

BATTERIE ELETTROCHIMICHE

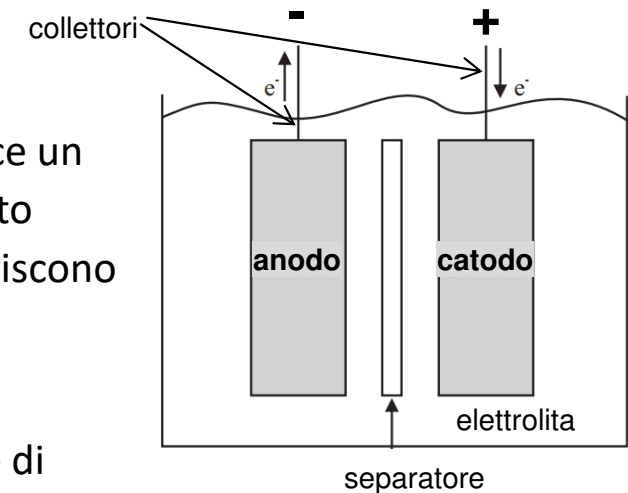
TECNOLOGIE

PRESTAZIONI



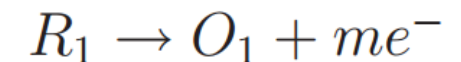
Batterie elettrochimiche

- **Elettrodo positivo (catodo):** materiale *solido con ossido o solfuro* che subisce un processo di *riduzione* durante la scarica (assorbimento di elettroni dal circuito esterno); viene addizionato con materiali che aumentano la porosità e favoriscono la conducibilità elettronica
- **Elettrodo negativo (anodo):** *metallo o lega di metallo* (per incrementare la durezza) che subisce un processo di *ossidazione* durante la scarica (cessione di elettroni al circuito esterno); presenta additivi come catodo
- **Elettrolita:** mezzo che permette *la conduzione ionica tra i due elettrodi ma non la conduzione elettronica* (pena l'autoscarica della batteria) → liquido, gel o solido con caratteristica acida (vedi acido solforico nelle PbA) o alcalina (vedi idrossido di potassio nelle Ni-Cd o NiMH)
- **Separatore:** mezzo che separa fisicamente gli elettrodi di opposta polarità; deve essere permeabile agli ioni e servire da sistema di immagazzinamento e contenimento dell'elettrolita (polimeri sintetici)
- **Collettori di corrente:** in genere metalli ad alta conducibilità che garantiscono il trasporto degli elettroni tra gli elettrodi senza interagire chimicamente con elettrodi ed elettrolita



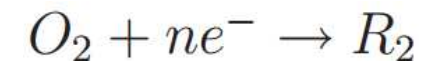
Processo di scarica

Anodo (ossidazione)



Metallo
o lega

Catodo (riduzione)



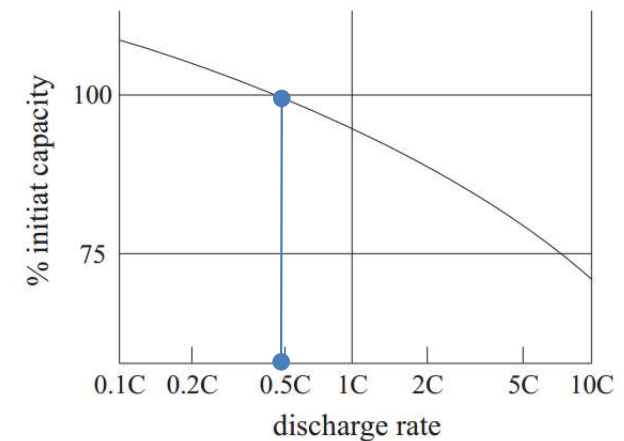
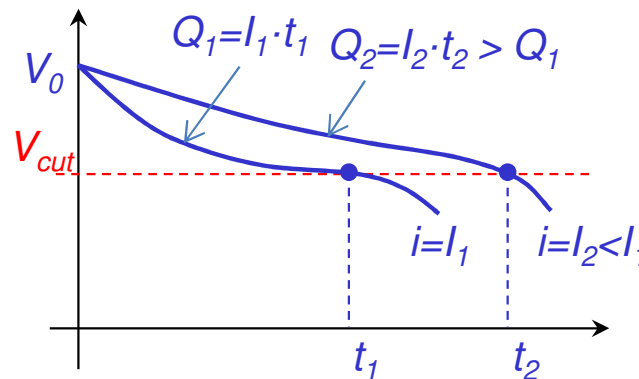
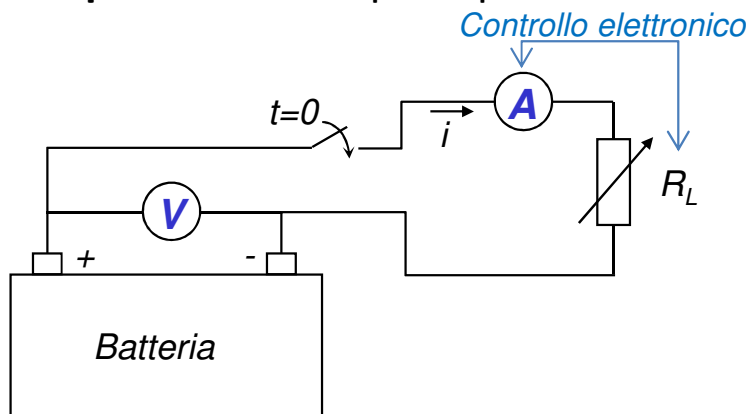
Ossido o
solfuro

