



## La ricerca e l'evoluzione dei sistemi di accumulo per fonti rinnovabili



*Fabio Mottola*  
*fmottola@unina.it*



## Contenuti

Introduzione all'utilizzo dei sistemi di accumulo elettrico  
Applicazioni dei sistemi di accumulo al servizio del sistema elettrico

Classificazione dei sistemi di accumulo

Cenni sui Sistemi di Accumulo Non-Dedicati interfacciati con le reti elettriche

Stato della ricerca



## Introduzione all'utilizzo dei sistemi di accumulo elettrico

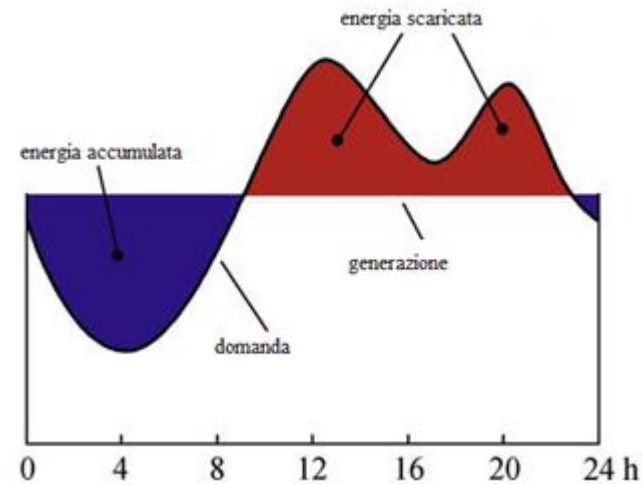
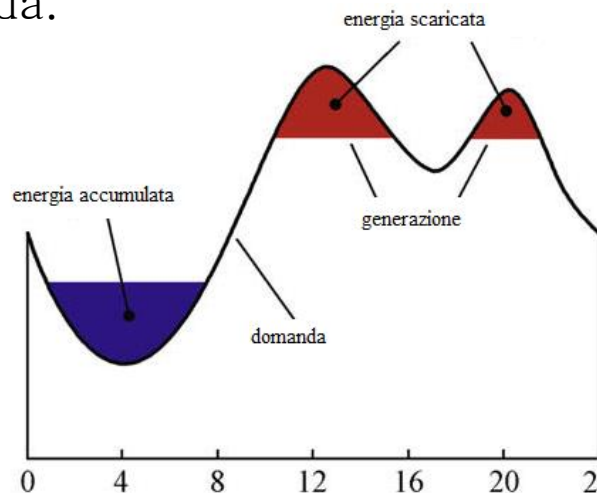
La domanda di energia richiesta dagli utilizzatori varia in maniera considerevole (stagione, giorno della settimana, ora del giorno, ecc).

Normalmente, il picco di domanda si raggiunge solo per poche ore ogni anno.

Tali motivazioni conducono ad **inefficienze**, **sovradimensionamenti** e **costosi impianti di produzione**.

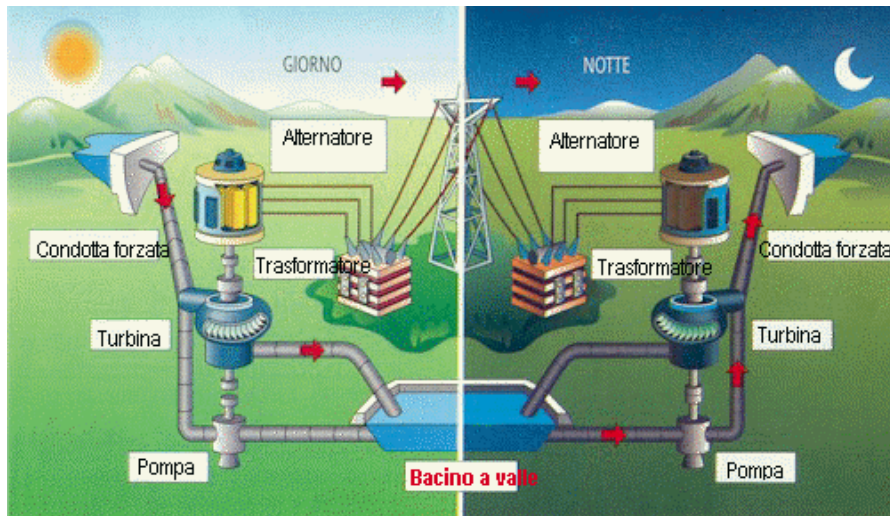
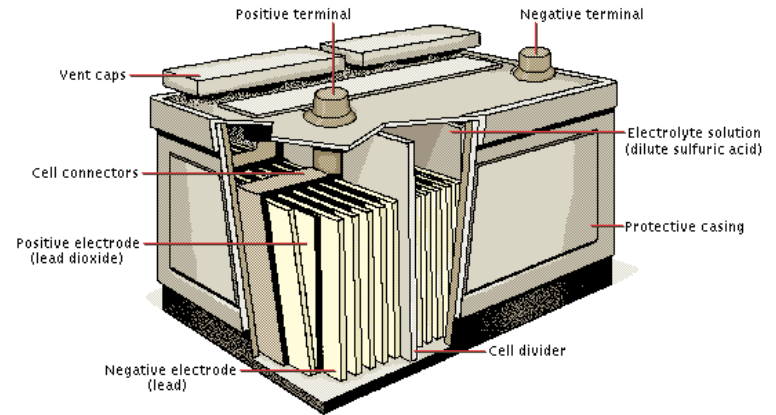
In tale contesto i sistemi di accumulo elettrico permettono di **disaccoppiare** la **produzione** dell'energia elettrica dalla sua fornitura agli **utilizzatori**.

Avendo la disponibilità di una sufficiente capacità di accumulo, la **pianificazione** del sistema elettrico necessiterebbe la costruzione di impianti di produzione la cui capacità dovrebbe garantire, esclusivamente, il soddisfacimento dell'energia media richiesta, piuttosto che i picchi di domanda.



## Introduzione all'utilizzo dei sistemi di accumulo elettrico

Le prime applicazioni dei Sistemi di Accumulo Elettrico risalgono all'inizio del ventesimo secolo, quando gli impianti di produzione erano spesso chiusi durante le ore notturne e i pochi carichi elettrici a quell'ora collegati erano alimentati, attraverso le reti in corrente continua, da accumulatori al piombo-acido.



La flessibilità che i sistemi di accumulo elettrico garantiscono alle reti hanno portato ad una loro rapida diffusione.

In Italia, i primi esempi di impianti di produzione e pompaggio risalgono alla fine del 1800.

Il primo esempio su larga scala risale al 1929, Rocky River (USA) – 24 MW.

## Introduzione all'utilizzo dei sistemi di accumulo elettrico

In aggiunta, negli ultimi anni, criteri di **sostenibilità ambientale** hanno concorso allo sviluppo ed incremento delle **energie rinnovabili** a cui ha fatto seguito un rinnovato sforzo volto a trasformare il sistema elettrico.

Tale trasformazione sta interessando le **reti elettriche di trasmissione e distribuzione**, nonché gli **utenti finali**.

