380	500	500	380

### 3 ATTIVITA' 2: ANALISI DEI POSSIBILI BENEFICI DELL'INTRODUZIONE DI SISTEMI DI ACCUMULO

In linea del tutto generale benefici economici derivanti dalla gestione dell'impianto possono essere ottenuti con:

LOAD LEVELLING: livellamento del profilo di carico, realizzando un assorbimento dalla rete pari alla potenza media di quella istantanea assorbita durante la corsa, compensando con l'accumulo gli scostamenti da tale media.

PEAK SHAVING: eliminazione dei picchi di potenza più elevati attraverso l'utilizzo del sistema di accumulo, dimensionando il convertitore lato rete con una potenza inferiore a quella di picco.

L'abbassamento della potenza di picco impegnata può apportare economie nella gestione dell'impianto per effetto della riduzione di una quota delle tariffe dell'energia elettrica legate alla potenza. La misura della potenza impegnata viene effettuata dal distributore ogni quarto d'ora quindi teoricamente l'utente potrebbe dichiarare una potenza di impianto inferiore a quella di picco. Inoltre il distributore non dà nessun limite di potenza istantanea, purché quella misurata nel quarto d'ora sia pari a quella impegnata. Ovviamente tutti i picchi di potenza oltre quella dichiarata non sono garantiti e dunque potrebbero portare a frequenti interruzioni per sovraccarico della linea con la quale viene alimentato l'impianto. Questo è maggiormente critico per gli impianti di risalita che presentano una linea di alimentazione dedicata in quanto sono dislocati lontano dai centri di carico.

Il ciclo che comporta un maggior assorbimento è la corsa Salita Veloce (con 960kW di picco), quindi rappresenta il ciclo di riferimento nel caso in cui si voglia effettuare il *peak shaving*. Anche per il *load levelling* questo ciclo rappresenta il riferimento in quanto anche la potenza media è maggiore rispetto a gli altri (107.9kW).

Il ciclo Discesa Veloce è invece utile nel caso in cui si volesse dimensionare il sistema di accumulo per recuperare tutta l'energia derivante dalla frenatura, in quanto presenta la massima potenza ed energia di frenatura.

### **3.1 Load levelling**

Come già accennato per *Load Levelling* si intende il livellamento del profilo di carico attraverso l'utilizzo di un sistema di accumulo, nella pratica esistono due tipologie di livellamento del carico:

- a soglia unica
- a due soglie.

Nel primo caso il sistema di accumulo deve essere in grado di fornire/assorbire la potenza scarto tra il valor medio assorbito dal convertitore di rete e la potenza richiesta dall'azionamento.

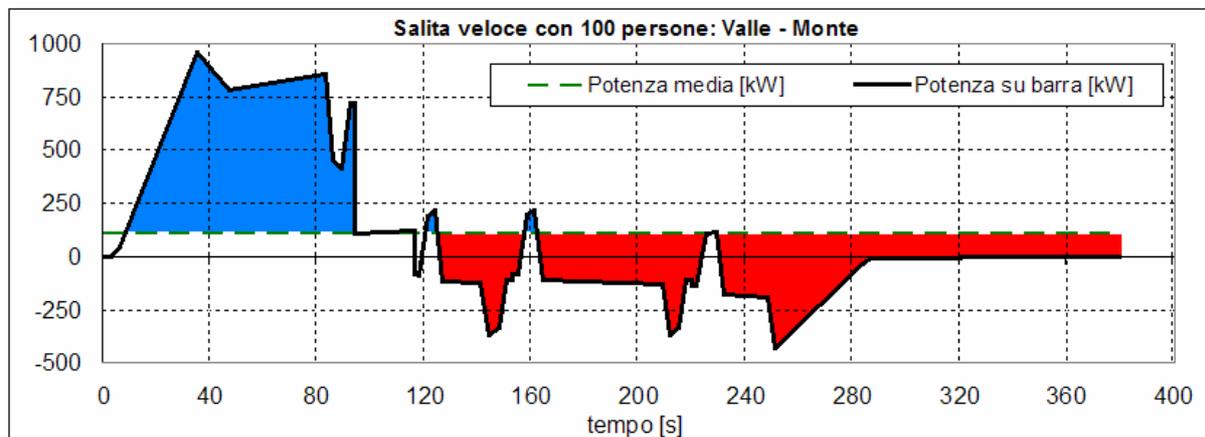


Fig. 4: Esempio di Load Levelling a soglia unica per il ciclo Discesa veloce.

Nel secondo caso il profilo di potenza assorbito dal convertitore di rete è contenuto in una fascia delimitata da due soglie. I picchi di potenza oltre la soglia superiore devono essere forniti dal sistema di accumulo scaricando così l'energia in esso accumulata. Al di sotto della soglia inferiore, invece, l'azionamento ricarica il sistema di accumulo.

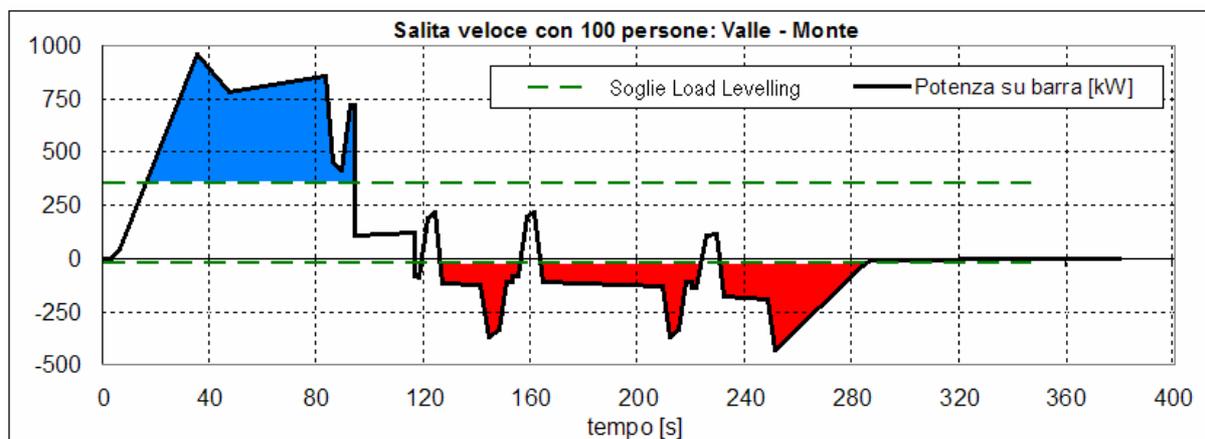


Fig. 5: Esempio di Load Levelling a due soglie per il ciclo Discesa veloce.

La soluzione a soglia unica comporta dei dimensionamenti dell'accumulo maggiori di quella a doppia soglia, tuttavia per l'applicazione in esame il peak shaving è sicuramente preferibile al load levelling a doppia soglia, perciò nel proseguo del presente studio l'attenzione è stata focalizzata unicamente sul load levelling a soglia unica ed sul peak shaving.

Con riferimento dunque al load levelling a soglia unica, nelle ipotesi di considerare il sistema di accumulo ideale senza perdite, il convertitore di rete (si veda fig. 4a) potrebbe essere

dimensionato con una potenza lato DC pari 107.9kW (media del ciclo) cosicché il sistema di accumulo si scarica con una potenza di picco di 851kW e si ricarica con 542kW di picco.

Nella realtà però il valore di tale potenza sarà tanto maggiore quanto maggiore sono le perdite del sistema di accumulo. Per valutare l'effetto delle perdite del sistema di accumulo sulla potenza del convertitore di rete sono state fatte diverse simulazioni in cui fissata una determinata efficienza del sistema di accumulo si è livellato il ciclo in modo da rendere invariato il livello energetico all'inizio e alla fine del ciclo. In questa condizione il convertitore eroga la potenza media richiesta dal ciclo più le perdite di carica e scarica del sistema di accumulo.

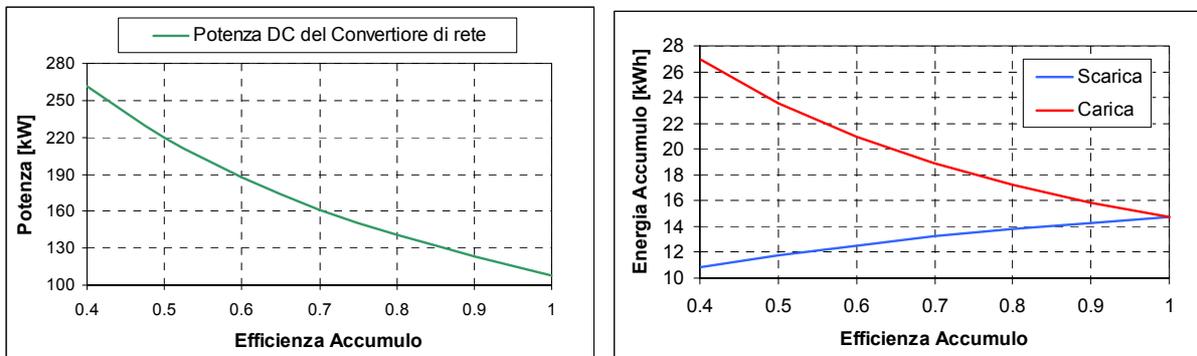


Fig. 6: Effetto dell'efficienza del sistema di accumulo sul dimensionamento del convertitore di rete e dell'accumulo stesso.

Dal grafico di figura 6 si osserva che al diminuire dell'efficienza dell'accumulo aumenta la potenza del convertitore lato rete passando da 107kW a 260kW con efficienza media del 40%.

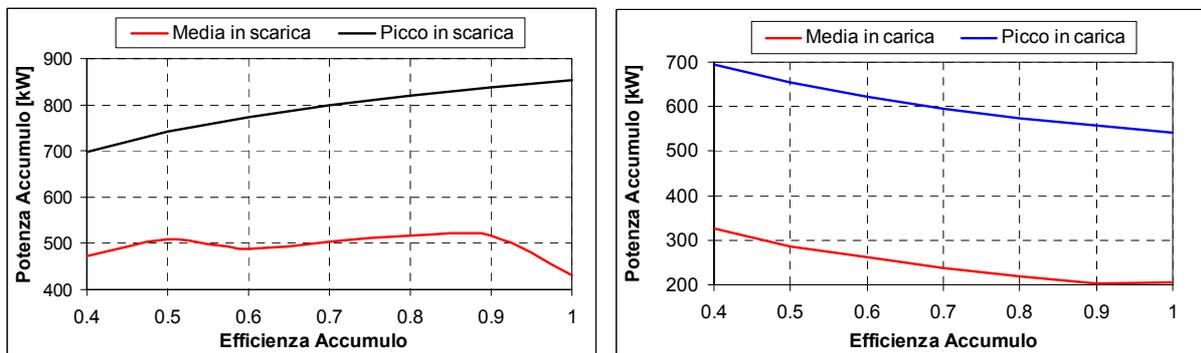


Fig. 7: Effetto dell'efficienza del sistema di accumulo sulle potenze medie e di picco scambiate dall'accumulo.

Di conseguenza, sempre al diminuire dell'efficienza, l'energia introdotta nell'accumulo in fase di carica deve aumentare per avere un ciclo a livello energetico invariato. Mentre l'energia in fase di carica diminuisce per effetto della maggiore potenza del convertitore di rete.

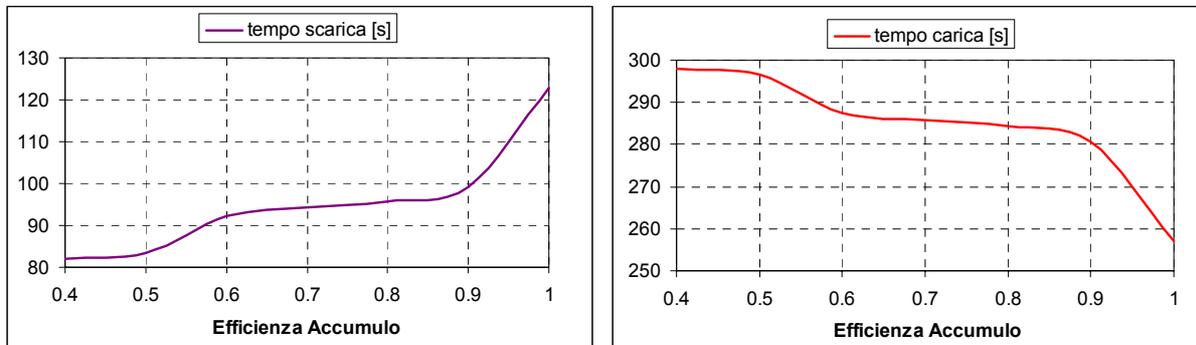
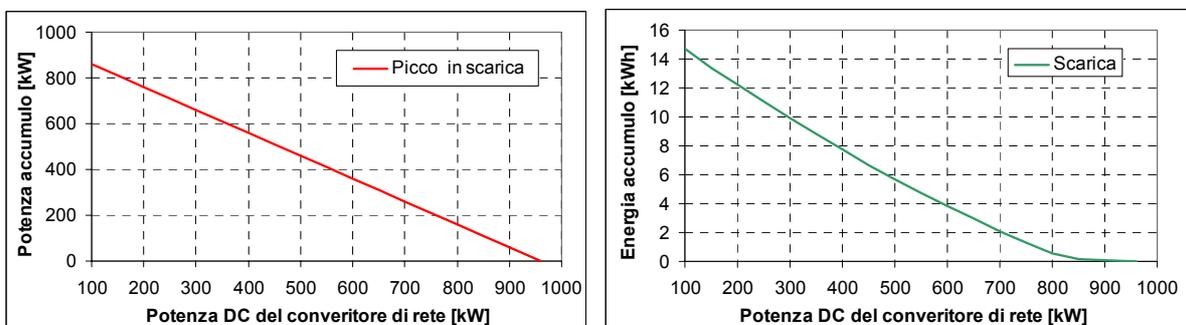


Fig. 8: Effetto dell'efficienza del sistema di accumulo sui tempi delle fasi di carica e scarica dell'accumulo.

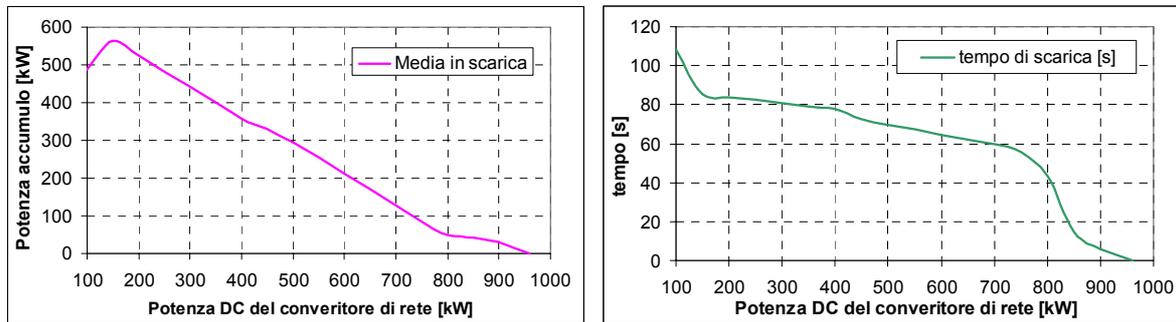
Per effettuare un *load levelling* occorrerebbe dunque una energia installata variabile da 15-27kWh scambiabile dall'accumulo in tempi inferiori a 300s. Questi volumi di energia comportano abbondanti dimensionamenti dell'accumulo che comportano investimenti difficilmente recuperabili dai benefici derivanti dall'esercizio dell'impianto.

### 3.2 Peak shaving

Nel caso di *peak shaving* il sistema di accumulo è dimensionato per tagliare una parte dei picchi dei profili di carico. Ovviamente minore è la potenza installata nel convertitore di rete maggiore è il picco che si deve tagliare, quindi maggiore è l'energia che deve essere scaricata dal sistema di accumulo.



*Fig. 9: Picco di potenza ed energia scaricata dal sistema di accumulo al variare della potenza del convertitore di rete.*



*Fig. 10: Potenza media e tempo di scarica del sistema di accumulo al variare della potenza del convertitore lato rete.*

In questo caso l'energia richiesta dal sistema di accumulo in scarica è variabile da 0 ad un massimo di 15 kWh. Nei seguenti paragrafi sono state considerate diverse tecnologie di accumulo ed per ciascuna di queste sono state analizzate e dimensionate diverse configurazioni in funzione della potenza installata nel convertitore di rete. La scelta ottima è stata poi definita sulla base di un ottimo economico scegliendo quella configurazione e tecnologia che permette di avere il più veloce recupero dell'investimento ed il massimo risparmio di gestione.