Principali tipologie

- Piombo-acido (PbA)
- Litio-polimero (Li-poly)
- Sodio-zolfo (NaS)
- Nickel-Cadmio (NiCd)
- Ioni di Litio (Li-ion)
- Zebra (Na/NiCl₂)
- Nickel-Metal-Idruri (NiMH)
- Zinco-aria (ZnA – metallo-aria)

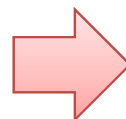
Parametri caratteristici delle batterie

- **Capacità teorica:** quantità di carica libera C (o Q in alcune pubblicazioni) generata all'elettrodo negativo a reagente completamente esaurito ($1 \text{ Ah} = 3600 \text{ C}$)
- **Tasso di scarica:** corrente alla quale viene scaricata la batteria (espressa come $C/\Delta T$ dove C è la capacità e ΔT è il tempo di scarica). Es. $C/5 = 50\text{Ah}/5\text{h} = 10 \text{ A}$
- **Capacità reale:** è principalmente funzione della corrente alla quale viene eseguita la scarica



- **Stato di carica (SOC):** capacità residua dopo un processo di scarica a partire dalla condizione di piena carica (espresso in forma percentuale \Rightarrow 100% piena carica)

Partendo dall'istante t_0 alla capacità nominale C_0

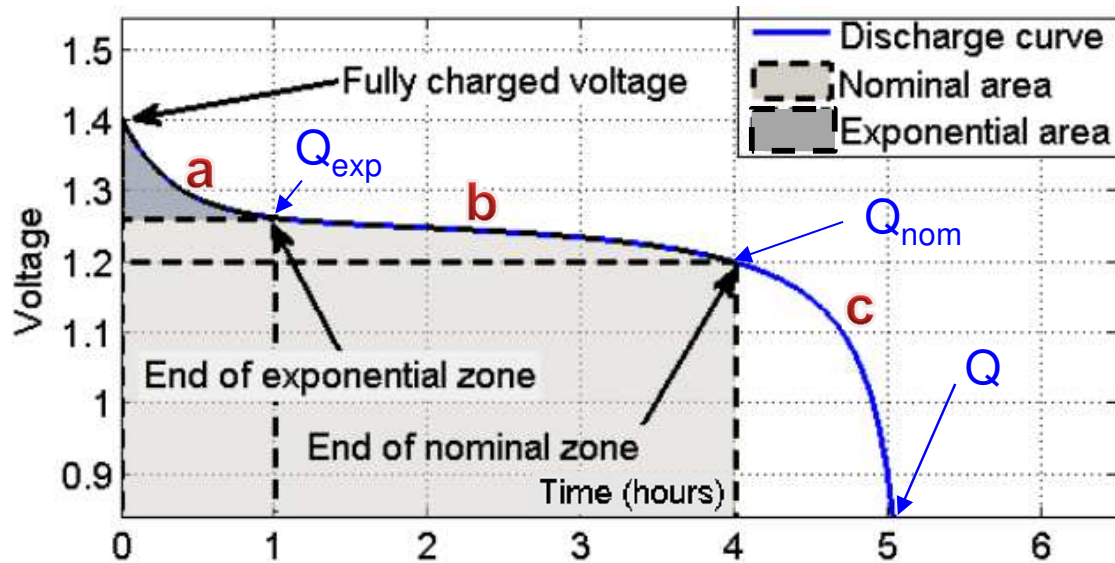


$$SOC_0(t) = \left(1 - \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau / C_0 \right) \cdot 100\%$$