Tale trasformazione:

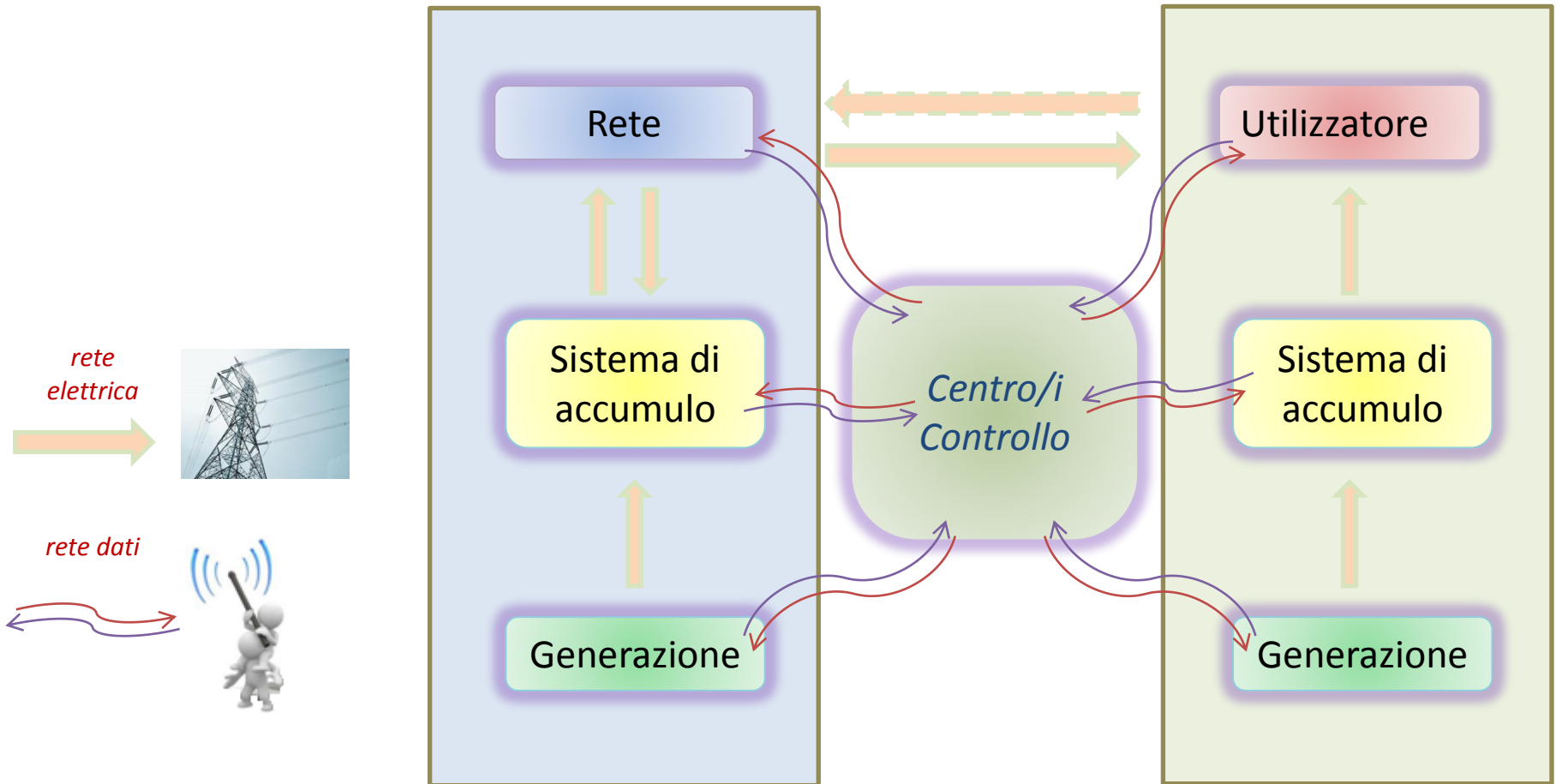
- 1) è conseguenza della crescente penetrazione degli impianti alimentati da “Fonti Rinnovabili Non Programmabili”;
- 2) richiede nuove soluzioni al fine di garantire gli stessi standard di **sicurezza e qualità del servizio**, tradizionalmente conseguiti con la presenza esclusiva della generazione centralizzata;
- 3) richiede una gestione razionale dei sistemi elettrici volti all'**efficienza** energetica e riduzione degli sprechi



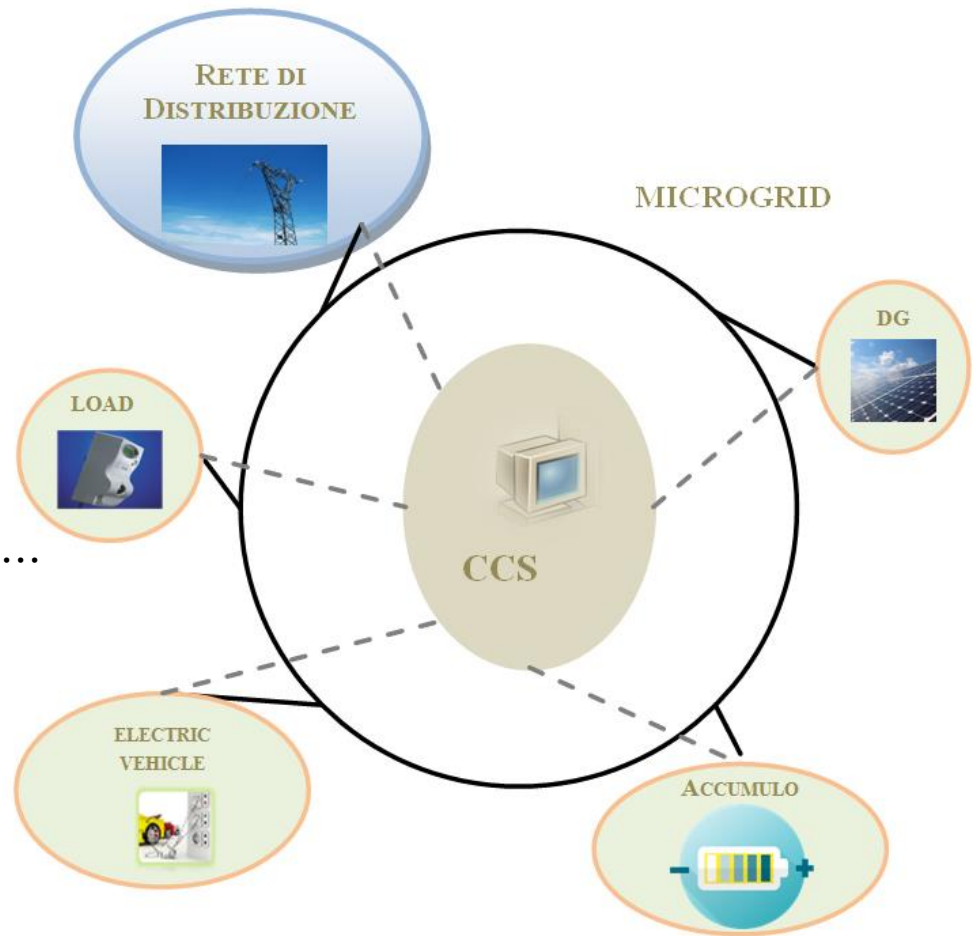


## Introduzione all'utilizzo dei sistemi di accumulo elettrico

I sistemi di accumulo elettrico si riferiscono a processi di **conversione** dell'energia elettrica in una forma di energia che può essere immagazzinata per poi essere convertita nuovamente in energia elettrica quando necessario.



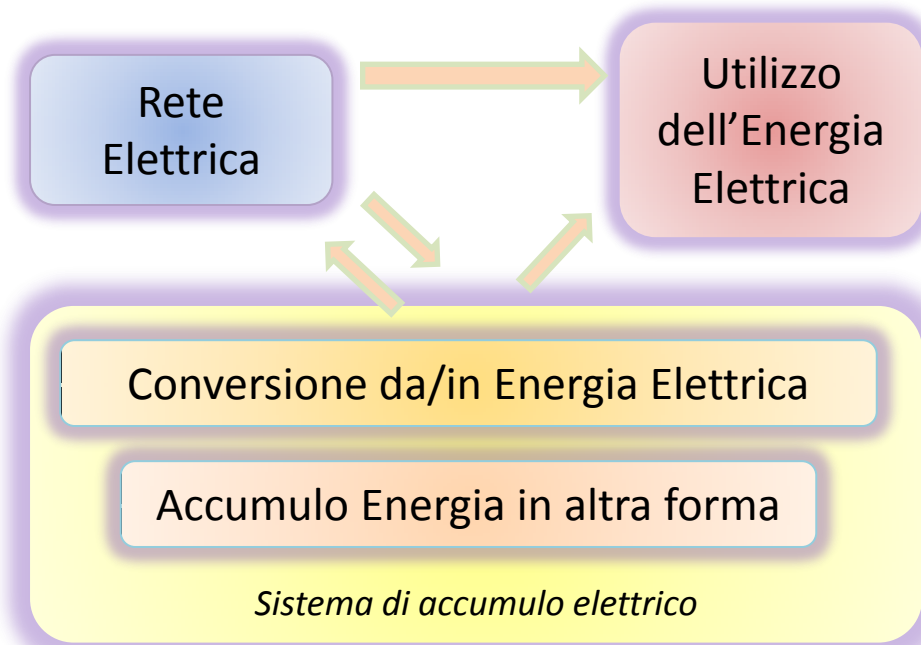
# Introduzione all'utilizzo dei sistemi di accumulo elettrico



... stiamo parlando di “smart grid”...