### 3.3 *Tipi possibili di sistemi di accumulo*

Sono state proposte e utilizzate molteplici tecniche di accumulo dell'energia classificabili in funzione della forma che l'energia assume all'interno del sistema di accumulo stesso:

1. Accumulo elettrochimico: l'energia elettrica, per essere accumulata viene convertita in forma potenziale chimica; essa è poi facilmente restituibile (salvo la parte perduta per le inevitabili inefficienze del sistema) per conversione inversa. Tipicamente questo avviene all'interno di *accumulatori elettrochimici monolitici* che effettuano al loro interno trasformazioni di specie chimiche. E' stata proposta una variante di questa tipologia di accumulo nella quale più sistemi concorrono alla realizzazione delle trasformazioni chimiche di interesse; il caso più significativo è quello consistente nella conversione di energia elettrica in energia potenziale chimica mediante elettrolizzatori dell'acqua, che creano idrogeno che può essere accumulato ad esempio in forma compressa in bombole; l'energia accumulata può poi essere restituita al sistema elettrico per conversione inversa da realizzarsi con pile a combustibile.
2. Accumulo elettrostatico: esso viene effettuato nei cosiddetti supercondensatori (detti talvolta ultracondensatori), e con essi l'energia è accumulata in forma elettrostatica all'interno di questo tipo di condensatori, che possono raggiungere le centinaia di farad o più.
3. Accumulo elettromagnetico: esso viene effettuato nei cosiddetti SMES (Super Conducting Magnetic Energy Storage systems) con i quali l'energia è accumulata in forma elettrostatica all'interno di questo tipo di condensatori, che possono raggiungere le centinaia di farad o più.
4. Accumulo idrostatico: l'energia elettrica viene convertita in energia potenziale gravitazionale tramite il sollevamento di un liquido ad una quota più alta
5. Accumulo aerostatico: l'energia elettrica viene convertita in energia potenziale di compressione di un gas, tipicamente aria.
6. Accumulo cinetico: mediante l'uso di volani l'energia elettrica viene convertita nell'energia cinetica di rotazione del rotore del volano.

Dei sistemi esaminati molti non sono adatti a piccoli impianti :

- I sistemi idrostatici e aerostatici richiedono grandi spazi per via dalla scarsa quantità di energia per unità di volume del sistema;

- i sistemi SMES hanno convenienza economica soltanto in grandi impianti per via del costo connesso con la necessità di realizzare grandi sistemi di refrigerazione al fine di mantenere la parte attiva a temperatura superconduttiva.

Inoltre i sistemi basati sulla trasformazione chimica di acqua in idrogeno (e ossigeno) e di idrogeno (e ossigeno) in acqua sono ancora allo stato di prototipi, e non presentano ad oggi adeguate caratteristiche di economicità.

Delle varie possibilità offerte oggi in maniera economica dalla tecnologia rimangono quindi soltanto le opzioni di uso di accumulatori elettrochimici monolitici, di accumulo elettrostatico o cinetico.

In accordo con il cobeneficiario ENEA nel prosieguo della presente relazione, ed in particolare nel seguente paragrafo, l'attenzione sarà focalizzata su sistemi elettrostatici o elettrochimici monolitici, trascurando l'opzione di uso dei volani (accumulo cinetico).

#### **3.4 Valutazione dei benefici in funzione di tipologia e taglia del sistema di accumulo**

Come risulta dal precedente paragrafo, è stato stabilito di concentrare l'attenzione all'uso di accumulatori elettrochimici monolitici e supercondensatori.

Per quanto riguarda gli degli accumulatori elettrochimici, è ben noto che di essi esistono diverse tipologie, ognuna delle quali presenta vantaggi e svantaggi tecnici oltre che costi notevolmente differenti. Gli accumulatori elettrochimici oggi più significativi per la loro disponibilità e presenza sul mercato sono i seguenti: Accumulatori al Piombo, (Pb), agli idruri metallici (NiMH), al Litio, al Sodio-Nickel cloro (Na-NiCl). A parità di tipologia esistono realizzazioni costruttive che ne esaltano la capacità di erogazione di quantità di energia relativamente grande, a potenze relativamente modeste (*accumulatori di energia*), o, all'opposto esaltano le potenze di erogazione parzialmente a scapito dell'energia globalmente disponibile (*accumulatori di potenza*).

Si possono classificare come accumulatori di energia quelli che sono ottimizzati per scariche relativamente lunghe (tipicamente di almeno un'ora), e come accumulatori di potenza quelli che sono ottimizzati per scariche brevi, di alcuni minuti o addirittura poche decine di secondi di durata.

Questo confronto basato sul rapporto potenza-energia può essere esteso ai supercondensatori.

Per effettuare un confronto delle capacità di erogazione di potenza e di energia di diversi sistemi di accumulo in maniera in qualche modo normalizzata, può essere utile far riferimento a potenza ed energia disponibili per le varie tecnologie per unità di massa del sistema di accumulo stesso.

Si possono pertanto riportare in un'unica tabella o grafico le caratteristiche di energia specifica (misurata in un tempo di prova relativamente lungo, ad esempio due ore) e di potenza specifica (potenza massima erogabile in un breve tempo, ad esempio un minuto o 30 secondi).

Alcuni dati caratteristici, ricavati dalla consultazione di materiale informativo di prodotti commercialmente disponibili, sono riportati in tab. II.

Tab. II: Caratteristiche dei più comuni accumulatori.

	<i>Energia specifica</i> [Wh/kg]	<i>Densità energetica</i> [Wh/L]	<i>Potenza specifica</i> [W/kg]	<i>Vita</i> [# cicli]
<b>Piombo-acido</b> di energia	30-35	120	80-100	2-300
<b>Piombo-acido</b> di potenza	20-30	80	200-300	20.000
<b>Ni-MH</b> di energia	70	170	200-260	> 1000
<b>Ni-MH</b> di potenza	35-70	90-120	500-1000	100.000
<b>Li-Ion</b> di energia	120-150	140-300	240-420	800
<b>Li-Ion</b> di potenza	45-85	160-190	500-1000	150.000
<b>Li-Po</b> di energia	150-200	300-410	300-650	700-1200
<b>Li-Po</b> di potenza	100-120	200-240	1000-2900	700-1200
<b>Na-NiCl</b>	95	140	170	1000
<b>Supercond.</b>	1-8	1-8	1000-15000	100k-500k

Una rappresentazione per certi versi analoga, ma per altri più efficace, delle differenti caratteristiche di erogazione di potenza-energia dei vari sistemi di accumulo è ottenibile dal grafico sinottico di fig. 11.

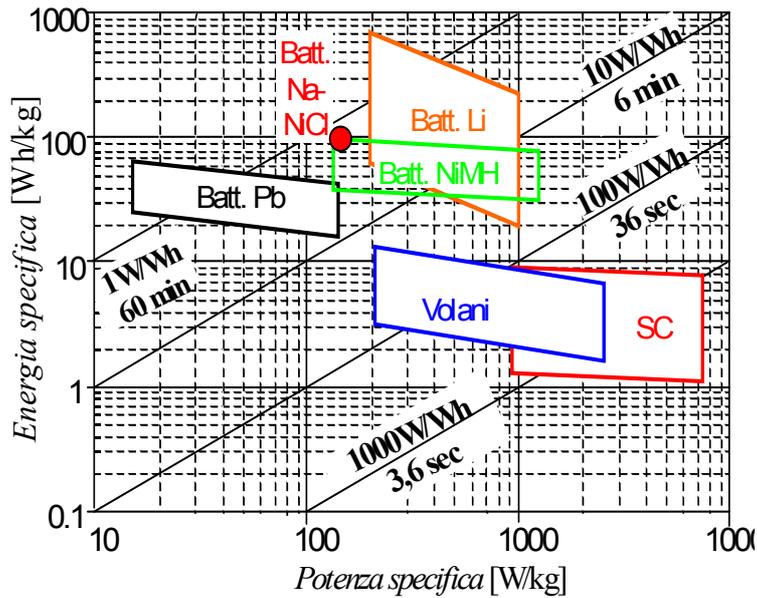


Fig. 11: Diagramma di Ragone dei vari sistemi di accumulo (SC: Supercondensatori).

La figura mostra chiaramente quali sistemi di accumulo siano più adatti all'erogazione di potenze elevate o di energie elevate.

Infatti, sebbene la potenza e l'energia relative ad ognuno dei punti riportati nel diagramma di fig. 11 siano relative a due diverse prove (come si è detto rispettivamente di potenza elevata e di potenza modesta), esse mostrano chiaramente la "vocazione" di un sistema di accumulo ad erogare efficacemente potenze elevate o notevoli quantità di energia.

Per rendere quantitativo il confronto occorre rilevare il rapporto P/E dell'accumulo inserito nel sistema di riferimento, per vari valori di potenza impegnata nei confronti del distributore di energia in c.. (e quindi di dimensionamento del convertitore di interfaccia con tale rete). Tale valore è stato ricavato sulla base degli effettivi diagrammi di carico previsti per il sistema in esame e riportato in fig. 12.

Si osserva che quando la potenza del convertitore di rete è prossima alla potenza di picco richiesta dall'azionamento, quindi per piccoli valori di potenza da erogare da parte del sistema di accumulo, il rapporto P/E cresce fortemente, e quindi risulta progressivamente sempre più conveniente adottare sistemi di accumulo di potenza piuttosto che di energia.

Nei paragrafi successivi si riportano i risultati dello studio nel caso di Supercondensatori e accumulatori al Litio. Inoltre anche la soluzione con Piombo-Acido è stata analizzata come

base di riferimento per l'analisi economica.

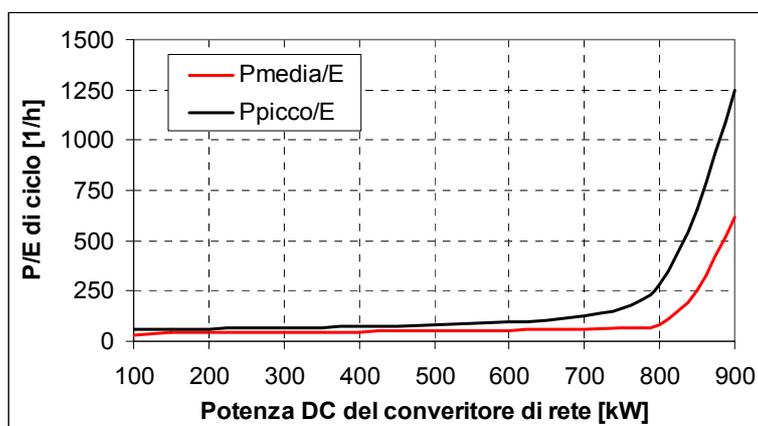


Fig. 12: Rapporto P/E del ciclo di riferimento.

## 4 ATTIVITA' 3: PROGETTAZIONE DI DETTAGLIO E LAYOUT

### 4.1 Progettazione nel caso di utilizzo di supercondensatori

Dal ciclo di riferimento sono state ricavate le caratteristiche di scarica richieste al sistema di accumulo per diverse soluzioni di dimensionamento del convertitore di rete, in particolare è stata calcolata la potenza media di scarica, il tempo di scarica e l'energia richiesta in scarica.

Tab. III: Potenza, tempo ed energia di scarica richieste al sistema di accumulo nel ciclo Salita Veloce per diversi dimensionamenti della potenza installata lato rete.

	Potenza nominale convertitore lato rete				
	DC (AC) [kW]				
	250 (280)	450 (500)	600 (670)	750 (840)	850 (950)
Energia scaricata dal sistema di accumulo [kWh]	11.1	6.7	3.8	1.3	0.17
Tempo scarica [s]	83	73	65	56	15
Potenza media scarica nel tempo di scarica [kW]	483	331	213	84	42
Potenza di picco in scarica [kW]	710	510	360	210	110

Nella tabella IV sono riportate le caratteristiche del modulo di supercondensatori MAXWELL 125V-63F.

Tab. IV: Caratteristiche del modulo di supercondensatori MAXWELL 125V-63F.

Tensione nominale [V]	125
Energia nominale [Wh]	101.7
Tensione min [V]	62.5
Tensione max [V]	135
Capacità modulo [F]	62.5
Resistenza totale [mOhm]	
@ DC	18
@ 100Hz	14

Con i dati dichiarati dal costruttore sono state ricavati i profili di scarica del modulo per diversi valori di potenza costante di scarica, e da essi è stata ricavata l'energia effettivamente erogabile con tensione ai morsetti fra il valore nominale e metà di quest'ultimo, tenendo conto delle cadute nella resistenza interna (tabella V).

Tab. V: Scariche a potenza costante del modulo supercondensatori 125V-63F.

tempo [s]	potenza [kW]	energia [Wh]
5	50	69.4
15	20	83.3
56	5.9	91.8
70	4.7	91.4
85	4	94.4

Attraverso ripetute simulazioni dell'impianto funzionante con il ciclo Salita Veloce si sono determinati i diversi dimensionamenti dell'accumulo al variare della potenza installata nel convertitore di rete.

Tab. VI: Dimensionamento dell'accumulo con moduli Maxwell 125V-63F.

Potenza conv. AC rete [kW]	Potenza conv. DC rete [kW]	# Moduli parallelo	# Moduli serie	$V_{nom}$ [V]	Energia nominale installata [kWh]
278	250	34	4	500	13.8
500	450	21	4	500	8.5
556	500	18	4	500	7.3
667	600	12	4	500	4.9
833	750	5	4	500	2.0
944	850	1	4	500	0.41

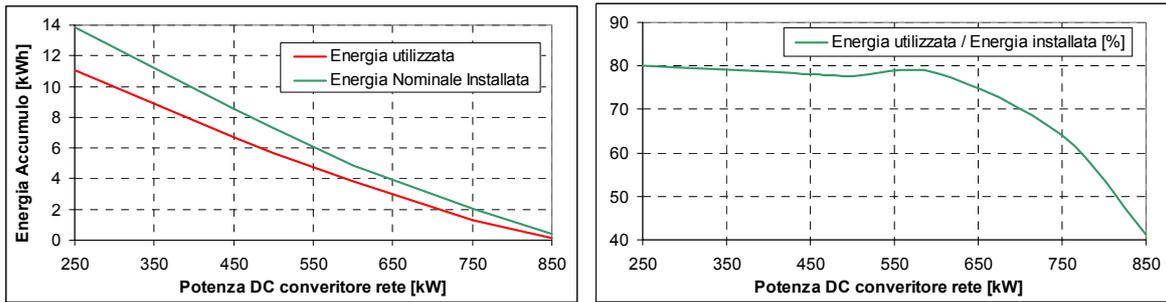


Fig. 13: Energia installata nei supercondensatori per diverse potenze del convertitore di rete.

In normali condizioni operative la tensione del pacco di supercondensatori può variare anche del 50% rispetto la tensione nominale, per questo motivo il pacco non può essere collegato direttamente al bus DC ( $V_n=600V$ ). Infatti per garantire un corretto funzionamento dell'azionamento collegato al bus, la tensione dovrebbe essere contenuta nell'intervallo 550-650V, impossibile da ottenere nel caso di collegamento diretto dei supercondensatori. Risulta quindi necessario l'installazione di convertitori DC/DC per ciascuna serie di moduli.

Nelle figure 14 e 15 si riportano due simulazioni con potenza del convertitore di rete rispettivamente pari a 250 e 850 kW.

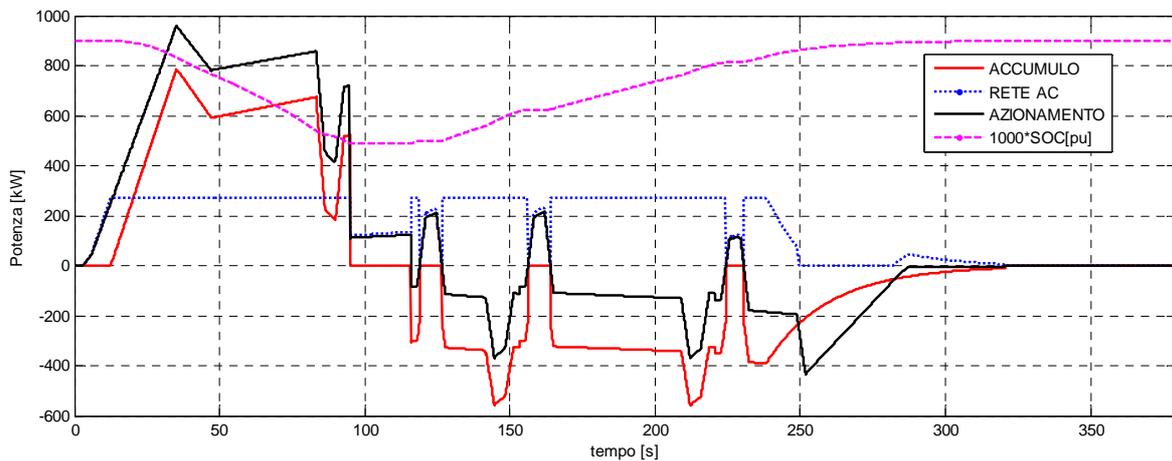
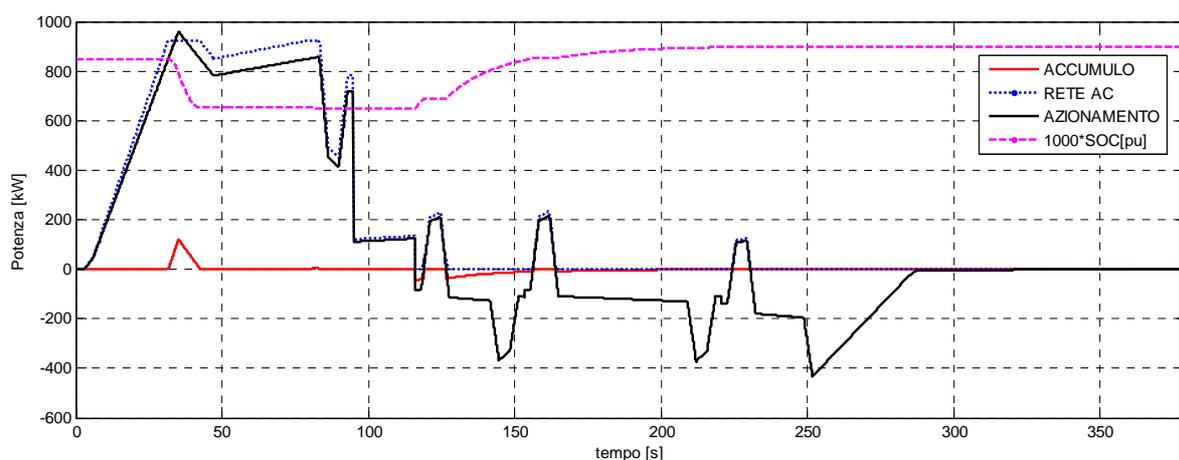


Fig. 14: Andamento della potenza dell'azionamento, erogata/assorbita dal sistema di accumulo ed assorbita dal convertitore di rete e andamento dello stato di carica nel caso di convertitore rete con potenza installata pari a 250kW.