## Introduzione all'utilizzo dei sistemi di accumulo elettrico



Tale processo rende possibile la produzione di energia elettrica:

- nei periodi di bassa domanda;
- nei periodi di basso costo di produzione;
- da **unità di generazione da fonte intermittente** (eolico, fotovoltaico);

e ne consente l'utilizzo:

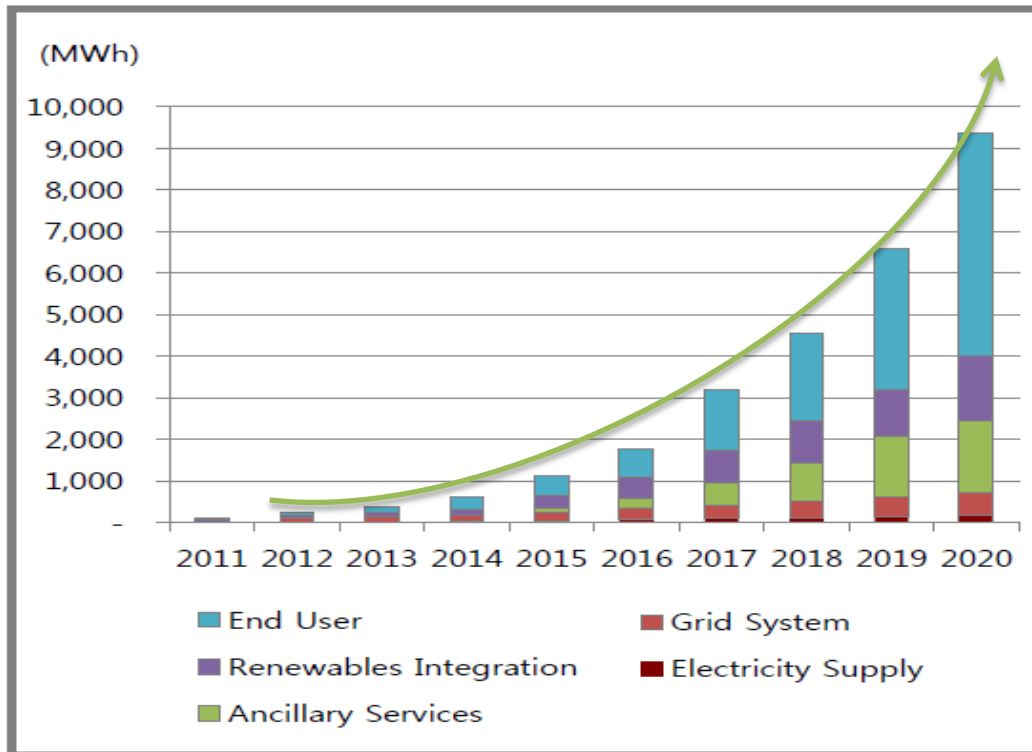
- nei periodi di alta domanda;
- nei periodi di alto costo di produzione;
- nei periodi in cui non sono disponibili ulteriori fonti di produzione.



## Introduzione all'utilizzo dei sistemi di accumulo elettrico

Oggigiorno, l'utilizzo dei sistemi di accumulo è reso sempre più attrattivo grazie al rapido **sviluppo tecnologico** che ha consentito una riduzione di costi e miglioramento delle prestazioni.

Nei prossimi anni ci sarà una diffusione su larga scala di sistemi di accumulo a servizio delle reti elettriche.

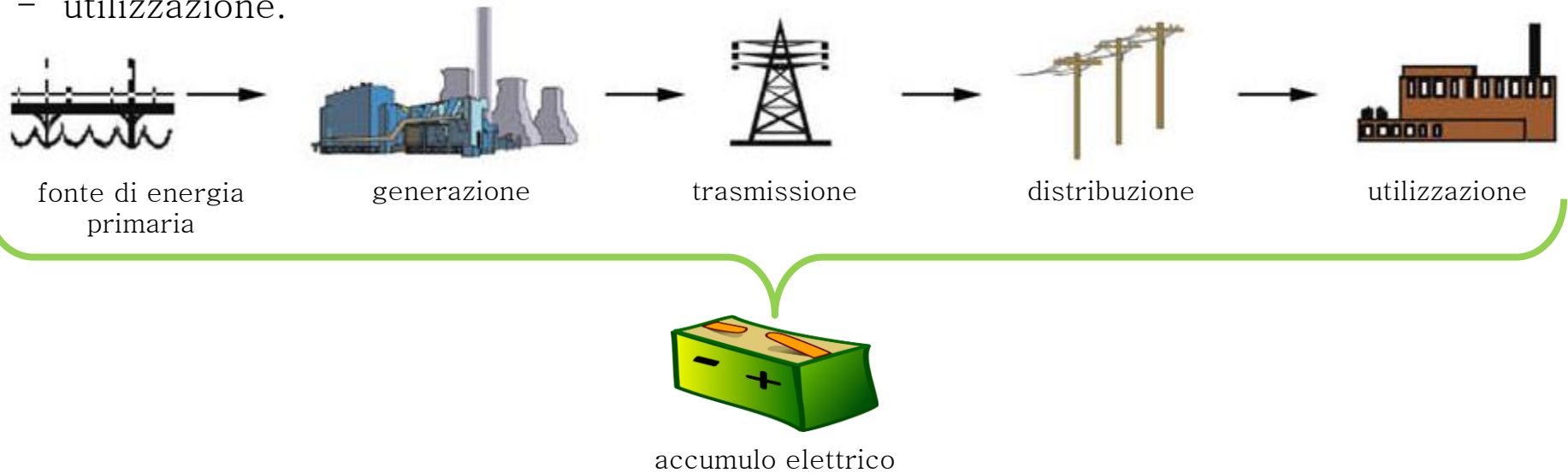


Per i prossimi anni, l'attuale previsione di incremento della penetrazione dei sistemi di accumulo nelle reti elettriche è del 10-15 % in Europa e Stati Uniti e ancor più in Giappone.

# Applicazioni dei Sistemi di Accumulo al Servizio del Sistema Elettrico

Il sistema elettrico, tradizionalmente, consiste di cinque settori collegati fra loro:

- fonte di energia primaria;
- generazione;
- trasmissione;
- distribuzione; ed
- utilizzazione.



Il sistema di accumulo elettrico può essere visto come un nuovo settore, capace di fornire l'energia richiesta quando e dove necessario. Questa versatilità rende numerose le potenziali applicazioni dei sistemi di accumulo all'interno del sistema elettrico.

## Generazione:

Nel settore della generazione elettrica, il campo di impiego dell'accumulo sono;

- 1) accumulare l'energia prodotta nelle ore di bassa domanda (ad esempio la notte) ed utilizzarla durante i picchi di carico;
- 2) accumulare l'energia per avere una capacità di riserva in caso di contingenze;
- 3) accumulare l'energia al fine di prevenire trasferimenti di energia non pianificati fra le diverse utility;
- 4) accumulare l'energia per la regolazione della frequenza, contribuendo a mantenere l'equilibrio tra il carico e la generazione;
- 5) accumulare l'energia per il black-start, per aiutare, cioè, ad energizzare la rete di trasmissione e ad assistere all'avviamento degli altri impianti di produzione e alla sincronizzazione della rete.