*Fig. 15: Andamento della potenza dell'azionamento, erogata/assorbita dal sistema di accumulo ed assorbita dal convertitore di rete e andamento dello stato di carica nel caso di convertitore rete con potenza installata pari a 850kW.*

Anche se non esplicitamente visibile dei diagrammi durante la frenatura non tutta l'energia viene recuperata nel sistema di accumulo, in parte essa viene dissipata nei reostati di frenatura. Questo è molto evidente nel caso di dimensionamento massimo del convertitore lato rete.



*Fig. 16: Modulo supercondensatori Maxwell 125V-63F.*

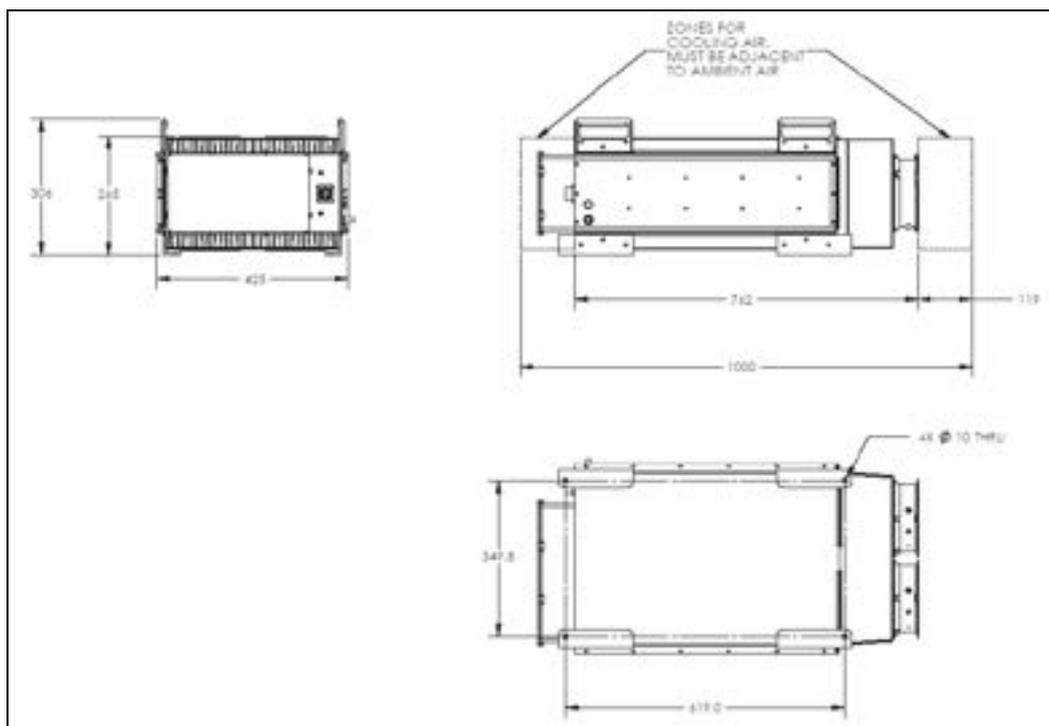


Fig. 17: Layout del modulo supercondensatori Maxwell 125V-63F.

Il costo dei supercondensatori è decisamente diverso a seconda del volume di moduli richiesto. Normalmente i costruttori indicano il costo per unità di capacità immagazzinata nella singola cella. Tale costo varia da 1 a 3.5c€ a seconda che si tratti di prototipo o produzione in serie.

In figura 18 si riporta il costo dell'intero sistema di accumulo al variare della potenza installata nel convertitore lato di rete.

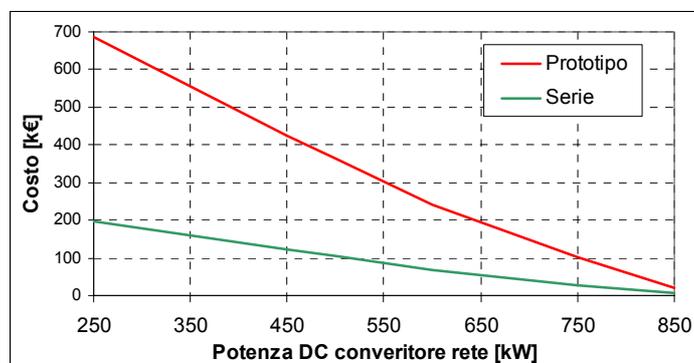


Fig. 18: Andamento del costo dei supercondensatori per diversi dimensionamenti del convertitore lato di rete.

Tab. VII: Costo dei soli supercondensatori Maxwell 125V-63F.

Potenza convertitore di rete DC (AC) [kW]	# Moduli	Costo Prototipo [k€]	Costo Serie [k€]
250 (278)	136	196	685
450 (500)	84	121	424
500 (556)	72	104	363
600 (667)	48	70	242
750 (833)	20	29	101
850 (944)	4	6	21

#### **4.2 Progettazione nel caso di utilizzo di accumulatori al piombo-acido**

Le batterie al piombo-acido sono disponibili commercialmente in un gran numero di varianti costruttive (a piastre piane, a spirale, bipolari, a elettrolita libero, gelificato o assorbito etc.) e sono utilizzate nella generalità di applicazioni industriali e veicolari.

Alla base di questo successo, il basso costo della tecnologia ed il fatto che l'industria del settore ha solide basi da oltre un secolo e cerca naturalmente di preservare le sue quote di mercato.

I valori ottenuti in termini di potenza specifica effettiva sono di tutto rispetto, si veda la tabella II, ma i punti deboli di queste batterie rimangono la ridotta energia specifica e soprattutto la durata, che è ridotta rispetto ad altri tipi ed è fortemente dipendente dalle condizioni di esercizio. A questo riguardo l'esperienza ha dimostrato che le diverse condizioni di esercizio influiscono pesantemente sulla vita delle batterie.

E' innanzitutto provata la dipendenza della vita del pacco batterie dalla potenza specifica massima di progetto. E' immediato constatare che anche livelli di potenza media bassi richiedano in particolari applicazioni più sostituzioni delle batterie stesse durante la vita utile dell'impianto, perché l'utilizzo è molto elevato.

I costruttori di batterie non danno in genere indicazioni sulle correnti massime che una batteria può gestire senza danni dal recupero in frenata, danno però indicazioni sulla ricarica rapida delle batterie, che in alcuni casi può arrivare a due volte la corrente ammissibile in una scarica di 1 ora. In effetti anche prove di laboratorio hanno confermato l'accettabilità di queste correnti, almeno per valori bassi dello stato di carica. Per correnti maggiori, la tensione del pacco salirebbe a valori non accettabili per una corretta gestione del sistema, e quindi le potenze di recupero sono necessariamente limitate, approssimativamente la metà di quelle possibili in scarica.

### Dimensionamento

Si fa sempre riferimento alla tabella III dove sono riportate la potenza media e di picco di scarica, il tempo di scarica e l'energia richiesta in scarica per il ciclo di riferimento dell'impianto. Ovviamente le caratteristiche richieste suggeriscono l'utilizzo di accumulatori orientati alla potenza.

In particolare sono state considerati i moduli della Genesis poiché ampiamente testati in passato nei laboratori del DSEA e dell'ENEA, con prestazioni abbastanza soddisfacenti per la tecnologia al Piombo. I moduli hanno capacità variabili da 13 a 70Ah, e per le prestazioni richieste occorre utilizzare il modulo con capacità maggiore, le cui caratteristiche sono riportate nella figura 19 e tabella VIII.

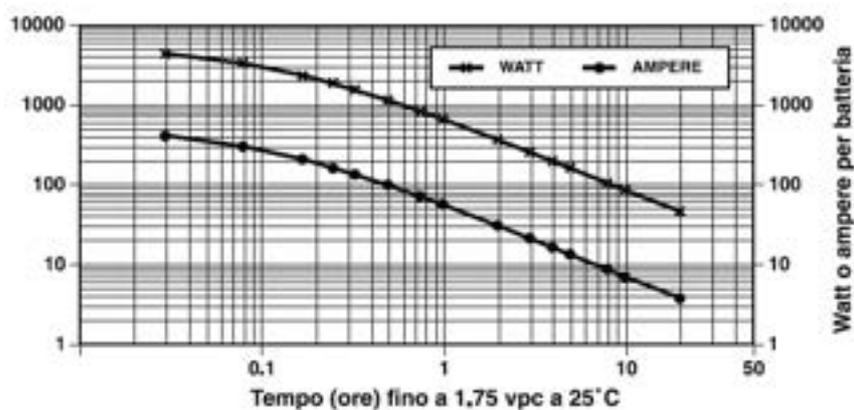


Fig. 19: Caratteristiche di scarica a potenza /corrente costante per accumulatori al Piombo-Acido Genesis 12V-70Ah.

Tab. VIII: Caratteristiche di scarica a potenza costante fino alla tensione di 1.85V per cella elementare degli accumulatori al Piombo-Acido Genesis 12V-70Ah.

Tempo di scarica fino a 1.85 vpc	Watt	Ampere	Capacità (Ah)	Energia (Wh)
2 min	3482	313.1	9.4	104.5
5 min	2810	247.4	19.8	224.8
10 min	2082	180.7	30.7	353.9
15 min	1667	143.5	35.9	416.7
20 min	1397	119.7	39.5	460.9
30 min	1063	90.5	45.2	531.6
45 min	790	66.8	50.1	592.2
1 ore	631	53.2	53.2	630.6

Le singole celle di accumulatori al Piombo-Acido hanno una tensione operativa variabile da 1.8 a 2.4V, ovvero una variazione rispetto alla tensione nominale (2.0V) pari a -20% ,+20% con un rapporto  $V_{\min}/V_{\max}$  uguale a 0.75, quindi per operare correttamente nei range della tensione di bus occorrerebbe interfacciare il sistema di accumulo con un convertitore DC/DC, in modo da garantire la tensione di bus pari a 600 o 650V al massimo.

In realtà il dimensionamento del sistema di accumulo è stato opportunamente aumentato in modo da comportare una finestra di tensione operativa dell'intero pacco compresa tra 550-700V (compatibili con il range di funzionamento dell'azionamento) senza quindi l'utilizzo del convertitore.

I dimensionamenti sono stati ottenuti attraverso ripetute simulazioni dell'impianto con riferimento al ciclo Salita Veloce. I risultati ottenuti sono riportati nella tabella IX.

Tab. IX: Dimensionamento dell'accumulo con moduli Genesis 12V-70Ah.

Potenza conv. DC rete [kW]	# Moduli parallelo	# Moduli serie	$V_{\text{nom}}$ [V]	Energia nominale installata [kWh]
250	6	50	600	252
450	4	50	600	168
600	3	50	600	126
750	2	50	600	84
850	1	50	600	42

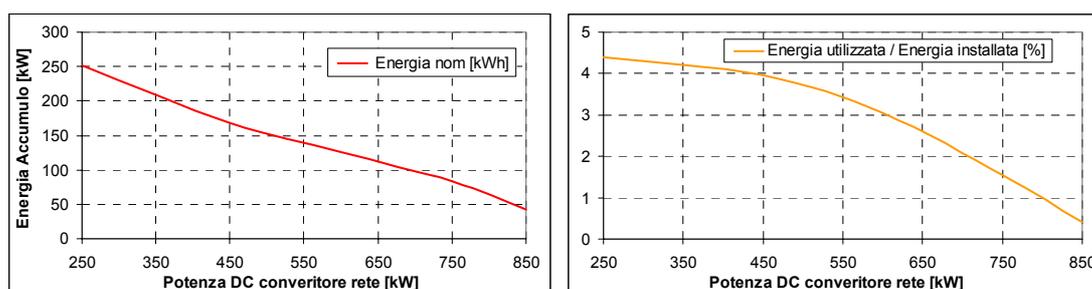


Fig. 20: Energia installata negli accumulatori Piombo-Acido per diverse potenze del convertitore di rete.

Il costo di accumulatori al Piombo-Acido di potenza è decisamente diverso da quelle di energia che attualmente vengono vendute a 120€/kWh. In figura si riporta il costo dell'intero sistema di accumulo al variare della potenza installata nel convertitore lato di rete ipotizzando un costo per accumulatori di potenza pari al doppio di quelle di energia.

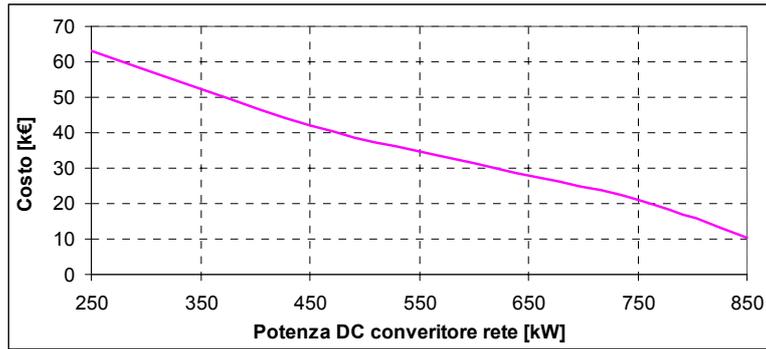


Fig. 21: Costo degli accumulatori al Piombo-Acido per diversi dimensionamenti del convertitore di rete.

Nelle figure seguenti si riportano due simulazioni con potenza del convertitore di rete rispettivamente pari a 250 e 825 kW.

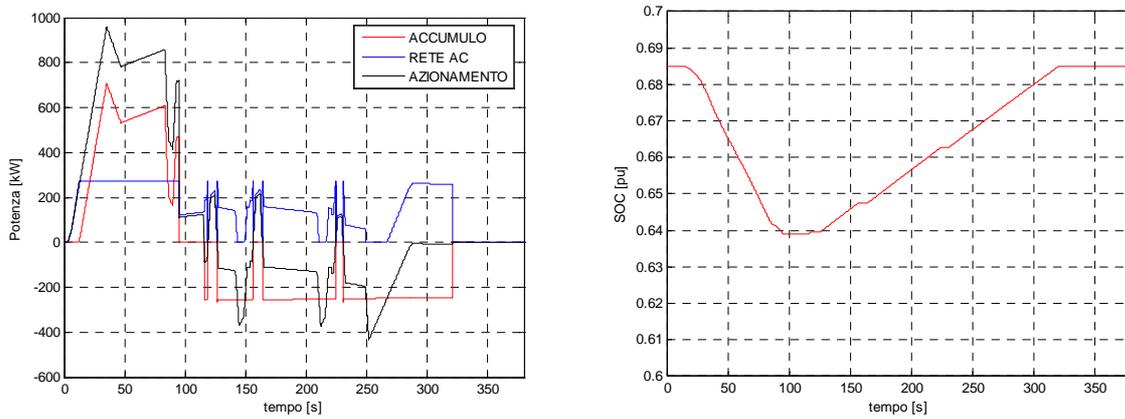


Fig. 22: Andamento della potenza dell'azionamento, erogata/assorbita dal sistema di accumulo ed assorbita dal convertitore di rete e andamento dello stato di carica nel caso di convertitore rete con potenza installata pari a 250kW.

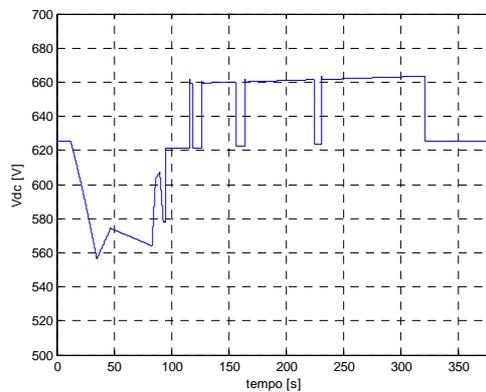


Fig. 23: Andamento della tensione del bus DC nel caso di convertitore rete con potenza installata pari a 250kW.

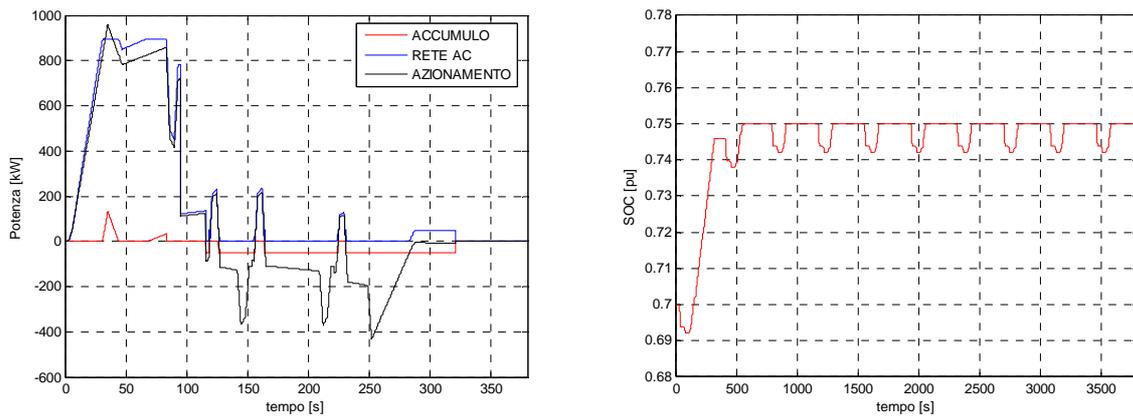


Fig. 24: Andamento della potenza dell'azionamento, erogata/assorbita dal sistema di accumulo ed assorbita dal convertitore di rete e andamento dello stato di carica nel caso di convertitore rete con potenza installata pari a 825kW.