## Energia rinnovabile:

Mentre l'evoluzione delle tecnologie dei sistemi di generazione da fonte rinnovabile va sempre più diminuendo (si pensi all'eolico e fotovoltaico), di pari passo va crescendo sempre più il numero di impianti connessi alle reti e, quindi, cresce la difficoltà nel fronteggiare la disponibilità di elevate quantità di energia caratterizzata, però, da forte intermittenza. Ciò rende assolutamente prioritario, nei moderni sistemi elettrici, l'utilizzo di **utenti la cui richiesta di energia sia flessibile**, ovvero, si adegui alla disponibilità di energia.

Le applicazioni dei sistemi di accumulo a servizio della produzione da fonte rinnovabile permette:

- di ridurre la trasmissione di energia riducendo la capacità massima che la linea deve avere;
- di spostare la generazione equilibrando le ore in cui c'è uno sbilancio di energia prodotta ed utilizzata;
- mitigare la differenza fra l'energia effettivamente fornita alla rete e quella prevista;
- supporto alla frequenza, mitigando grandi variazioni nella potenza fornita durante brevi intervalli;

## Classificazione dei sistemi di accumulo

Esistono due criteri generali per la classificazione dei vari sistemi di accumulo elettrico:

- **Funzione;**
- **Tecnologia.**

La classificazione in termini di funzione, è legata ai servizi che il dispositivo di è chiamato a svolgere. Quella in termini di tecnologia, è legata alla forma in cui il dispositivo converte l'energia al fine di immagazzinarla.

In termini di funzioni, i dispositivi di accumulo possono anche essere classificati nel modo seguente:

- elevate potenze e (relativamente) piccoli capacità (d'energia);
- elevate capacità e (relativamente) basse potenze.

I primi sono particolarmente adatti ai servizi relativi alla qualità e continuità del servizio (power quality e UPS) mentre, i secondi, per la gestione dell'energia (energy management).

Queste classificazioni spaziano su un'ampia gamma di dispositivi e caratteristiche tecnologiche.

# Classificazione dei sistemi di accumulo

La classificazione relativa alla **tecnologia impiegata**, è molto più ampia. La più generale possibile è la seguente:

## 1) Sistema di accumulo elettrico

- capacitori;
- supercapacitori;
- **elettrochimico (batterie, celle a combustibile)**;
- superconduttori (SMES\*)

## 2) Sistemi di accumulo meccanico

- sistemi di accumulo di energia cinetica (volani)
- sistemi di accumulo di energia potenziale (PHS\*\*, CAES\*\*\*)

## 3) Sistemi di accumulo termico

- sistemi di accumulo a bassa temperatura;
- sistemi di accumulo ad alta temperatura.

\* SMES – Superconducting Magnetic Energy Storage

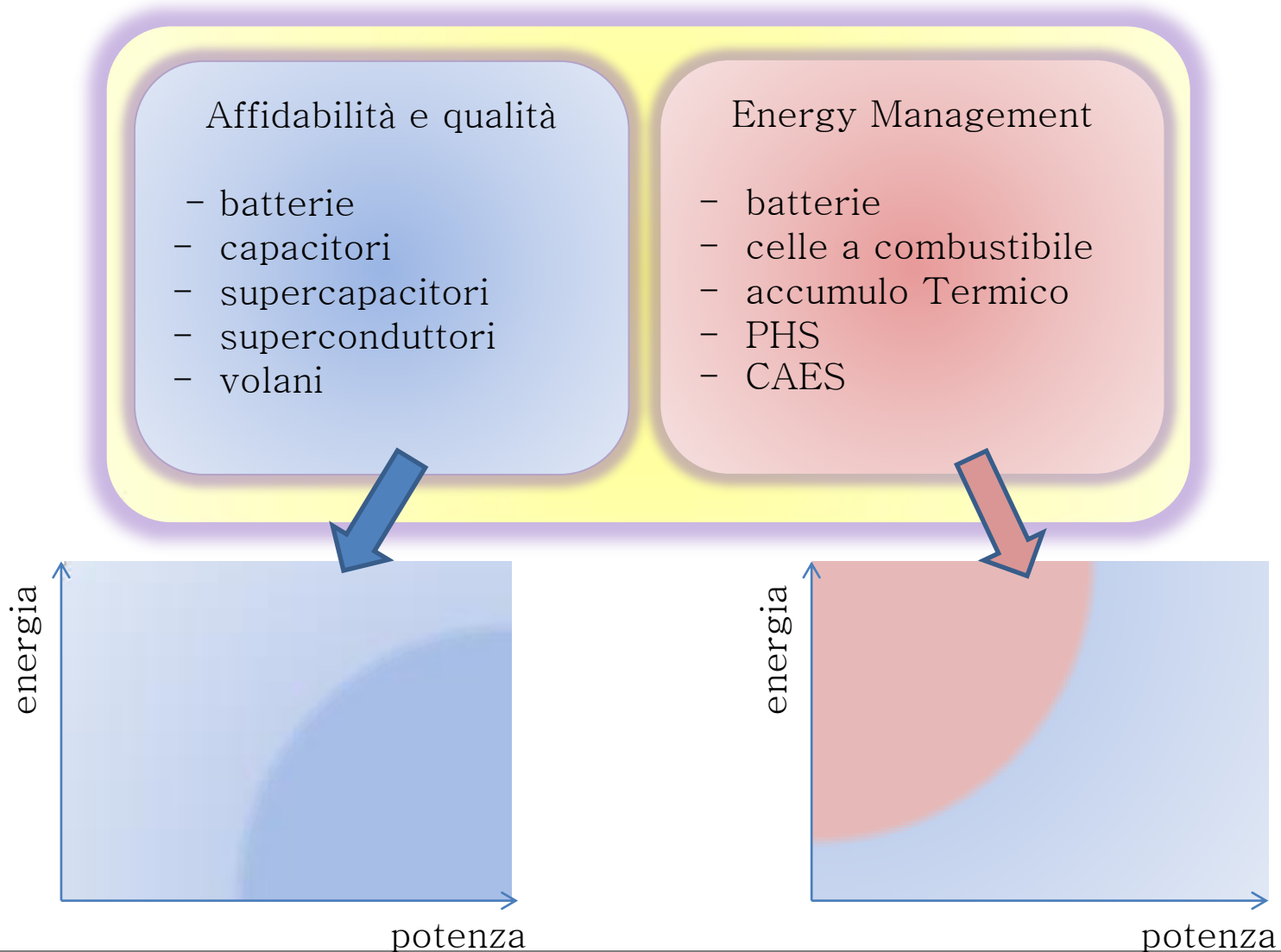
\*\* PHS – Pumped Hydroelectric-Storage System

\*\*\* CAES – Compressed-Air Energy Storage System



# Classificazione dei sistemi di accumulo

Schema riassuntivo delle classificazioni per sistemi di accumulo



## Batteria

Le batterie hanno perdite molto basse, quando non utilizzate (autoscarica), e possono avere, in base alle tecnologie adottate, rendimenti particolarmente elevati (60 – 95%).

Tuttavia, batterie di grossa taglia hanno trovato, fin'ora solo rare applicazioni, a causa, principalmente:

- delle basse densità di energia,
- limitate capacità di accumulo,
- alti costi di manutenzione,
- vita utile limitata,
- una capacità di scarica limitata.

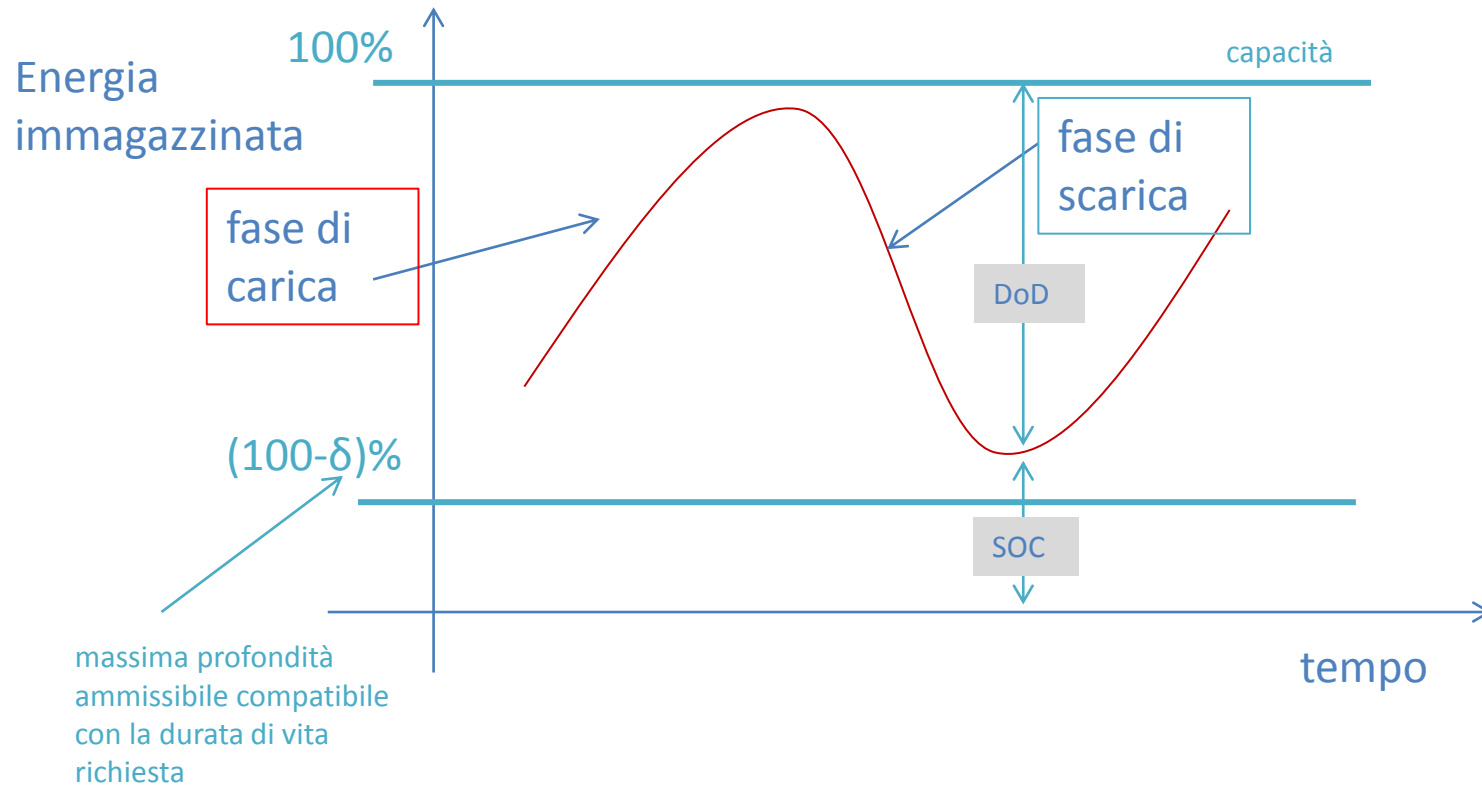
Inoltre, la maggior parte delle batterie sono costituite da materiali tossici. Ciò rende sempre necessario un controllo sulla loro dismissione.

Le batterie, che allo stato attuale appaiono essere le più mature per applicazioni stazionarie nel campo elettrico sono:

- lead-acid,
- nickel cadmium,
- sodium sulphur,
- sodium nickel
- lithium ion
- flow battery

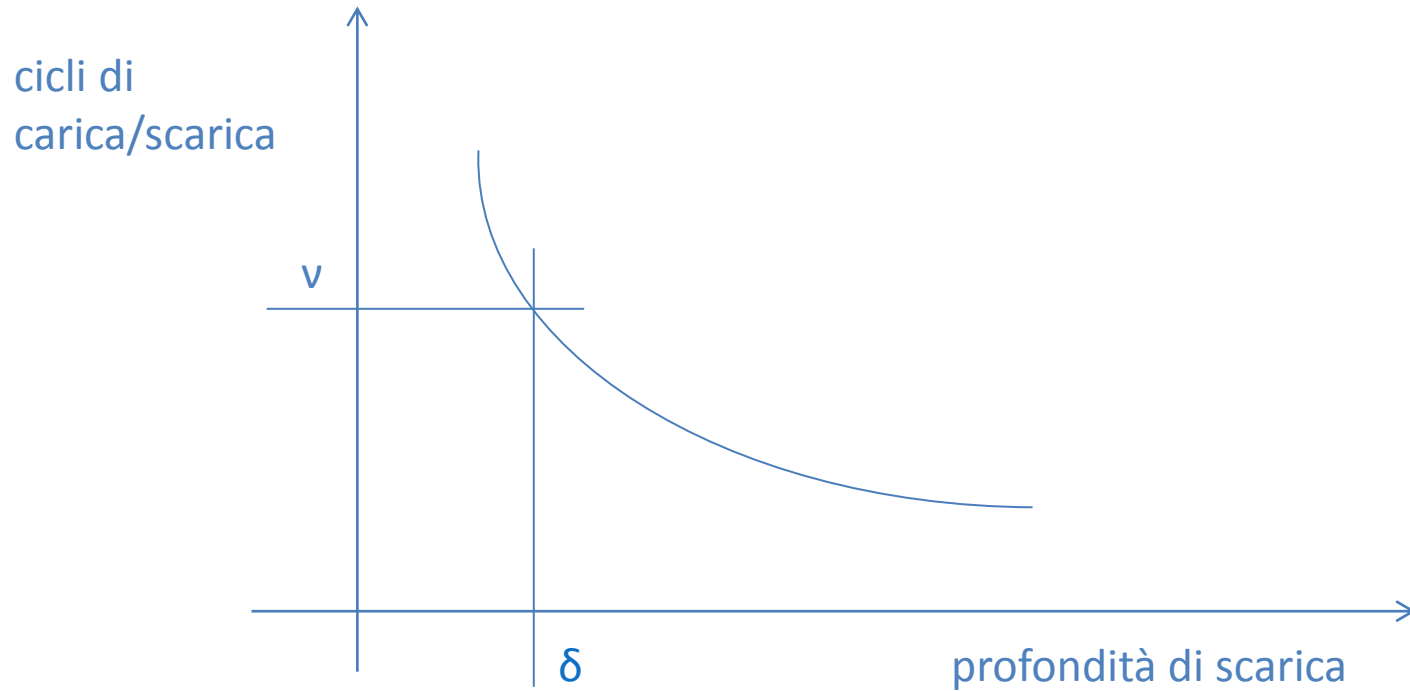
# Batteria

*Alcune grandezza caratteristiche*



# Batteria

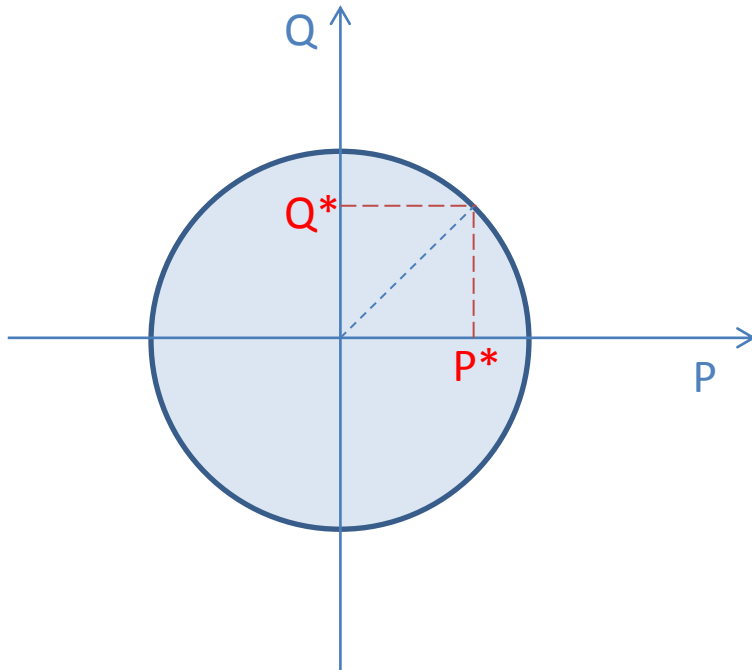
*Alcune grandezza caratteristiche*



# Batteria

*Alcune grandezza caratteristiche*

Curva di capability di un sistema di accumulo a batteria connesso tramite convertitore CC/CA PWM:



La potenza attiva e quella reattiva erogata dal sistema di accumulo sono limitate dalla taglia del convertitore:

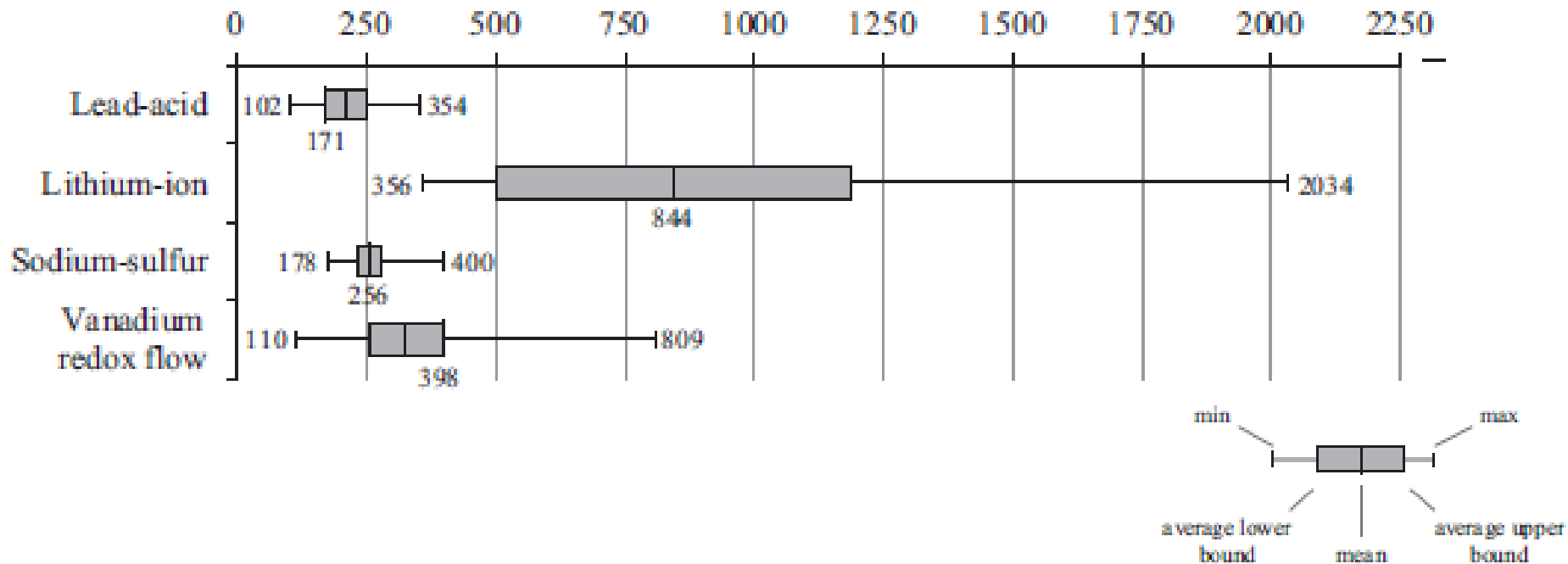
$$\sqrt{P^2 + Q^2} \leq S$$

# Batteria

Sulla base di una recensione di dati pubblicati a livello internazionale, nelle tabelle seguenti sono riportati alcuni dati caratteristici di differenti tecnologie di accumulo elettrochimico.

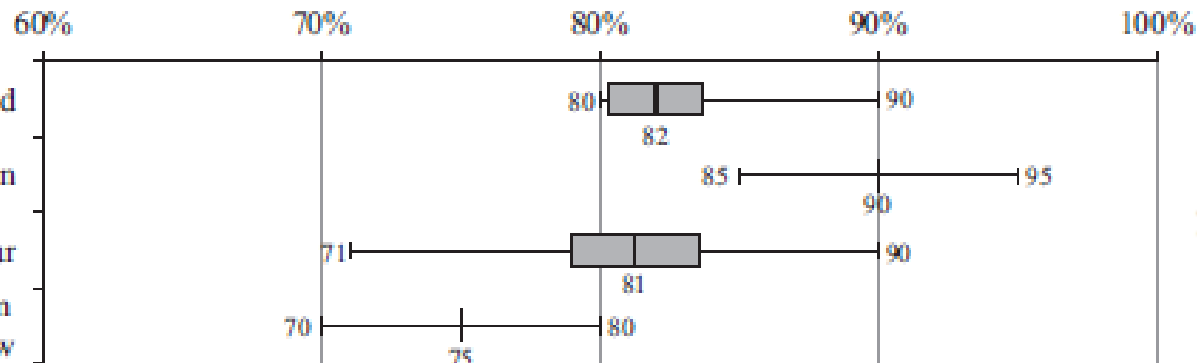
B. Battke, T. S. Schmidt, D. Grosspietsch, V. H. Hoffmann, "A review and probabilistic model of lifecycle costs of stationary batteries in multiple applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 25, 2013, pp. 240–250.

## Energy capacity costs [EUR/kWh<sup>b</sup>]

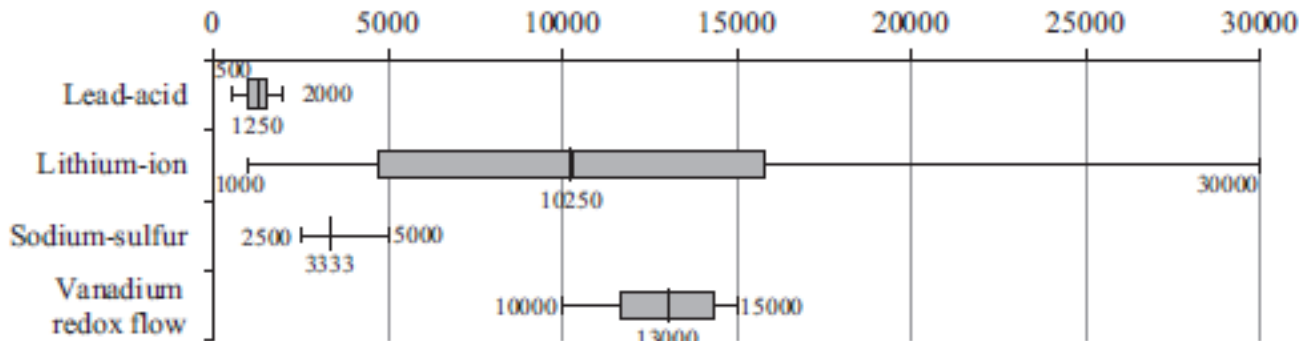




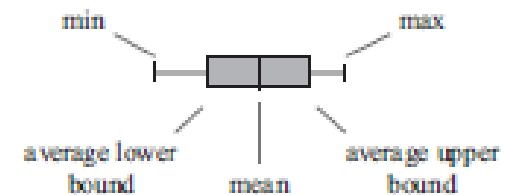
# Batteria



**Roundtrip efficiency [%]**



**Cycle life [# of cycles to failure],  
at 80% depth-of-discharge (DOD)**



## Cenni sui Sistemi di Accumulo Non-Dedicati

I prossimi anni vedono, in prospettiva, un notevole incremento di sistemi di accumulo che saranno connessi alla rete elettrica per specifici servizi quali:

- Servizio di back-up;
- ricarica.