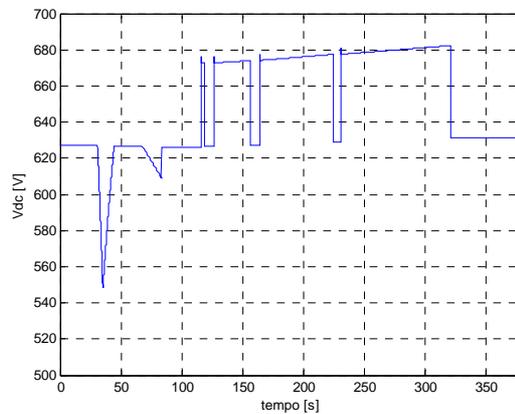


Fig. 25: Andamento della tensione del bus DC nel caso di convertitore rete con potenza installata pari a 825kW.

### 4.3 Progettazione nel caso di utilizzo di accumulatori al litio polimero

Gli accumulatori al Litio-Polimero presentano l'elettrolita costituito da un composto di polimero solido, al contrario delle batterie cosiddette ai Litio-Ioni in cui questo è contenuto liquido. Questo tipo di costruzione presenta diversi vantaggi, tra cui il fatto che il polimero solido non è infiammabile e dunque le batterie risultano più sicure anche a fronte di abusi.

Le batterie ad elettrolita polimerico presentano un impacchettamento molto denso senza spazi tra le celle e senza contenitore, la densità energetica di tali batterie è dunque maggiore di più del 20% rispetto alle batterie al litio in elettrolita liquido ed è circa tre volte migliore rispetto alle batterie convenzionali al piombo, permettendo pesi ed ingombri molto ridotti, ideali per

applicazioni veicolari, ma interessanti anche per applicazioni stazionarie quando gli spazi a disposizione sono molto ristretti.

Se confrontate alle batterie con elettrolita liquido (Li-Ion), le batterie ad elettrolita polimerico (Li-Po) hanno un più rapido invecchiamento. Ad ogni modo, recentemente, produttori dichiarano di aver raggiunto un numero di 600÷800 cicli di carica/scarica completa.

La valutazione della vita di una batteria espressa in cicli, non può però prescindere dal tenere in giusta considerazione la profondità di scarica a cui la batteria viene ciclata. Con profondità di scarica dell'ordine del 10-20%, come si vedrà in seguito, la vita utile può facilmente arrivare ad alcune decine di migliaia di cicli, il che le rende compatibili con l'applicazione in esame.

Tra i diversi costruttori presenti sul mercato si distinguono per le prestazioni dichiarate i prodotti offerti dalla Kokam, costruttore nordcoreano che vende celle in tutto il mondo.

La Kokam offre un'ampia gamma di accumulatori Li-Po di piccole, medie e grandi dimensioni. In particolare delle grandi capacità produce celle sia orientate all'energia che alla potenza.

Le singole celle Li-Po hanno una tensione operativa variabile da 2.7 a 4.2V, ovvero una variazioni rispetto alla tensione nominale (3.7V) pari a -27% ,+13.5% con un rapporto  $V_{\min}/V_{\max}$  uguale a 0.64 . Se si vuole evitare di avere una così ampia variabilità della tensione del bus DC, si può interporre fra la batteria ed il bus un convertitore DC/DC. Con questa soluzione si ha anche il vantaggio di una maggiore libertà di scelta del modello di batteria da utilizzare.

Considerato i vincoli che si hanno nel caso in esame sulla tensione di bus, che non deve superare i 650 V per ragioni di compatibilità con le valvole utilizzate sugli altri convertitori che si interfacciano con il bus DC, e non deve scendere al di sotto di 550V per ragioni di compatibilità con la tensione nominale di 400 V della macchina elettrica alimentata dall'inverter, in accordo con il partner che dovrà realizzare i convertitori è stato stabilito di interporre fra il bus DC e la batteria un convertitore DC-DC.

L'introduzione di tale convertitore introduce ovviamente delle perdite che producono di fatto un leggero sovradimensionamento del sistema. La tabella X riporta l'energia richiesta in scarica all'accumulo, il tempo e la potenza media e di picco considerando un'efficienza media del convertitore DC/DC pari a 0.92.

Tab. X: Potenza, tempo ed energia di scarica richiesta al sist. di accumulo con convertitore DC/DC nel ciclo Salita Veloce per diversi dimensionamenti della potenza installata lato rete.

	Potenza nominale convertitore lato rete DC (AC) [kW]				
	250 (280)	450 (500)	600 (670)	750 (840)	850 (950)
Energia scaricata dal sistema di accumulo [kWh]	12	7.3	4.2	1.4	0.18
Tempo scarica [s]	83	73	65	56	15
Potenza media scarica nel tempo di scarica [kW]	525	360	232	92	46
Potenza di picco In scarica [kW]	772	554	391	228	120

Dai cataloghi di accumulatori orientati alla potenza sono state ricavate le caratteristiche di scarica sia per differenti rate di corrente che per differenti temperature. Infatti dalle curve di figura 26-(a) è possibile calcolare di quanto si riducono i tempi di scarica (quindi la capacità) nel caso in cui l'accumulatore viene sottoposto a correnti di scarica elevate fino a 15÷20 volte quella nominale. Dal grafico di figura 26-(b) invece è possibile calcolare la riduzione del tempo di scarica alle temperature più basse (fino a -20°C).

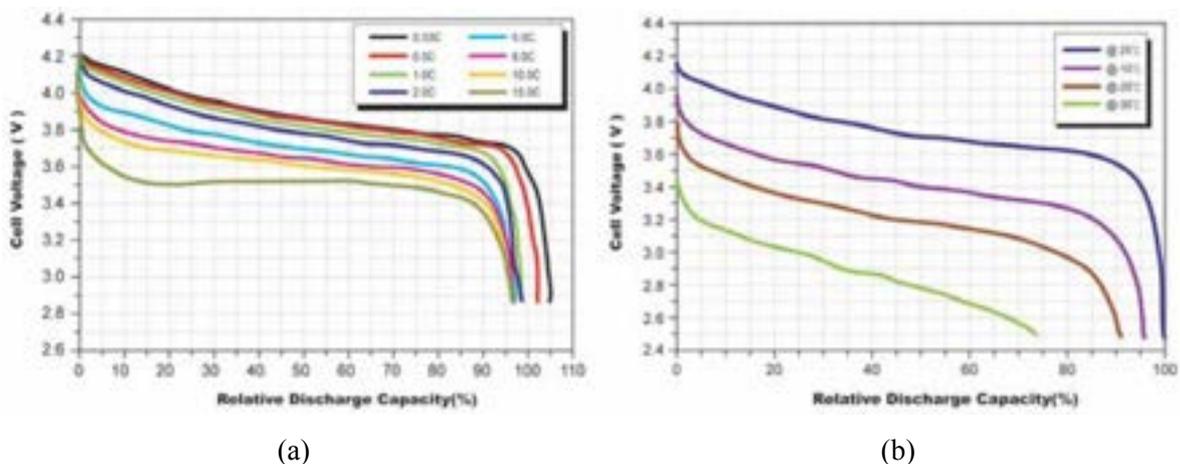


Fig. 26: Caratteristiche di scarica a diversi valori di corrente (a) e diverse temperature (b) di accumulatori Li-Po della Kokam.

Per il dimensionamento è stata considerata sia la potenza media di scarica che il massimo valore della potenza istantanea durante la scarica (“potenza di picco”).

Considerando una tensione media di scarica pari a  $3.3 \div 3.5V$  è possibile scegliere la capacità ed il numero di celle capaci di erogare la potenza di picco richiesta nelle peggiori condizioni di temperatura esterna ( $-20^{\circ}C$ ). Tale dimensionamento risulta ovviamente maggiore rispetto a quello ottenibile considerando la potenza media scaricata a corrente costante per il tempo di scarica richiesto.

Nella tabella XI sono riportati i risultati del dimensionamento dell'accumulo nel caso di diverse potenze installate nel convertitore di rete, e realizzazione di sistema di accumulo con un'unica stringa di celle in serie.

La soluzione con potenza del convertitore di rete di 850 kW DC (5 e 6) è quella che richiede un minore investimento per l'acquisto del sistema di accumulo e del relativo convertitore, e appare la più interessante per un'installazione prototipale.

Tab. XI: Dimensionamento dell'accumulo Li-Po con celle Kokam in serie.

#	Potenza convertitore di rete. DC (AC) [kW]	Modulo	# Celle in serie	$V_{nom}$ [V]	Energia nominale installata [kWh]
1	450 (500)	100K05-0101A High Power Cell 100Ah	210	777	77.7
2	600 (670)	070K05-0101A High Power Cell 70Ah	170	629	44.0
3	750 (833)	031K05-0101A High Power Cell 31Ah	224	829	25.7
<b>4</b>	<b>850 (944)</b>	<b>012K05-0101A Ultra High Power Cell 12Ah</b>	<b>190</b>	<b>703</b>	<b>8.4</b>

Tutte le soluzioni proposte nella tab. XI sono caratterizzate da tensioni nominali di batteria relativamente elevate.

Per un dimensionamento ottimale del convertitore DC/DC, peraltro, potrebbe risultare vantaggioso avere tensioni di batteria più basse sia perché si potrebbero utilizzare componenti più economici, sia perché si potrebbero scegliere architetture più semplici.

Questo fine può essere perseguito qualora le celle di accumulatori siano fra loro parallelizzabili. In tal caso potrebbero essere considerate anche le soluzioni riportate in tabella XII.

La disposizione delle celle in tal caso potrebbe essere di parallelizzare le celle a due a due e poi porre in serie i paralleli così ottenuti, ovvero realizzare due distinte stringhe in serie da porre fra loro in parallelo. La prima di queste due soluzioni, se tecnicamente realizzabile (occorre ancora sentire il costruttore) consentirebbe anche il dimezzamento del numero di celle da monitorare con il BMS.

Tab. XIII: Dimensionamento dell'accumulo Li-Po con moduli Kokam nell'ipotesi di parallelizzabilità delle celle.

#	Potenza convertitore di rete. DC (AC) [kW]	Modulo	# Celle in parallelo	# Celle in serie	$V_{nom}$ [V]	Energia nominale installata [kWh]
1	450 (500)	100K05-0101A High Power Cell 100Ah	2	105	389	77.7
2	600 (670)	070K05-0101A High Power Cell 70Ah	2	85	315	44.0
3	750 (833)	031K05-0101A High Power Cell 31Ah	2	112	414	25.7
4	850 (944)	<b>012K05-0101A Ultra High Power Cell 12Ah</b>	<b>2</b>	<b>95</b>	<b>352</b>	<b>8.4</b>

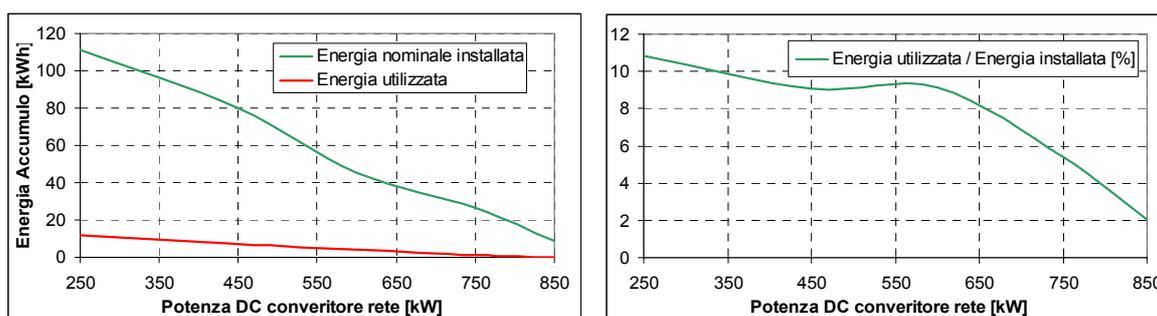


Fig. 27: Energia installata negli accumulatori Li-Po per diverse potenze del convertitore di rete.

Per quanto concerne i costi i costruttori forniscono un costo unitario pari ad un dollaro (USD) per Wh di energia nominale, essendo quest'ultima determinata come prodotto di capacità nominale per tensione media di scarica (3.7 volt per cella). Nel grafico di figura 28 sono riportati i costi delle diverse soluzioni considerate.

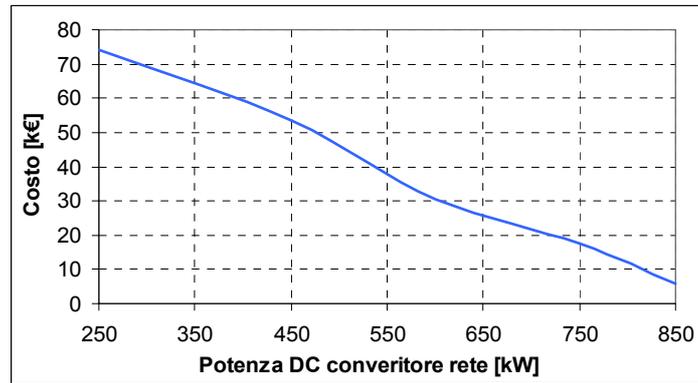
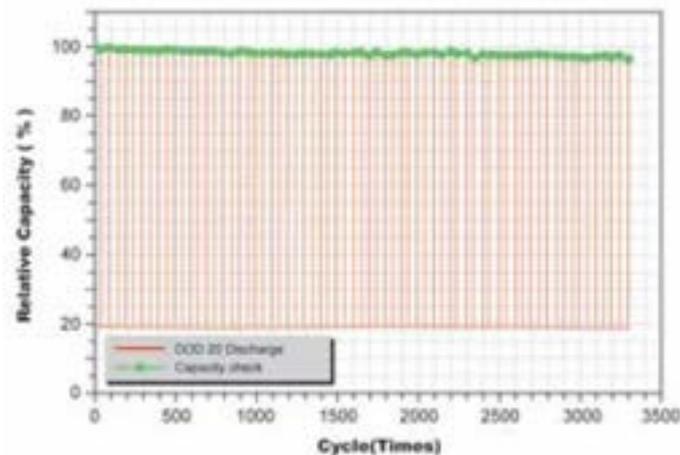


Fig. 28: Costo degli accumulatori Li-Po per diversi dimensionamenti del convertitore di rete.

Tab. XIII: Costo dei Li-Po della Kokam.

Potenza convertitore di rete DC (AC) [kW]	Modulo	# Moduli	Costo totale [k€]
250 (278)	100K05-0101A High Power -100Ah	294	76
450 (500)	100K05-0101A High Power - 100Ah	210	53
600 (670)	070K05-0101A High Power - 70Ah	170	30
750 (833)	031K05-0101A High Power - 31Ah	224	18
<b>850 (944)</b>	<b>012K05-0101A</b> <b>Ultra High Power - 12Ah</b>	<b>190</b>	<b>6</b>

A tale costo deve essere aggiunto il costo del case e del BMS (Battery Management System). Infatti i pacchi di questi accumulatori sono soggetti a problemi di sbilanciamento, essi necessitano di un sistema di monitoraggio ed equalizzazione. Tutte le tensioni di cella e le temperature devono essere monitorizzate durante il funzionamento in modo da garantire per ciascuna cella la tensione nell'intervallo 2.7÷4.2V e le temperature corrette di esercizio. Il costo del BMS ha un entità comparabile a quello del pacco accumulatore.



*Fig. 29: Riduzione della capacità di accumulatori Li-Po soggetti a continui cicli di carica/scarica con il 20% di profondità di scarica.*

Per quanto riguarda la vita il costruttore assicura almeno 800 cicli di carica-scarica profondi, questo valore sia pur molto basso aumenta notevolmente se la batteria viene scaricata meno profondamente.

A tal proposito la figura 29 evidenzia che con cicli con profondità di scarica del 20% la capacità si riduce del 3% circa dopo 3500 cicli. Estrapolando questo risultato, e fissando come di prammatica la fine della vita utile dell'accumulatore al raggiungimento dell'80% di capacità si può stimare una vita utile con scariche del 20% in circa 20000 cicli.

L'impianto deve operare annualmente sia nel periodo estivo (giugno-settembre) che invernale (novembre-aprile) per un totale di 7500 corse/anno, pari a 660h/anno. Di queste 7500 corse solo 3500 hanno un carico di persone trasportate superiore a 66 persone a bordo. In particolare nel caso di dimensionamento del sistema di accumulo #4 riportato nella tabella XI, con riferimento al ciclo Salita Veloce di 100 e 66 persone rispettivamente (figure 2 e 3), si osserva che il sistema di accumulo è chiamato ad intervenire solo quando il numero delle persone da trasportare supera 66, ovvero il numero di cicli annui di funzionamento del sistema di accumulo può essere al massimo 3500 stimando quindi una vita utile del pacco batterie di almeno quattro anni.