In particolare, è atteso un largo numero di veicoli elettrici, che richiederanno alla rete una notevole quantità di energia per la ricarica (veicoli plug-in electric o plug-in hybrid electric vehicles) e gruppi di continuità (o UPS, dall'inglese Uninterruptible Power Supply) di elevata potenza a servizio di particolari carichi critici.

Esempio di plug-in vehicle:

	Battery Type and Energy	All-Electric Range	Charging	
			Demand	Charge Time
Toyota Prius PHEV(2012)	Li-Ion 4.4kWh	14 miles	3.8kW (240V)	2.5 hours
Nissan Leaf EV	Li-Ion 24kWh	100 miles	3.3kW	6-8 hours
Tesla Roadster EV	Li-Ion 53kWh	245 miles	9.6-16.8 kW	4-12 hours

## Cenni sugli Aspetti Normativi

Le norme che definiscono le regole tecniche in ambito nazionale per la connessione degli utenti attivi e passivi alle reti delle imprese distributrici in AT, MT e BT sono:

*CEI 0-16: (settembre 2014) AT ed MT*

*CEI 0-21: (settembre 2014) BT*

Le versioni settembre 2014 sono state intergrate nelle varianti del dicembre 2014 per con i servizi di rete richiesti ai sistemi di accumulo.

Allo stato attuale, il quadro tecnico regolatorio in tema di accumulo elettrico è completato da:

Regole tecniche per l'attuazione delle disposizioni relative all'integrazione di sistemi di accumulo di energia elettrica nel sistema elettrico nazionale – GSE – aprile 2015

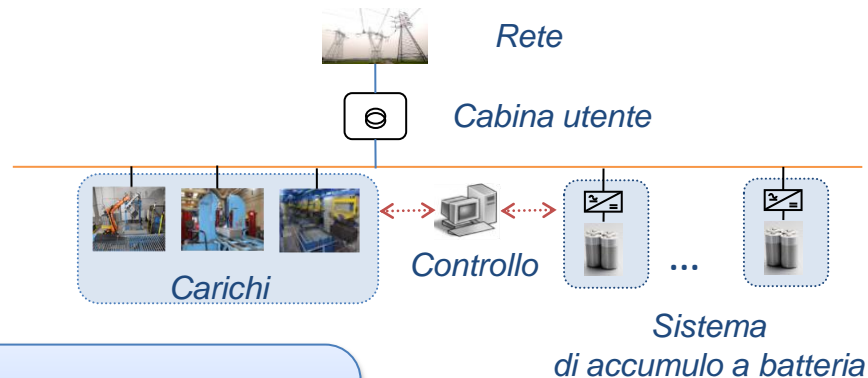
Deliberazione dell'Autorità per l'Energia Elettrica il gas ed il sistema idrico – 574/2014/R/EEL – novembre 2014

## Cenni sulla ricerca corrente

### Gestione di un sistema di accumulo

Applicazione su un sistema di accumulo elettrico per la minimizzazione dei costi dell'utente

#### Configurazione del sistema



*È necessario risolvere un problema di ottimizzazione lineare vincolato:*

$$\min f_{obj}(\mathbf{x})$$

$$g_k(\mathbf{x}) = 0, \quad k = 1, \dots, n_{ec}$$

$$h_j(\mathbf{x}) \leq 0, \quad j = 1, \dots, n_{ic}$$

*Costo dell'energia giornaliera*

*La variabile di ottimizzazione è la potenza giornaliera scambiata con la rete per il solo giorno considerato*

## Cenni sulla ricerca corrente

Gestione di un sistema di accumulo

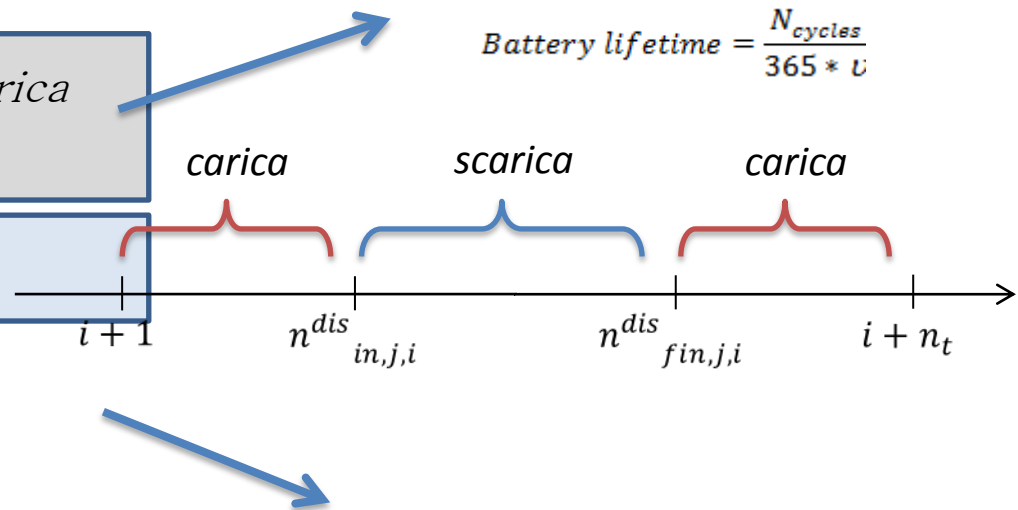
*Applicazione si un sistema di accumulo elettrico per la minimizzazione dei costi dell'utente*

*I costi dell'energia acquistata giornaliera dalla rete dipendono dalla tariffa adottata. Una formulazione generale è data dalla formula*

$$f_{obj}(\mathbf{x}) = \Pr_{peak} \cdot \max_{i \in \Omega} \{P_{grid,i}\} + \sum_{i=1}^{n_t} \Pr_{En,i}(P_{grid,i} \Delta t)$$

*Vincoli di buon funzionamento*

- Numero di carica e scarica
- Profondità di scarica
- Potenza contrattuale.