Occorre però tenere conto del fatto che la vita riportata nel diagramma di figura 29 è misurata con riferimento a scariche a basse correnti. Occorrerebbe quindi portare in conto gli effetti della elevata corrente di scarica nel caso in esame. Il costruttore non fornisce a catalogo questo tipo di informazioni; è stato contattato al fine di ottenerne una integrazione; in assenza

di dati del costruttore si ritiene auspicabile l'effettuazione nell'ambito dello studio di prove sperimentali di vita a basse profondità di scarica ed alte correnti.

Nell'applicazione in esame il rapporto tra l'energia utilizzata in ogni singolo ciclo di riferimento con quella nominale installata (figura 27) non supera mai il 12%; nell'ipotesi che gli effetti della maggior corrente siano perfettamente compensati dagli effetti della minor profondità di scarica rispetto al 20% prima considerato, si può ancora ipotizzare nel caso studiato una vita utile di circa 20000 cicli.

Questo valore va comparato con il numero di cicli annui attesi che varia, sulla base dei dati attualmente in possesso, in funzione della potenza installata dell'accumulo da 3500 a 7500 (a potenze di accumulo più basse corrispondono più bassi numeri di cicli).

#### **4.4 Dimensionamento e Layout nel caso prescelto**

Tra le varie soluzioni proposte, il dimensionamento ottimo, ovvero quello che comporta il massimo vantaggio economico, sarà determinato sulla base dell'attività 4 del presente contratto di ricerca.

Al momento viene definito un dimensionamento minimo, con costi di impianto contenuti e compatibili al budget di spesa disponibile, che permette tuttavia di ottenere vantaggi economici sia pur in maniera ridotta.

Il dimensionamento prescelto è quello che permette un taglio del picco di potenza richiesta dall'azionamento sulla sezione DC pari a 110kW (ultima riga delle tabelle XI e XIII).

La potenza massima assorbibile dalla sezione AC è dunque pari a 950kW al massimo.

La configurazione del sistema di accumulo al Litio Polimerico prevede l'installazione di un convertitore DC/DC tra il pacco di accumulatori ed il bus DC. Il risultato è la realizzazione di un pacco batterie sulla base di celle Ultra High Power Kokam da 12 Ah. Il numero di celle  $N$  deve essere nell'intervallo 150-190 (in base alla realizzazione del pacco).

La singola cella ha una tensione che varia da 4.2V (fine carica) a 2.7 V (fine scarica).

Alcune opzioni di realizzazione dell'intero pacco possono essere:

- a) tutte le celle in serie, in modo che la tensione totale sia pari alla tensione di cella moltiplicata per  $N$
- b) pacco con un parallelismo interno semplice (serie di coppie di paralleli), in modo che la tensione totale sia pari alla tensione di cella moltiplicata per  $N/2$ ,

- c) due semipacchi ciascuno con  $N/2$  celle parallelati attraverso il convertitore a due uscite indipendenti.
- d) Due semipacchi ciascuno con  $N/2$  celle parallelati su una singola uscita del convertitore.

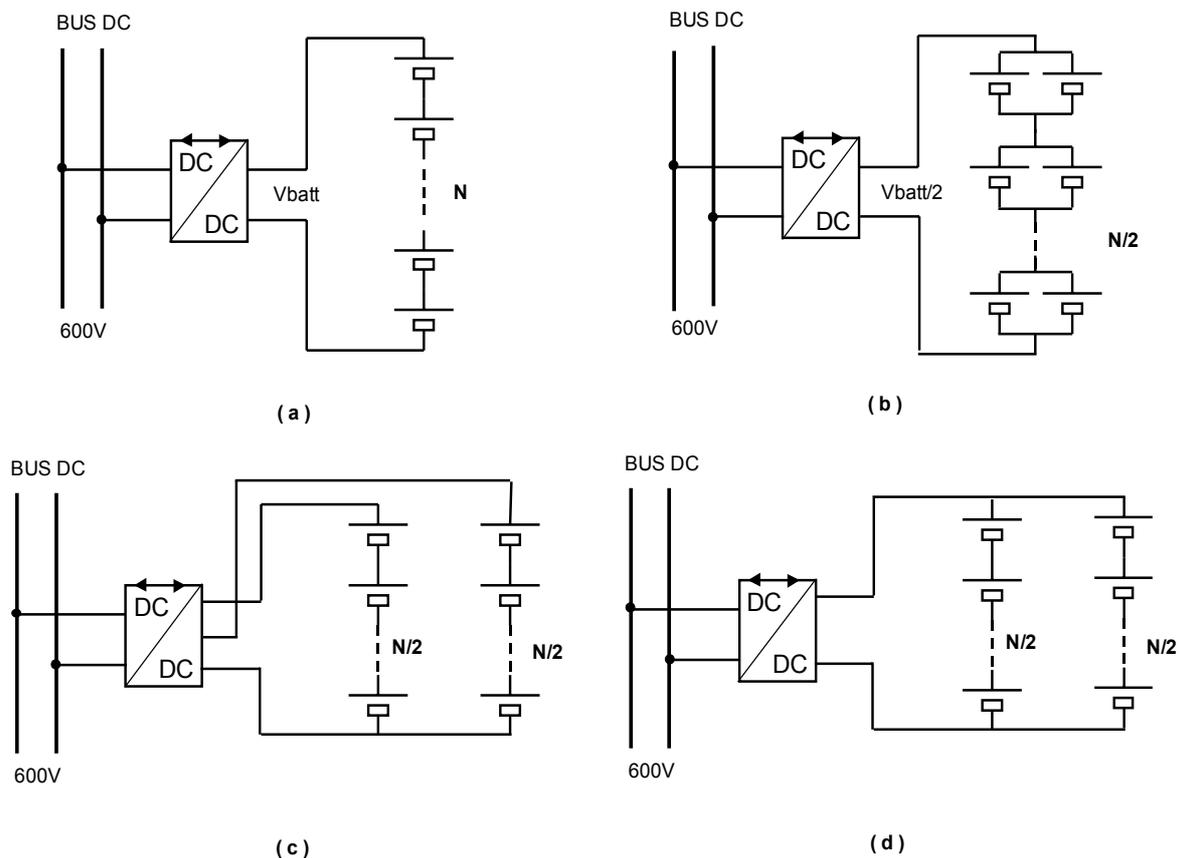


Fig. 30: Possibili schemi circuitali della soluzione proposta.

Se il costruttore confermerà la possibilità di realizzare tutte queste soluzioni, la scelta verrà fatta in funzione della realizzazione del convertitore DC/DC di interfacciamento con il bus interno dell'azionamento.

La soluzione *a* presenta una tensione del pacco doppia rispetto alle altre soluzioni (si veda tabella XIV).

Nell'applicazione in esame è preferibile che la tensione operativa del pacco sia o sempre inferiore o sempre superiore a quella del bus, per evitare una complessa architettura del convertitore DC/DC che si troverebbe a funzionare sia da abbassatore che elevatore. Inoltre la

soluzione con tensione sempre maggiore è sconsigliabile in quanto implicherebbe l'utilizzo di valvole del convertitore con classe di tensione superiore.

Le soluzioni *b, c* e *d* sono dunque preferibili perché presentano una tensione di pacco sempre inferiore a quella del bus. In particolare le configurazioni *b* e *d* consentirebbero un'architettura semplice, ma con correnti doppie rispetto alla configurazione *a*. La soluzione *c* invece pur presentando una architettura del convertitore *a doppia gamba*, ha il vantaggio di utilizzare valvole dimensionate per la metà della corrente richiesta nelle altre soluzioni.

Infine la soluzione *b* presenterebbe il vantaggio, se confermata la sua fattibilità da parte del costruttore, di avere un BMS più snello in quanto sarebbe necessario monitorare solo la metà delle celle del pacco batteria, essendo queste a due a due in parallelo e dunque alla stessa tensione.

Tab. XIV: Tensioni operative del pacco accumulatori Li-Po nelle varie configurazioni.

Configurazioni pacco	<i>190 celle</i>		<i>150 celle</i>	
	<i>a</i>	<i>b, c</i>	<i>a</i>	<i>b, c</i>
$V_{nom}$ [V]	703	351.5	555	277.5
$V_{max}$ [V]	798	399	650	325
$V_{min}$ [V]	513	256.5	405	202.5

Le correnti di scarica di ciascun modulo Kokam 12Ah-3.7V sono riportate nella tabella secondo i datasheet del costruttore.

Tab. XV: Caratteristiche accumulatori Kokam Ultra High Power LiPo.

Part #	Model	Capacity (Ah)	Dimension (mm)			Weight (g)	Max. Discharge Rate (C)		Peak Power Density (W / Kg)
			Thickness	Width	Height		Continuous	Pulse	
720005-0101A	SLPB 45205130P	7.2	4.5 ± 0.5	206 ± 2.0	130 ± 2.0	226 ± 10	5	20	2600
012K05-0101A	SLPB 70205130P	12	7.0 ± 0.5	206 ± 2.0	130 ± 2.0	354 ± 15	5	20	1850

La corrente massima continuativa non può superare 60A, mentre in condizioni di scariche impulsive possono essere raggiunte correnti fino a 240A. Tuttavia nei dimensionamenti sono state considerate scariche per brevi durate fino a 180A al massimo.

Infine per quanto concerne i layout, indipendentemente dalla configurazione che verrà scelta, sono possibili diverse disposizioni delle celle tutti caratterizzati da una estrema compattezza.

Ad esempio è possibile realizzare due case compatti ciascuno con 75 celle, ogni case con dimensioni dell'ordine (L)1500x(W)300x(H)200 mm ottenuto impilando le celle una di fianco all'altra.



Fig. 31: Dimensioni e layout delle celle Kokam LiPo.

Ipotesi di calcolo analisi costi benefici

L'analisi costi-benefici è stata eseguita considerando l'effetto di una possibile introduzione di sistemi di propulsione innovativi per impianti a fune in sostituzione di quelli tradizionali. Nell'analisi sono stati calcolati tutti i costi legati all'acquisto e installazione di nuovi dispositivi, non considerando tutte quelle voci di costo che sono legate a componenti o sottosistemi comunque presenti negli impianti tradizionali.

Infatti essendo definite le specifiche per la trazione, il sistema di propulsione composto da motori elettrici e convertitori DC/AC restano dimensionati alla stesso modo per entrambe le soluzioni. I sottosistemi che caratterizzano la soluzione innovativa invece, come ad esempio il convertitore di rete o il sistema di accumulo, sono stati considerati nel dettaglio per questa analisi economica.

## 5 Analisi dei costi

L'analisi consiste nella determinazione del costo d'impianto. Normalmente quando si parla di costi si deve distinguere il costo di primo impianto dal costo totale attualizzato sulla vita utile dello stesso.

Il costo di primo impianto è il costo che si sostiene al momento della realizzazione dello stesso ed è pari alla somma dei costi di impianto di ogni singolo componente o sottosistema ed è esprimibile attraverso la relazione (1).

$$C_{IMP} = C_{BOP} + \sum_{k=1}^{N_{sottosistema}} C_{1IMP\_sottosistema_k} \quad (1)$$

Nel caso dell'impianto in esame per il costo di primo impianto viene considerato solo il costo del convertitore di rete e del sistema di accumulo con rispettivo Balance Of Plant (BOP). I costi dell'azionamento e dei sistemi ausiliari non sono stati considerati in quanto comunque sostenuti sia nella soluzione innovativa che quella tradizionale.

Poiché non tutti i componenti avranno la stessa vita utile e in via del tutto generale queste possono essere diverse da quella dell'impianto, si è determinato il costo di impianto totale attualizzato tenendo conto delle loro sostituzioni, e anche delle manutenzioni ordinarie o straordinarie. Il costo totale attualizzato può dunque essere descritto dalla relazione (2).

$$C_{IMP} = C_{1IMP} + \sum_{k=1}^{N_{SOST}} C_{SOST\_ATT_k} + \sum_{k=1}^{N_{ManStr}} C_{Man.Straord.\_ATT_k} + \sum_{k=1}^{N_{ManOrd}} C_{Man.Ord.\_ATT_k} \quad (2)$$

dove:

- $C_{1IMP}$  è il costo di primo impianto.
- $C_{SOST\_ATT_k}$  è il costo attualizzato delle sostituzioni effettuate per alcuni sottosistemi.
- $C_{Man.Straord.\_ATT_k}$  è il costo attualizzato delle manutenzioni straordinarie effettuate su alcuni sottosistemi.
- $C_{Man.Ord.\_ATT_k}$  è il costo attualizzato delle manutenzioni ordinarie effettuate su alcuni sottosistemi.
- $N_{SOST}$  è il numero delle sostituzioni effettuate, queste dipendono dalla vita utile del componente e dell'impianto:

$$N_{sostituzioni} = \frac{Vita\ utile\ impianto}{Vita\ utile\ sottosistema} - 1$$

- $N_{Man.Straord.}$  è il numero delle manutenzioni straordinarie effettuate su alcuni sottosistemi per tutta la vita utile dell'impianto.
- $N_{Man.Ord.}$  è il numero delle manutenzioni ordinarie effettuate su alcuni sottosistemi per tutta la vita utile dell'impianto.

Nella figura 32 viene riportato un esempio della determinazione dei costi per un sottosistema, in cui tutti i costi sostenuti all'esimo anno di vita utile dovuti o alla sostituzione del

sottosistema o ad una sua manutenzione ordinaria/straordinaria vengono riportati all'anno zero attualizzandoli moltiplicandoli per il fattore  $1/(1+\alpha)^k$ .

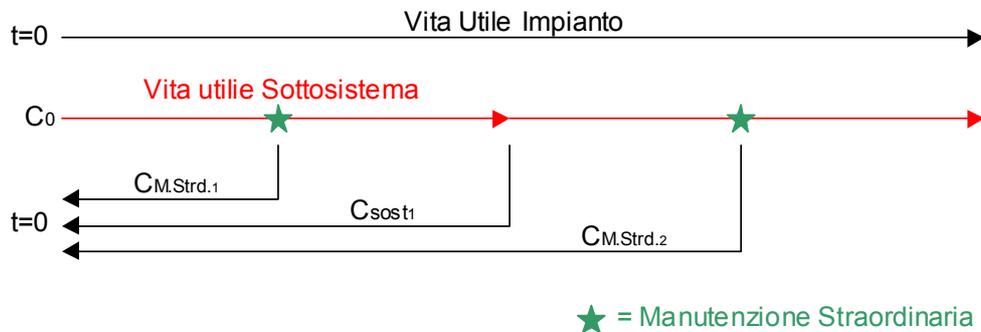


Fig. 32: Esempio di determinazione dei costi per ciascun sottosistema.

### 5.1 Determinazione della funzione di costo

La funzione di costo d'impianto può essere espressa in funzione di due variabili di progetto quali  $P_{CR}$  ed  $E_{ACC}$ . La prima rappresenta la potenza installata nel convertitore di rete, la seconda rappresenta l'energia installata nel sistema di accumulo.

Comunemente si considera il rapporto  $P_{CR}/E_{ACC}$  o analogamente dal rapporto  $E_{ACC}/P_{CR}$  (espresso in ore) tra l'energia dell'accumulo e la potenza del convertitore di rete:

$$h = \frac{E_{ACC}}{P_{CR}} = \frac{[kWh]}{[kW]} \quad (3)$$

Il valore h rappresenta le ore di dimensionamento del sistema di accumulo.

Se si ipotizza un andamento di tipo esponenziale si può scrivere:

$$C_{IMP} = A + k_p \left( \frac{P}{P_0} \right)^\alpha + k_h \left( \frac{h}{h_0} \right)^\beta \quad (4)$$

$P_0$  e  $h_0$  sono la potenza e le ore di dimensionamento d'accumulo in una configurazione presa come riferimento.

I parametri A,  $k_p$ ,  $k_h$ ,  $\alpha$  e  $\beta$  sono parametri che possono essere determinati conoscendo i costi di impianto, per differenti configurazioni in termini di taglia di potenza e ore di dimensionamento.

Inoltre è presente un termine indipendente sia da P che da E, che rappresenta un costo fisso che deve essere comunque sostenuto.

## 5.2 Vita utile dell'impianto

La vita utile dell'impianto si ipotizza essere di 20 anni.

Si ipotizza un tasso di attualizzazione  $\alpha = 7\%$ .

## 5.3 Convertitore di rete

Per il convertitore di rete si ipotizza una vita utile pari a quella dell'impianto. Il costo per unità di potenza di un convertitore elettronico si è stimato essere:

$$c_{1Conv\_RETE} = 100 \text{ €} / kW \text{ per un sistema da 1 MW} \quad (5)$$

Il costo di primo impianto per effetto dell'economie di scala risulta:

$$C_{1Conv\_RETE} = 5 + 95 \cdot \left( \frac{P}{1000} \right)^{0.66} \text{ k€} \quad \text{con } P = [kW] \quad (6)$$

L'impianto tradizionale prevede un convertitore lato rete con potenza nominale pari ad un 1MW, capace di alimentare direttamente, senza alcun altro sistema di accumulo, gli azionamenti elettrici per la trazione in condizioni di massime prestazioni richieste.

Nelle diverse soluzioni innovative dell'impianto la potenza installata nel convertitore di rete è sempre minore della massima potenza richiedibile dall'azionamento alle massime prestazioni. Questo comporta un down-sizing del componente che si traduce in un beneficio.

## 5.4 Sistema di accumulo

L'analisi dei costi differisce a seconda della tecnologia:

- Accumulatori al Piombo Acido (Pb)
- Supercondensatori (UC)
- Accumulatori al Litio-Polimeri (LiPo)

Per ciascuna di queste tecnologie è differente sia la vita utile che la modalità di funzionamento operativa dell'impianto. In particolare la vita utile dei supercondensatori è stimata essere pari a quella dell'impianto, mentre per gli accumulatori al piombo e quelli a Litio-Polimeri sono previste diverse sostituzioni.

In generale la formula di costo del sistema di accumulo può essere espressa dalla relazione (7).

$$C_{ACC} = C_{CONV} + C_1 + \sum_{k=k^*} \frac{C_1}{(1+\alpha)^k} \quad (7)$$

dove  $C_{CONV}$  è il costo del convertitore DC/DC se installato,  $C_1$  è il costo di primo impianto dell'accumulo che è dipende ovviamente dalla tecnologia scelta, mentre  $k^*$  rappresentano gli anni in cui vengono effettuate le sostituzioni del pacco.

Le sostituzioni dipendono dalla profondità di scarica scelto per i sistemi di accumuli, per i dettagli vedere § 4.3 della relazione attività 1-3 del presente contratto.

Sempre nella relazione (7) il convertitore del sistema di accumulo compare solo all'anno zero (al momento della realizzazione dell'impianto) in quanto esso ha una vita utile pari a quella dell'impianto stesso.

La tabella I riassume le sostituzioni da effettuare nel caso di accumulatori al Piombo e Litio Polimerico. In particolare per entrambi le soluzioni sono state previste una sostituzione ogni 3 anni.

La durata degli accumulatori è la stessa in quanto il dimensionamento del sistema di accumulo sviluppato sulla base di precise specifiche di potenza, ha comportato nel caso di accumulatori al piombo, un sizing sovradimensionato in termini di energia, con conseguente aumento della vita media in quanto il componente viene sfruttato in cicli con bassa profondità di scarica.

*Tab. XVI: Sostituzioni del sistema di accumulo durante la vita utile dell'impianto.*

ANNO [k]	Sostituzioni [k*]		
	Pb	LiPo	UC
1			
2			
3	*	*	
4			
5			
6	*	*	
7			
8			
9	*	*	
10			
11			
12	*	*	
13			
14			
15	*	*	
16			
17			
18	*	*	
19			
20			

### 5.4.1 Costi per la soluzione con Supercondensatori

Nel caso dei supercondensatori i risultati dei dimensionamenti al variare della potenza installata nel convertitore lato rete sono riportati in tabella VI.

Tab. XVII: Dimensionamento dell'accumulo con moduli Maxwell 125V-63F.

Potenza conv. AC rete [kW]	Potenza conv. DC rete [kW]	# Moduli parallelo	# Moduli serie	Energia nominale installata [kWh]
278	250	34	4	13.8
500	450	21	4	8.5
556	500	18	4	7.3
667	600	12	4	4.9
833	750	5	4	2.0
944	850	1	4	0.41

Il costo dei supercondensatori è sicuramente funzione a seconda del numero di moduli richiesto. Normalmente i costruttori indicano il costo per unità di capacità immagazzinata nella singola cella. Tale costo varia da 1 a 3.5€cent/F a seconda che si tratti di prototipo o produzione in serie.

In figura 33 si riporta il costo dell'intero sistema al variare della potenza installata nel convertitore lato di rete, dove non sono stati considerati i convertitori DC/DC.

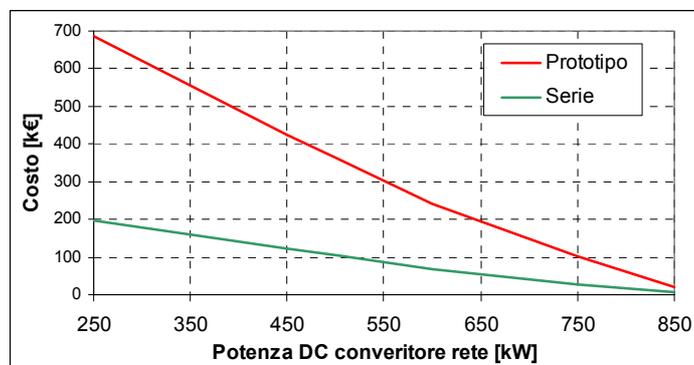


Fig. 33: Andamento del costo dei supercondensatori per diversi dimensionamenti del convertitore lato di rete.

Tali costi rappresentano sia quello di primo impianto che quello attualizzato a meno del convertitore del sistema di accumulo, in quanto non sono previste sostituzioni dei supercondensatori.

Tab. XVIII: Costo dei soli supercondensatori Maxwell 125V-63F.

Potenza convertitore di rete DC (AC) [kW]	# Moduli	Costo Serie [k€]	Costo Prototipo [k€]
250 (278)	136	196	685

450 (500)	84	121	424
500 (556)	72	104	363
600 (667)	48	70	242
750 (833)	20	29	101
850 (944)	4	6	21

#### 5.4.2 Costi per la soluzione con accumulatori al Piombo

Per questa tecnologia sono state considerati gli accumulatori Genesis. Tali moduli hanno capacità variabili da 13 a 70Ah, e per le prestazioni richieste si è preso come riferimento il modulo con capacità superiore.

I dimensionamenti ottenuti al variare della potenza installata nel convertitore lato rete sono riportati nella tabella IX.

Tab. XIX: Dimensionamento dell'accumulo con moduli Genesis 12V-70Ah.

Potenza conv. DC rete [kW]	# Moduli parallelo	# Moduli serie	Energia nominale installata [kWh]
250	6	50	252
450	4	50	168
600	3	50	126
750	2	50	84
850	1	50	42

Normalmente il costo di accumulatori al Piombo-Acido per uso in potenza è decisamente diverso da quelle di energia che attualmente vengono vendute a 120€/kWh nominali. In figura si riporta il costo dell'intero sistema di accumulo al variare della potenza installata nel convertitore lato rete ipotizzando un costo per accumulatori di potenza pari al doppio di quelle di energia.

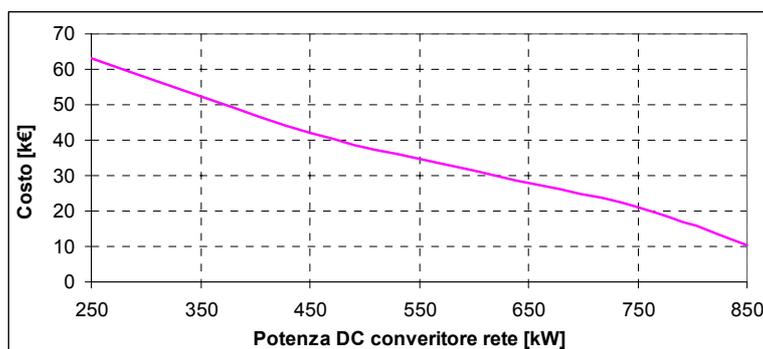


Fig. 34: Costo degli accumulatori al Piombo-Acido per diversi dimensionamenti del convertitore di rete.

Come già accennato il numero i cicli di funzionamento all'interno dell'arco di vita utile dell'impianto sono notevolmente superiori a quelle attese per un singolo accumulatore anche considerando per ogni ciclo una modesta profondità di scarica (circa il 5%, cfr fig. 22 della relazione attività 1-3 del presente contratto), per questo motivo sono previste delle sostituzioni del pacco ogni tre anni e manutenzioni ordinarie ogni anno secondo come riportato nella tabella I. Le manutenzioni sono considerate avere un costo pari al 2% del costo di primo impianto del sottosistema.

#### 5.4.3 Costi per la soluzione con accumulatori al Litio-Polimero

Nella tabella XI sono riportati i risultati del dimensionamento dell'accumulo nel caso di diverse potenze installate del convertitore di rete. Sono state considerate accumulatori della casa costruttrice Kokam.

*Tab. XX: Dimensionamento dell'accumulo Li-Po con moduli Kokam.*

Potenza convertitore di rete. DC (AC) [kW]	Modulo	# Moduli parallelo	# Moduli serie	Energia nominale installata [kWh]
250 (278)	100K05-0101A High Power Cell 100Ah	3	98	108.8
450 (500)	100K05-0101A High Power Cell 100Ah	2	105	77.7
600 (670)	070K05-0101A High Power Cell 70Ah	2	85	44.0
750 (833)	031K05-0101A High Power Cell 31Ah	2	112	25.7
<b>850 (944)</b>	<b>012K05-0101A</b> <b>Ultra High Power Cell</b> <b>12Ah</b>	<b>2</b>	<b>95</b>	<b>8.4</b>

Per quanto concerne i costi i distributori forniscono un costo unitario pari ad un dollaro per Wh di energia nominale, essendo quest'ultima determinata come prodotto di capacità nominale per tensione media di cella (3.7 V/cella).

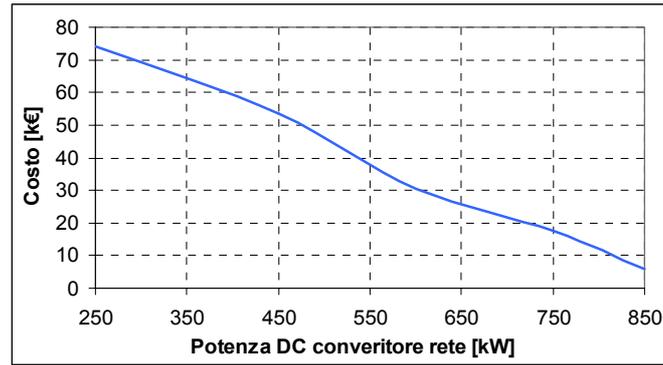


Fig. 35: Costo degli accumulatori Li-Po per diversi dimensionamenti del convertitore di rete.

Tab. XXI: Costo dei Li-Po della Kokam.

Potenza convertitore di rete DC (AC) [kW]	Modulo	# Moduli	Costo totale [k€]
250 (278)	100K05-0101A High Power -100Ah	294	76
450 (500)	100K05-0101A High Power - 100Ah	210	53
600 (670)	070K05-0101A High Power - 70Ah	170	30
750 (833)	031K05-0101A High Power - 31Ah	224	18
<b>850 (944)</b>	<b>012K05-0101A</b> <b>Ultra High Power - 12Ah</b>	<b>190</b>	<b>6</b>

Nel grafico di figura 28 sono riportati i costi delle diverse soluzioni considerate. A tale costo deve essere aggiunto il costo del contenitore e del BMS (Battery Management System). Infatti i pacchi di questi accumulatori sono soggetti a problemi di sbilanciamento di carica, necessitano di un sistema di monitoraggio ed equalizzazione. Il costo del BMS all'attuali condizioni di mercato ha un'entità comparabile a quello del pacco accumulatore. E' da ritenersi comunque che questo costo, ancora relativo a dispositivi quasi prototipali, possa ridursi notevolmente in conseguenza della diffusione di batterie al Litio di notevole potenza, sia per applicazioni stazionarie che veicolari.

### 5.5 Balance of Plant (BOP)

Il costo del Balance Of Plant si assume pari al 25% del costo di primo impianto dei vari sottosistemi.

## 6 Analisi dei benefici

In generale, benefici economici ottenibili con un opportuno dimensionamento dell'impianto ed una intelligente gestione dello stesso, possono essere classificati come di seguito:

benefici legati alla riduzione della quantità di energia annua assorbita;  
benefici dovuti alla riduzione della potenza impegnata dal distributore;  
benefici derivanti dallo spostamento dell'utilizzazione dell'energia in orari con prezzi più bassi.

In particolare, i vantaggi economici derivanti dal diverso assorbimento di energia dell'impianto in esame, analizzando la composizione dei costi che portano alla individuazione delle tariffe<sup>1</sup>, sono rilevabili da quanto indicato di seguito:

la tariffa per il servizio di misura e di trasmissione resta invariata;  
la tariffa per il servizio di distribuzione diminuisce sia per la riduzione della potenza di picco, sia perché è diminuito il volume dell'energia annua assorbito;  
le componenti tariffarie di tipo A e varie UC, legate ad oneri generali, restano invariate;  
le CCA (Componenti di Costo di Acquisto) dipendono fortemente dalle fasce orarie considerate oltre che dal consumo annuo di energia. Nel caso in esame il quantitativo annuo assorbito è minore ( per effetto dei recuperi in frenatura), ma non tale da far cambiare il prezzo del kWh acquistato, né si possono ipotizzare spostamenti degli acquisti dell'energia in fasce più economiche avendo, per ipotesi, mantenuto lo stesso andamento della richiesta di mobilità. Pertanto i vantaggi economici derivano esclusivamente dalla minore quantità di energia richiesta e dalla minore potenza impegnata.

### **6.1 Modalità di funzionamento dell'impianto**

Il carico giornaliero si può ricostruire considerando il numero di persone massimo trasportabili nelle ore di punta (475persone/h) e nelle altre ore della giornata (300persone/h).

Per le ore di punta si può fare riferimento al ciclo elementare *corsa veloce Salita/Discesa veloce con 100 persone*, mentre per le rimanenti si è considerato il ciclo elementare *corsa lenta Salita/Discesa lenta con 100 persone*.

Il carico annuale prevede un funzionamento dell'impianto sia estivo (Giugno-Settembre) che invernale (Novembre-Aprile), in cui si prevedono da 3500 a 7500 corse l'anno per un totale massimo di 660 ore complessive di viaggio/anno.

---

<sup>1</sup> Rif.al sito <http://www.autorita.energia.it/>

## 6.2 Determinazione del costo dell'energia consumata

Il costo dell'energia consumata dall'impianto può essere semplicemente stimata facendo riferimento alla tabella XXII, in cui vengono riportate le varie componenti di costo.

Tab. XXII: Ripartizione delle voci di costo dell'energia per varie tipologie di carichi.

Tipologie di contratto di cui al comma 2.2		Quota fissa centesimi di euro/punto di prelievo per anno	Quota potenza centesimi di euro/kW per anno	Quota energia centesimi di euro/kWh	NOTE
lettera b)	Utente in bassa tensione di illuminazione pubblica	-	-	1,210	
lettera c)	Altre utenze in bassa tensione con potenza disponibile fino a 16,5 kW	450,24	2.745,71	0,105	per potenze impegnate inferiori o uguali a 1,5 kW
		450,24	2.608,42	0,105	per potenze impegnate superiori a 1,5 kW e inferiori o uguali a 3 kW
		450,24	2.890,22	0,105	per potenze impegnate superiori a 3 kW e inferiori o uguali a 6 kW
		495,26	2.890,22	0,105	per potenze impegnate superiori a 6 kW e inferiori o uguali a 10 kW
	Altre utenze in bassa tensione con potenza disponibile superiore a 16,5 kW	450,24	2.745,71	0,100	per potenze impegnate superiori a 10 kW
lettera d)	Utente in media tensione di illuminazione pubblica	-	-	0,654	
lettera e)	Altre utenze in media tensione con potenza disponibile fino a 100 kW	44.257,98	2.150,76	0,103	
	Altre utenze in media tensione con potenza disponibile superiore a 100 kW e inferiore a 500 kW	39.832,18	2.835,68	0,099	
	Altre utenze in media tensione con potenza disponibile superiore a 500 kW	38.485,20	2.489,10	0,081	
lettera f)	Utente in alta e altissima tensione diverse da quelle di cui alla lettera g)	1.946.442,60	-	0,059	
lettera g)	Utente in altissima tensione, superiore a 220 kV	1.946.442,60	-	0,058	

Con particolare riferimento alle utenze di media tensione, il costo è composto da tre quote. La prima è una quota costante annua per ogni punto di prelievo, che inoltre differisce a seconda della fascia di potenza complessivamente impegnata, in dettaglio esistono tre fasce, una per utenze con una potenza impegnata  $P < 100 \text{ kW}$ , la seconda con  $100 < P < 500 \text{ kW}$  e l'ultima per  $P > 500 \text{ kW}$ .

La seconda quota di costo è invece funzione della potenza complessivamente impegnata ed è espressa in €/kW per anno. Anche questo coefficiente è diverso a seconda della fascia di potenza impegnata.

Infine la quota di costo funzione del volume di energia assorbita viene espressa attraverso un coefficiente in termini di €/kWh per anno, che differisce a sua volta in base alla fascia di potenza impegnata.

## 6.3 Calcolo dei benefici economici in normali condizioni di funzionamento dell'impianto

Il beneficio economico che è possibile ottenere è stato determinato considerando il normale funzionamento dell'impianto descritto nel paragrafo 3.1 sia nel caso di 3500 che 7500 ore di

funzionamento annuo. Attraverso le simulazioni del ciclo equivalente sono state calcolate le energie assorbite dalle varie configurazioni del convertitore di rete e sistema di accumulo al variare della potenza impegnata lato rete. I benefici sono stati infine calcolati considerando la diminuzione di costo rispetto alla soluzione senza sistema di accumulo. I risultati ottenuti sono riassunti nelle tabelle XXIII e XXIV.