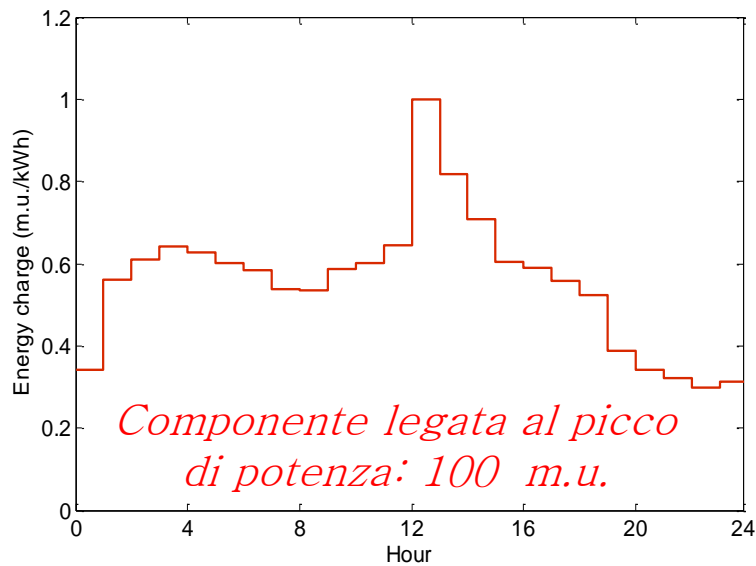


## Cenni sulla ricerca corrente

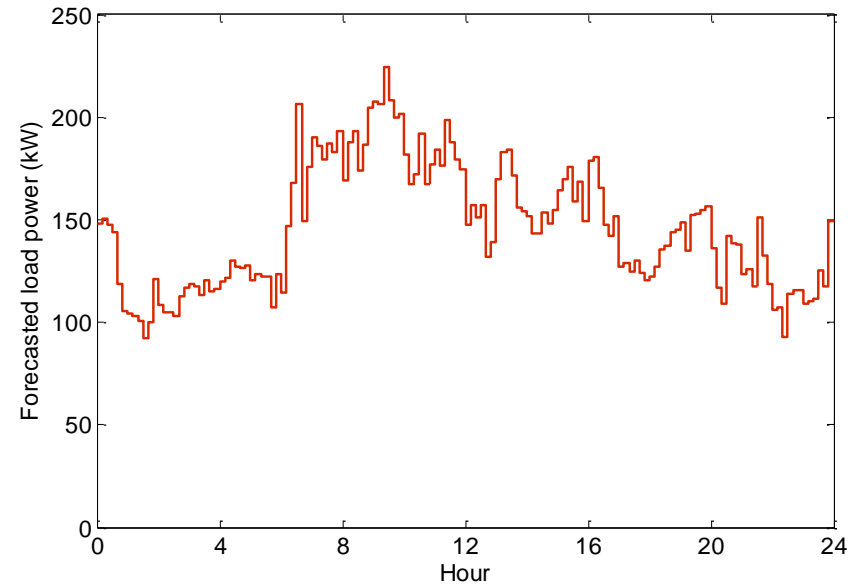
### Gestione di un sistema di accumulo

*Applicazione si un sistema di accumulo elettrico per la minimizzazione dei costi dell'utente*

*Tariffa*



*Profilo di carico previsto in assenza di accumulo*

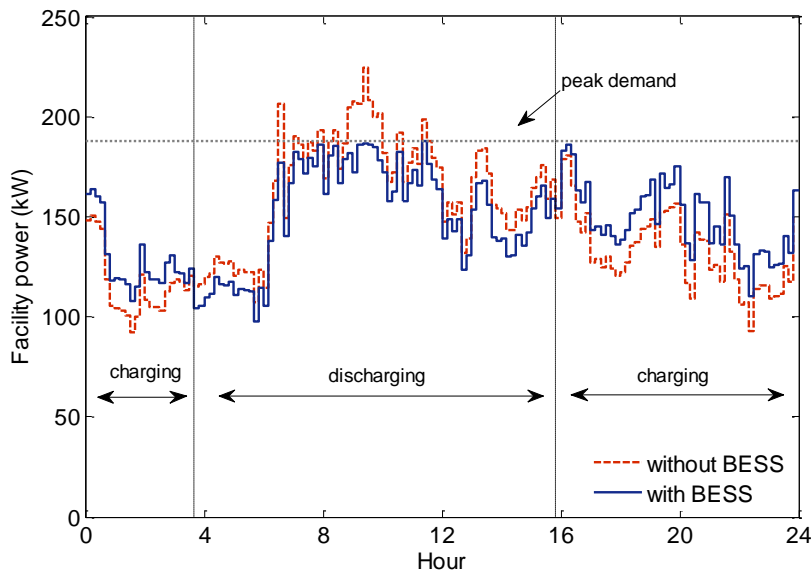




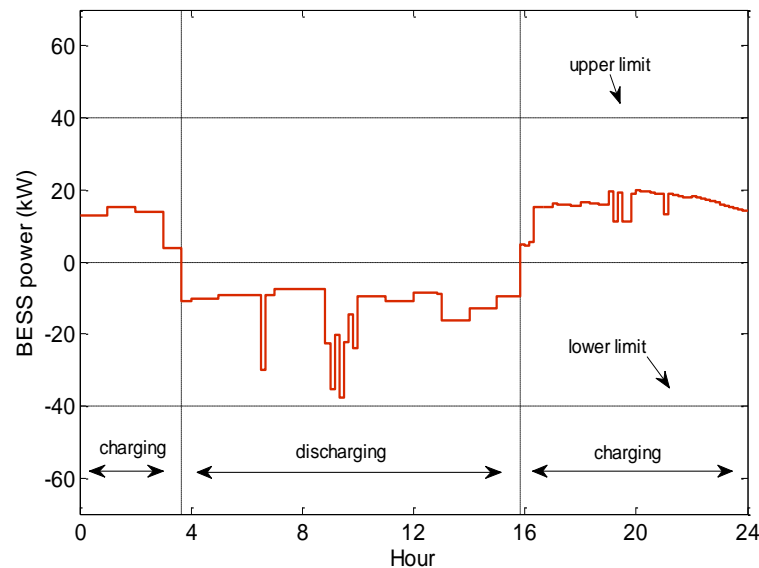
# Qualche risultato sulla ricerca corrente

## Gestione di un sistema di accumulo

*Applicazione si un sistema di accumulo elettrico per la minimizzazione dei costi dell'utente*



*Confronto della potenza acquistata con e senza accumulo*

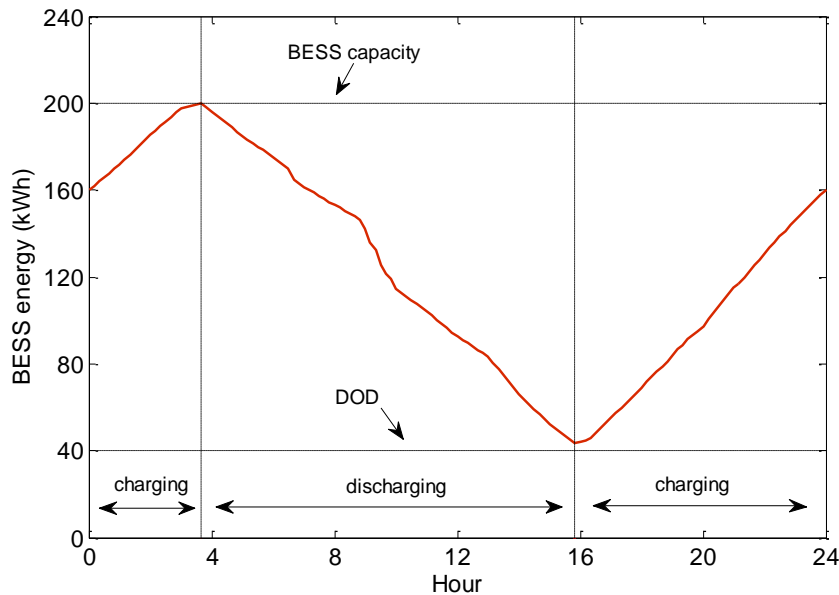


*Potenza giornaliera di carica e scarica della batteria*

## Cenni sulla ricerca corrente

Gestione di un sistema di accumulo

*Applicazione si un sistema di accumulo elettrico per la minimizzazione dei costi dell'utente*



*Energia immagazzinata nel sistema di accumulo*

*Riduzione del picco di potenza al variare della taglia della batteria*

Battery sizes	30 kW 5 hours	40 kW 5 hours	60 kW 5 hours
Demand charge			
50 m.u.	30.00	32.93	33.73
100 m.u.	30.00	36.71	37.50
150 m.u.	30.00	39.74	40.84
250 m.u.	30.00	40.00	43.97

## Conclusioni

I sistemi di accumulo per le loro caratteristiche di essere unità in grado di funzionare da carico/generazione flessibile e controllabile rivestono un ruolo centrale nelle moderne reti di distribuzione in cui si deve:

- ridurre i costi di gestione e pianificazione;
- incrementare l'efficienza energetica;
- incrementare la penetrazione di impianti di produzione da fonti rinnovabile;
- incrementare la qualità del servizio;

### Obiettivi della ricerca corrente:

- riduzione dei costi di costruzione;
- allungamento della vita;
- definire strategie di controllo e pianificazione che tengano conto di benefici concorrenti a differenti componenti del sistema elettrico.



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA ELETTRICA E TECNOLOGIE DELL'INFORMAZIONE



**Grazie per  
l'attenzione**

*Fabio Mottola*  
*fmottola@unina.it*