*Tab. XXIII: Analisi benefici per i diversi dimensionamenti del sistema di accumulo e del convertitore lato rete nel caso di 7500 cicli di funzionamento anno.*

<b>P<sub>AC</sub></b>	<b>QUOTA</b>	<b>QUOTA</b>	<b>QUOTA</b>	<b>QUOTA</b>	<b>VOLUME</b>	<b>QUOTA</b>	<b>BENEFICIO</b>
	<b>FISSA</b>	<b>POTENZA</b>	<b>POTENZA</b>	<b>ENERGIA</b>	<b>ENERGIA</b>	<b>ENERGIA</b>	
<b>KW</b>	<b>CENT</b>	<b>CENT€/ KW</b>	<b>€/ANNO</b>	<b>CENT€/KWH</b>	<b>KWH/ANNO</b>	<b>K€/ANNO</b>	<b>K€/ANNO</b>
	<b>€/ANNO</b>	<b>ANNO</b>					
<b>278</b>	<b>39832.18</b>	<b>2835.68</b>	<b>7883.20</b>	<b>0.093</b>	<b>72390</b>	<b>120.11</b>	<b>82.02</b>
<b>500</b>			<b>12445.50</b>		<b>98712</b>	<b>149.64</b>	<b>52.48</b>
<b>556</b>			<b>13839.40</b>		<b>104616</b>	<b>156.94</b>	<b>45.19</b>
<b>667</b>	<b>38485.20</b>	<b>2489.10</b>	<b>16602.30</b>	<b>0.081</b>	<b>115800</b>	<b>170.89</b>	<b>31.24</b>
<b>833</b>			<b>20734.20</b>		<b>130938</b>	<b>190.16</b>	<b>11.97</b>
<b>944</b>			<b>23497.10</b>		<b>137744</b>	<b>199.73</b>	<b>2.40</b>
<b>1000</b>			<b>24891.00</b>		<b>138750</b>	<b>202.13</b>	<b>0</b>

*Tab. XXIV: Analisi benefici per i diversi dimensionamenti del sistema di accumulo e del convertitore lato rete nel caso di 3500 cicli di funzionamento anno.*

<b>P<sub>AC</sub></b>	<b>QUOTA</b>	<b>QUOTA</b>	<b>QUOTA</b>	<b>QUOTA</b>	<b>VOLUME</b>	<b>QUOTA</b>	<b>BENEFICIO</b>
	<b>FISSA</b>	<b>POTENZA</b>	<b>POTENZA</b>	<b>ENERGIA</b>	<b>ENERGIA</b>	<b>ENERGIA</b>	
<b>KW</b>	<b>CENT</b>	<b>CENT€/ KW</b>	<b>€/ANNO</b>	<b>CENT€/KWH</b>	<b>KWH/ANNO</b>	<b>K€/ANNO</b>	<b>K€/ANNO</b>
	<b>€/ANNO</b>	<b>ANNO</b>					
<b>278</b>	<b>39832.18</b>	<b>2835.68</b>	<b>7883.20</b>	<b>0.093</b>	<b>33782</b>	<b>81.50</b>	<b>46.63</b>
<b>500</b>			<b>12445.50</b>		<b>46066</b>	<b>97.00</b>	<b>31.13</b>
<b>556</b>			<b>13839.40</b>		<b>48821</b>	<b>101.15</b>	<b>26.98</b>
<b>667</b>	<b>38485.20</b>	<b>2489.10</b>	<b>16602.30</b>	<b>0.081</b>	<b>54040</b>	<b>109.13</b>	<b>19.00</b>
<b>833</b>			<b>20734.20</b>		<b>61104</b>	<b>120.32</b>	<b>7.80</b>
<b>944</b>			<b>23497.10</b>		<b>64280</b>	<b>126.26</b>	<b>1.86</b>
<b>1000</b>			<b>24891.00</b>		<b>64750</b>	<b>128.13</b>	<b>0</b>

## 7 Risultati delle analisi per le varie tecnologie del sistema di accumulo considerate

Le analisi costi-benefici possono essere riassunte in grafici dove si riporta anno per anno la cumulata dei costi e dei benefici attualizzati all'anno 0: anno di installazione dell'impianto.

In maniera cautelativa si è fatto riferimento alla condizione peggiore di usura del sistema di accumulo con 7500 cicli equivalenti anno, ma con i benefici calcolati sia nel caso di 3500 cicli che nel caso di 7500, nel primo caso i benefici saranno notevolmente inferiori in quanto questi in parte sono proporzionali al volume complessivo di energia assorbita dal sistema.

Come per i costi di impianto distribuiti (equ. (2) ) anche per i benefici l'attualizzazione all'anno 0 è fatta considerando un tasso  $\alpha = 7\%$ . Le figure 36, 37, 38, 39 e 40 riportano il caso di dimensionamento con potenza installata del sistema di accumulo rispettivamente pari a 278, 500, 667, 833 e 944 kW installati con 3500 e 7500 cicli di funzionamento l'anno.

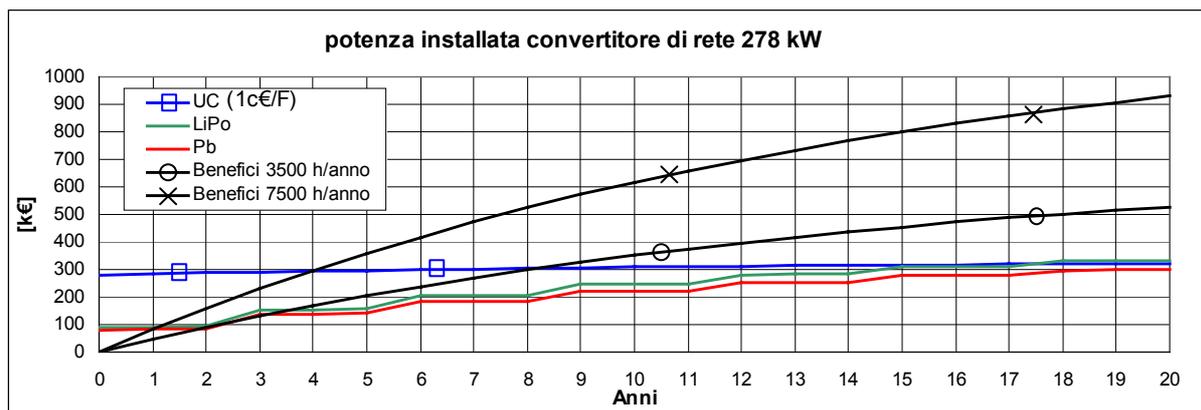


Fig. 36: Analisi costi-benefici nel caso di Potenza del convertitore di rete pari a 278kW.

Nel caso di potenza installata pari a 278kW l'investimento viene recuperato dopo due anni per il caso di 7500 ore di funzionamento annuo e quattro nel caso di 3500 ore. La soluzione con supercondensatori invece ha dei tempi recupero dell'investimento quasi doppi.

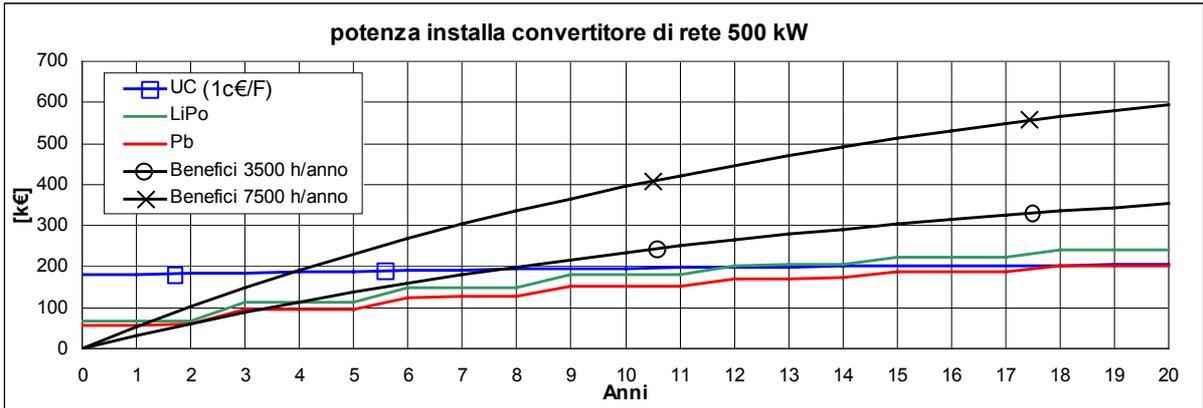


Fig. 37: Analisi costi-benefici nel caso di Potenza del convertitore di rete pari a 500kW.

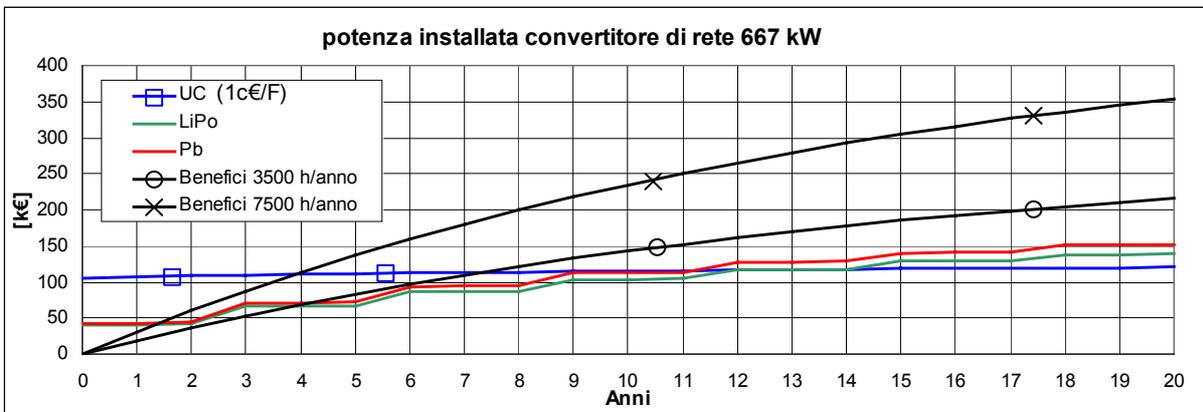


Fig. 38: Analisi costi-benefici nel caso di Potenza del convertitore di rete pari a 667kW.

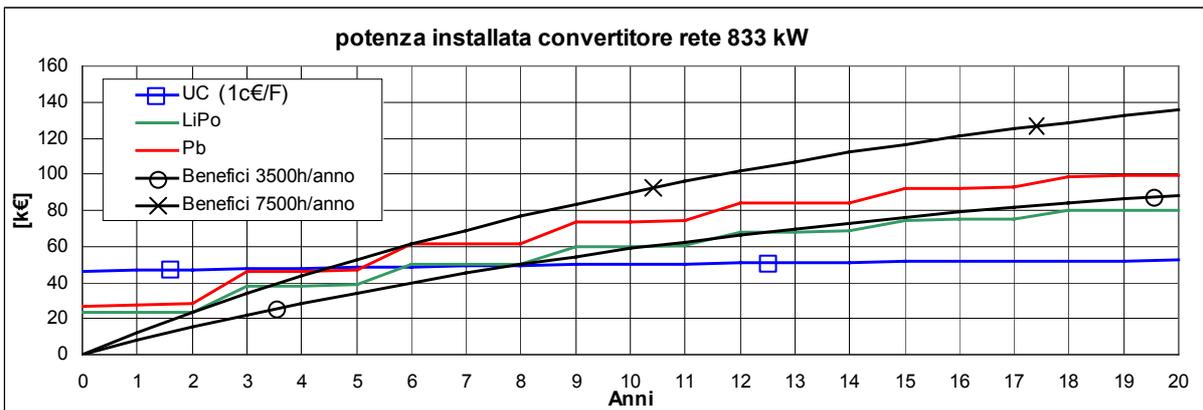


Fig. 39: Analisi costi-benefici nel caso di Potenza del convertitore di rete pari a 833kW.

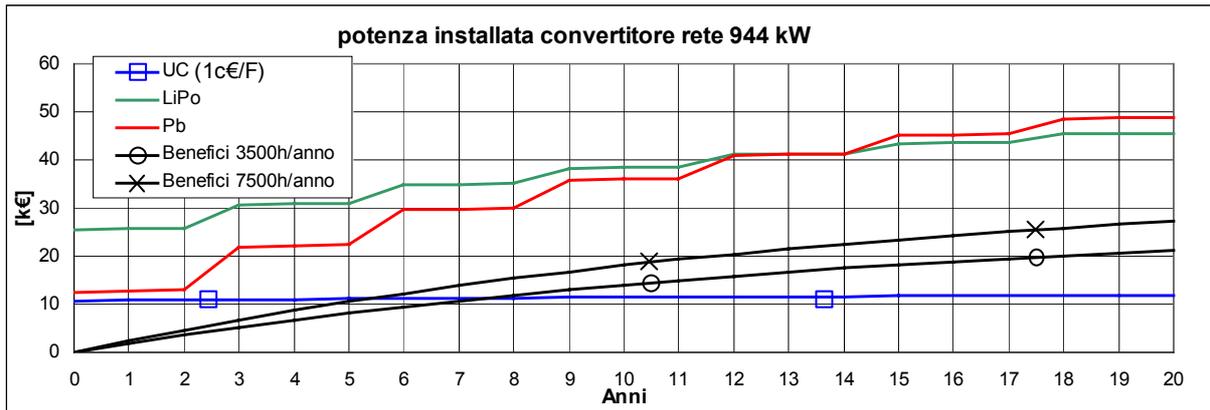


Fig. 40: Analisi costi-benefici nel caso di Potenza del convertitore di rete pari a 944kW.

## 8 Conclusioni

Dall'analisi dei costi e benefici si osserva che per potenze inferiori ai 900kW installati nel convertitore di rete i benefici sono tali da poter ripagare l'investimento all'interno della vita utile dell'impianto. I ritorni di investimento sono più brevi nel caso di potenze installate al di sotto dei 500kW, in cui mediamente è possibile avere un recupero dell'investimento dopo solo 2÷4 anni nel caso di accumulatori al Pb o LiPo e circa 4÷8 anni nel caso di supercondensatori.

## 9 Allegato 1



UNIVERSITÀ DI PISA

**DIPARTIMENTO DI SISTEMI ELETTRICI E AUTOMAZIONE**

Accordo di Programma MSE-ENEA

Tema di ricerca 5.4.3.1

“Promozione delle tecnologie elettriche innovative negli usi finali”

*Attività di ricerca dal titolo:*

***ACCUMULO ELETTRICO CON BATTERIE NEL TERZIARIO:  
L'APPLICAZIONE AD UNA FUNIVIA***

Relazione delle attività 5 del cobeneficiario DSEA

20/04/2009

## 10 Generalità

Il presente documento costituisce relazione conclusiva dell'attività 5 del progetto di ricerca "Accumulo elettrico con batterie nel terziario: l'applicazione ad una funivia" sviluppato nell'ambito dell' "Accordo di Programma MSE-ENEA" relativamente al *Tema di ricerca 5.4.3.1 "Promozione delle tecnologie elettriche innovative negli usi finali"*.

Esso descrive le modalità che dovranno essere adottate per la verifica sperimentale della batteria che è stata individuata dall'Università di Pisa come principale candidata alla sperimentazione dell'applicazione funiviaria cui si è fatto riferimento nelle attività congiunte università di Pisa – ENEA.

I risultati ottenuti saranno evidentemente utilizzabili anche per considerazioni più generali sul comportamento delle batterie al Litio in generale e quelle al Litio di alta potenza in particolare.

Il set di prove prescelto è mirato alla verifica delle prestazioni e dell'invecchiamento di pacchi batterie al litio in generale, ed alla batteria prescelta in particolare, con riferimento ad utilizzazione in impianti per usi stazionari ed in condizioni rappresentative dell'uso reale, con l'obiettivo di fornire gli elementi necessari alla valutazione del costo dell'impianto (Life Cycle Assesment).

Il set è prevalentemente composto da prove stress ciclico delle batterie, secondo alte potenze e brevi durate di scarica, come nell'applicazione studiata, intercalate da verifiche periodiche dello stato di salute della batteria stessa.

Nelle relazioni relative alle attività da 1 a 5 sono stati ipotizzate differenti quantità di energia accumulata, in funzione del valore del picco di potenza che si voleva tagliare per intervento dell'accumulo.

Le prove che verranno descritte nel presente documento sono studiate in maniera che i risultati della sperimentazione, in quanto riferiti alla singola cella, saranno direttamente utilizzabili per tutti i possibili dimensionamenti del pacco da installare, purché composti dalla connessione in serie di celle del tipo considerato, le cui caratteristiche tecniche sono riportate in Appendice A del presente documento.

Fatte le opportune considerazioni sulle specificità delle varie batterie, i risultati che verranno prodotti saranno utilizzabili anche per analisi del comportamento di batterie al Litio di altro tipo, soggette a sollecitazioni del tipo considerato, cioè del tipo di quelle effettivamente presenti in un impianto funiviario.

## 11 Prerequisiti e preparazione del test

Il pacco batterie, Fig.1, è stato dimensionato per raggiungere il picco di potenza di 60 kW, le sue specifiche sono sinteticamente riassunte qui di seguito:

- n. 75 Moduli Li-Po da 12 Ah e tensione nominale di 3.7V ciascuno
- n. 1 BMS (Battery Management System) limiti di intervento: 2.7V, 4.2V, 40°C e 60°C



Fig.1

### 11.1 Equipaggiamento di prova

L'equipaggiamento di prova che verrà utilizzato è riportato nella tabella 1

Table 1. Descrizione dell'equipaggiamento di prova				
Tipo	costruttore	caratteristiche	Note	riferimenti
Battery cycler E-8135	ELTRA	0-165 V Max 600 A		Table B.1
data logger 500a o 34970A	Keithley o Agilent		Misure di temperature e tensioni	
Climatic chamber # EOS 1000	Angelantoni Climatic Systems	- 40 °C + 180 °C	Volume camera: 1000 L accuratezza $\pm 0.5$ °C	

I dati sperimentali verranno registrati dai ciclatori ELTRA e dal sistema di acquisizione dati Keithley o Agilent.

### 11.2 Punti di misura

Corrente : misurata direttamente con uno shunt nel ciclatore.

Tensione di batteria: misurata sul connettore AMP presente sul pacco batterie.

Temperature: misurate con termocoppie tipo K-type. Verrà misurata la temperatura ambiente, quella del modulo più interno ( che scambia di meno) e quella di un modulo esterno.

Tensioni parziali : verranno misurate le tensioni parziali di ogni elemento, tramite il SAD Keithley o Agilent

Tensione a circuito aperto e resistenza interna

Per poter seguire variazioni veloci di queste grandezze, verrà utilizzato il Keithly o l'Agilent, con frequenze di acquisizione rispettivamente di 25 Hz e 0,2 Hz.

La registrazione delle grandezze (esclusa al più la corrente) dovrà essere effettuata anche durante le pause, in quanto l'andamento nel tempo di tensioni e temperature la pausa è indicativo del comportamento dinamico delle batterie, e consente la misura degli OCV.

## 12 Prove da effettuare

### 12.1 Generalità

Nel presente paragrafo si elencano sia le prove preliminari da effettuare sulla batteria per la definizione ottimale dei parametri delle prove per la determinazione dell'invecchiamento, sia le prove stesse per la determinazione dell'invecchiamento (ciclo vita).

### 12.2 Definizione delle tipologie di prove

Si riporta nel presente paragrafo la definizione delle varie prove che si richiede vengano effettuate.

L'effettiva sequenza delle prove da effettuarsi sarà riportata nel par. 12.3. In quella sede verrà specificata anche la temperatura dell'ambiente in cui saranno poste le batterie in prova. Per la spiegazione degli acronimi CS, S-###,  $P_{MI}$ , CVE, si rimanda all'Appendice A.

#### 12.2.1 Set di prove preliminari

Le prove preliminari sono composte da una ispezione visiva più prove di formazione elettrica. La formazione elettrica è composta dalle seguenti fasi:

N. Fase	Tipo
1	CS
2	S-C/5
3	CS
4	S-C/5
5	CS
6	S-C/5
7	CS

#### 12.2.2 Individuazione della massima potenza $P_{mxCVE}$

La definizione del Ciclo Vita Elementare (riportata in 13.2.1) fa riferimento ad un'intera famiglia di cicli: un ciclo è completamente determinato solo quando sia noto il valore del parametro  $P_{max}$ .

Per poter effettuare prove di CVE, è quindi indispensabile scegliere il valore di  $P_{max}$  con cui fare le prove, che verrà indicato con il simbolo  $P_{mxCVE}$ .

Tale determinazione viene effettuata secondo la procedura riportata nella seguente tabella:

N. Fase	Tipo	Note
1	CS	-
2	sequenza di CVE a $P_{max}=P_{MI}$	$P_{MI}$ è definito in 13.1.5. Condizioni di terminazione della sequenza (è sufficiente il raggiungimento di una di esse): 1. la massima temperatura durante il singolo CVE differisce da quella del precedente per meno di 2°C; essa è detta $T_{max}$ . 2. la massima temperatura durante il singolo CVE supera 40°C
3	sequenza di CVE	(si effettua solo se $T_{max}$ supera 40°C) La nuova sequenza si effettua con $P_{max}$ opportunamente ridotta fino a che non si individua un valore in grado di causare a regime una temperatura del case di batteria di circa 40 °C.

### 12.2.3 Prove di Identificazione Parametri

Queste prove hanno come obiettivo la valutazione delle caratteristiche della batteria dopo che è essa è stata invecchiata da una sequenza di cicli.

Ne vengono definiti due tipi, descritti rispettivamente dalle tab. XXV e XXVI.

*Tab. XXV: Prova Completa di Identificazione Parametri*

N. fase	Tipo
1	CS
2	S-C/4 + P-30
3	CS
4	S-5C + P-60
5	CS + P-120
6	S-10C + P-120

Tab. XXVI: Prova Parziale di Identificazione Parametri

N. fase	Tipo
1	CS
2	S-C/4 + P-30
3	CS + P-120
4	S-10C+ P-120

#### 12.2.4 Prova di invecchiamento

E' una prova complessa composta da cicli elementari ripetuti e periodiche prove di identificazione parametri, secondo il seguente schema:

N. fase	Tipo	Note
1	CS	
2	Sequenza di N. 500 CVE	def. di CVE in Appendice B
3	Prova Parziale Identificazione Parametri	cfr. par. 12.2.3
-	ripetizione di fasi 2 e 3	Condizioni di terminazione della sequenza (è sufficiente il raggiungimento di una delle condizioni): 1. durante la fase 3 la capacità erogata durante una prova S-030 è inferiore all'80% del valore di capacità ottenuta nella prova S-030 della Prova Completa di Identificazione parametri che viene effettuata prima dell'inizio della prova di invecchiamento (cfr., par.12.3 ) 2. il numero di CVE complessivamente effettuato è almeno 5000

#### 12.3 Elenco delle prove

Tutte le prove che verranno effettuate dovranno essere terminate qualora si verifichi una delle condizioni specificate nel par. 13.1.1.

Le prove che verranno effettuate saranno, in sequenza:

- N. 1 set di Prove Preliminari (come da par. 12.2.1);  $T_{amb} = 20^{\circ}\text{C}$
- Individuazione della Massima Potenza (come da par.12.2.2)  $T_{amb} = 20^{\circ}\text{C}$
- N. 3 Prove Complete di Identificazione Parametri (come da par. 12.2.3) rispettivamente alle temperature ambiente di  $-15^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $20^{\circ}\text{C}$ .
- Prova di Invecchiamento (come da par. 12.2.4) alla temperatura ambiente di  $20^{\circ}\text{C}$ .
- N. 3 Prove Complete Identificazione Parametri (come da par. 12.2.3) rispettivamente alle temperature ambiente di  $-15^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $20^{\circ}\text{C}$ .

## 13 Appendice A: Definizioni e procedure di prova

### 13.1 Definizioni

#### 13.1.1 Terminazione assoluta

Qualsiasi prova venga effettuata essa dovrà essere immediatamente terminata qualora si verifichi anche una sola delle seguenti condizioni:

- temperatura involucro batteria > 60°C
- tensione di una qualunque delle celle inferiore a 2,7 V

#### 13.1.2 Scarica completa a corrente costante (S-C/n o S-nC)

Le scariche complete a corrente costante verranno effettuate al valore di corrente indicato nella sigla, espresso in frazioni o multipli della capacità nominale (pari per la batteria in esame a 12 Ah) fino alla tensione di fine scarica raccomandato dal costruttore per il tipo di batterie in esame e pari a 2,7 V/elem.

Ad esempio la scarica S-C/4 è una scarica a corrente costante pari 3 A, mentre la scarica S-10C è a 120°.

#### 13.1.3 Carica Standard (CS)

Carica della batteria considerata “standard” per il progetto in esame, definita dai seguenti parametri:

- tipo di carica U-I con tratto a tensione costante posto a 4,2 V/el e tratto a corrente costante con corrente del valore di 12 A
- temperatura dell’ambiente in cui è posta la batteria: 20°C

#### 13.1.4 Pausa (P-## o P-###)

Si tratta di un intervallo di tempo della durata di “##” o “###” minuti durante il quale la corrente di batteria è nulla.

Ad esempio con P-30 e P-120 si intendono pause (a corrente di batteria nulla) di 30 e 120 minuti primi rispettivamente.

#### 13.1.5 Potenza massima iniziale ( $P_{MI}$ )

La potenza massima iniziale è il valore di primo tentativo assunto per prove che richiederanno l’applicazione di una potenza massima ripetitivamente applicata (in particolare  $P_{max}$  del CVE, come definita nel par. 13.2.1).

Numericamente il suo valore si ricava come segue:

$$P_{MI} = I_{10C} V_{m\_sc} \quad (1)$$

dove:

- $I_{10C}$  è una corrente in A pari a 10 volte la capacità nominale della batteria in Ah
- $V_{m\_sc}$  è la tensione media di scarica della batteria alla corrente  $I_{10C}$

Per la batteria considerata è  $P_{MI} = 10 \times 12 \times 3,6 \cong 430$  W/el.

## 13.2 Prove e cicli elementari

### 13.2.1 Ciclo-Vita Elementare (CVE)

Il test vita è costituito dalla ripetizione consecutiva di un opportuno profilo di carica/scarica detto *Ciclo-Vita Elementare (CVE)*.

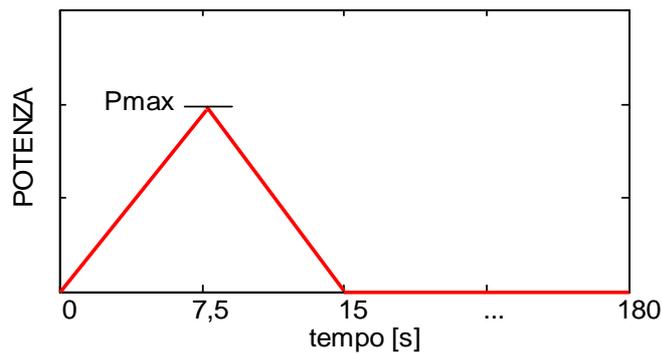
Il suo andamento, una volta prefissato un certo valore di  $P_{max}$ , è determinabile e costituito da una successione di 4 fasi, secondo quanto riportato in tabella B1.

*Tabella B1: Ciclo elementare per l'esecuzione del test vita.*

#		Tempo [s]	Durata [s]	Dettagli
1	Scarica con profilo di potenza	0÷15	15	V. figs. B1 / B2
2	Pausa	15÷180	165	
3	Carica in modalità IU	180÷360	180	V. fig. B3
4	Pausa	360÷800	440	-

### 13.2.2 Profilo di potenza della fase di scarica

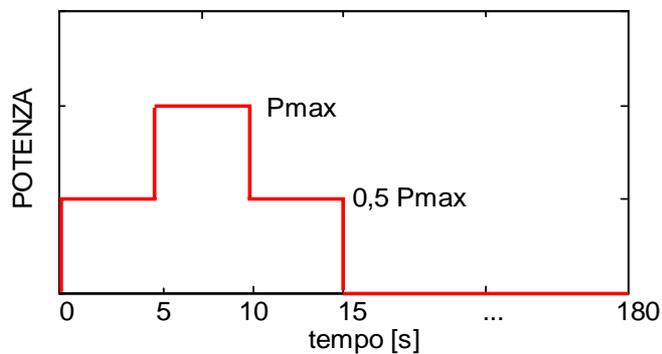
In figura B1 viene riportato il profilo di potenza della fase di scarica riferito alla singola cella elementare. Il profilo presenta un andamento triangolare dove a partire da potenza nulla si richiede alla batteria di raggiungere una potenza massima  $P_{max}$  il cui valore è determinato secondo la procedura indicata del testo come "Individuazione PMR".



*Figura B1: Profilo di Potenza richiesta alla batteria nella fase di scarica.*

Tutte le fasi di scarica devono essere comunque interrotte in caso di raggiungimento della tensione minima operativa.

Ovviamente in caso di impossibilità da parte del ciclatore di riprodurre le rampe del profilo di potenza è possibile fare riferimento al ciclo con andamento a gradini come ad esempio quello riportato in figura B2.



*Figura B2: Esempio di profilo a gradini di Potenza batteria nella fase di scarica.*

### 13.2.3 Profilo di tensione e corrente della fase di carica

Per la ricarica si prevede la modalità IU, una prima fase a corrente costante con rate di corrente 1C, fino al raggiungimento della tensione di cella pari a 4.15V, successivamente si passa nella fase di carica a tensione costante alla tensione  $V=4.15V$ .

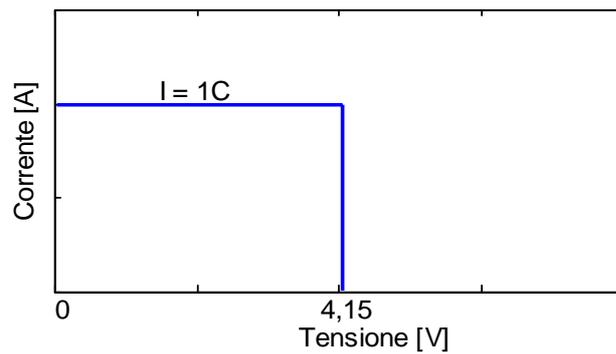


Figura B3: Modalità di carica IU nella fase di carica.

### Determinazione delle condizioni dell'accumulatore dopo

Durante la prova saranno raccolti i seguenti dati:

Capacità cumulativa caricata e scaricata durante il ciclaggio tra 0% DOD e 80% DOD

$T_{max}$  raggiunta durante il ciclaggio

Tensione minima del pacco all'80% del DOD

OCV alla fine del periodo di riposo di 15' dopo la ricarica (per rivelare eventuali sbilanciamenti)

Capacità cumulativa caricata durante il ciclaggio tra 80% DOD e la ricarica completa

### 13.3 Definizione della prova di resistenza interna e tensione a circuito aperto

La prova consiste di due impulsi di corrente di valore  $C/1$  della durata di 30 secondi, uno positivo (scarica) e uno negativo (carica), intervallati da un periodo di riposo di 180 secondi. Vengono misurate le tensioni corrispondenti al punto iniziale e finale del gradino di corrente corrispondente al distacco del carico, e calcolata la resistenza interna  $R_I$ .

Segue un periodo di attesa di 2,5 ore per permettere alla batteria di tornare in una condizione di "stabilità" e viene misurata la tensione a circuito aperto OCV.

Il ciclo viene ripetuto a varie profondità di scarica della batteria (ogni volta viene scaricata di un ulteriore 10% del valore nominale della capacità con un corrente pari a  $C/5$ ).

## 14 Appendice B: Rappresentazione dei risultati

I risultati delle prove saranno espressi in forma numerica riportante gli andamenti delle seguenti grandezze (cfr. par. 11.2):

- tensioni elementari di cella e globale di pacco
- corrente
- temperature di case di moduli di batteria, e dell'ambiente in cui la batteria è situata

I tempi di campionamento, se costanti, potranno essere differenziati a seconda delle prove: per scariche della durata di oltre un'ora potranno essere dell'ordine dei 10 secondi (sarà quindi adatto il sistema Agilent a 0,2 Hz); per scariche molto rapide, quali ad esempio le C-10C il tempo di campionamento dovrebbe essere non superiore ai 200 ms (si utilizzerà quindi lo strumento Keithly). La registrazione delle grandezze (esclusa al più la corrente) dovrà essere effettuata anche durante le pause, in quanto l'andamento nel tempo di tensioni e temperature durante la pausa è indicativo del comportamento dinamico delle batterie, e consente la misura degli OCV.

E' utile anche disporre di rappresentazione tabulata dei principali parametri numerici ricavabili dai risultati della sperimentazione.

Nella presente appendice si riportano delle tabelle già predisposte per la registrazione numerica ei parametri che si ritengono maggiormente significativi per tutte le prove previste nel presente documento.

### 14.1 Risultati delle prove preliminari

PROVE PRELIMINARI					
<b>Ispezione inizio prove</b>					
Danneggiamenti iniziali No : X Si :					
<b>Dati tecnici</b>					
<b>Peso pacco batteria, (kg):</b>				<b>Peso cella, (kg):</b>	
<b>Volume pacco batteria, (litri):</b>				<b>Numero di celle:</b>	
<b>Determinazione della Capacità e dell'Energia prima dei cicli vita</b>					
	fase	2	4	6	
	Capacità erogata				Ah
	Potenza media erogata				Wh/kg
	Temperatura finale				Wh/l

### 14.2 Individuazione della potenza del ciclo di prova $P_{mxCVE}$

Individuazione della potenza Pmax del Ciclo Vita Elementare			
Fase	tipo	Pmax (W/cella)	Tmax (°C)
1	CS		
2	seq. di CVE		
3/1	seq. di CVE		
3/2	seq. di CVE		
....	seq. di CVE		
3/n	seq. di CVE		

Il valore di  $P_{max}$  all'n-esima ripetizione della fase 3 (fase 3/n), quando si saranno raggiunte le condizioni di terminazione stabilite nel par. 12.2.2, sarà il valore di  $P_{maxCVE}$  da usare nelle successive prove di invecchiamento.

#### 14.3 Prova completa di identificazione parametri

Prova completa di identificazione parametri (prima/dopo prove di invecchiamento)				
temp. ambiente ____ °C				
Fase	tipo	carica scambiata (Ah)	Pmedia (W/cella)	Tmax (°C)
1	CS			
2	S-C/4			
3	CS			
4	S-5C			
5	CS			
6	S-10C			

#### 14.4 Prova parziale di identificazione parametri

Prova parziale identificazione parametri N. ____				
Svolta dopo N. ____ di Cicli Vita Elementari				
Fase	tipo	carica scambiata (Ah)	Pmedia (W/cella)	Tmax (°C)
1	CS			
2	S-C/4			
3	CS			
4	S-10C			

#### 14.5 Prova di Invecchiamento

La prova è composta di ripetizioni cicliche di sequenze di CVE e prove parziali di identificazione parametri.

Il seguente quadro sinottico può essere utile per tenere traccia globale degli andamenti di carica e potenza per cella misurati nelle prove parziali di identificazione parametri.

Sequenza di CVE	S-C/4			S-10C		
	Carica erogata (Ah)	Potenza media (W/cella)	Tmax (°C)	Carica erogata (Ah)	Potenza media (W/cella)	Tmax (°C)
1						
2						
...						
n						