- **Stato di scarica (SOD):** quantità di carica effettivamente erogata dopo un processo di scarica a partire dalla condizione di piena carica (può essere misurato direttamente)

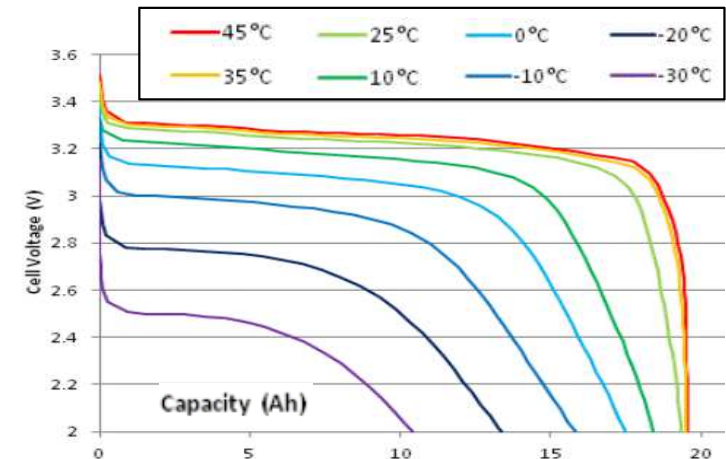
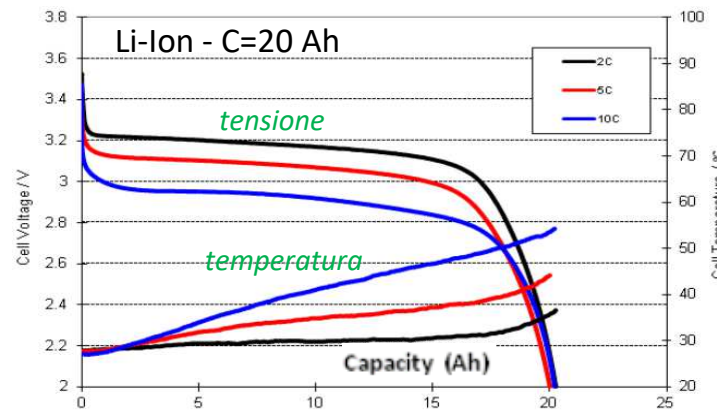
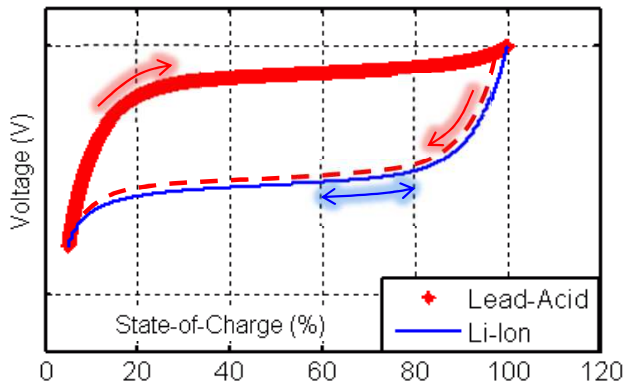
- **Profondità di scarica (DOD):** SOD espresso in forma percentuale rispetto a C $\Rightarrow DOD_0(t) = \int_0^t i(\tau) d\tau / C_0 \cdot 100\%$

Profilo caratteristica



- **Tipica curva di scarica** alla corrente nominale comprendente le seguenti regioni:

- C.d.t. esponenziale** quando la batteria è completamente carica (carica erogata Q_{exp})
- Scarica quasi lineare fino alla tensione nominale (carica erogata Q_{nom})
- Scarica completa con alta c.d.t. $\rightarrow V_{cut}$



- Comportamento diverso per alcune tipologie di batterie passando **da scarica a ricarica** \Rightarrow **fenomeno d'isteresi** nella zona esponenziale per PbA, NiCd e NiMH ($PbA \rightarrow V_{inizio,scarica} \neq V_{fine,ricarica}$ a parità di I)
- Profilo dipendente dalla **corrente di scarica/carica** e dalla **temperatura**, variabile durante il processo (necessaria controllo temperatura interna anche durante la prova, in caso termostatando) \rightarrow **parametri caratteristici** funzione di ambidue le variabili

Altri dati di confronto

Potenza (o corrente)

- Valore di picco della potenza scambiabile in carica e scarica
- Convenzionalmente misurata a **DOD=80%** con una data corrente di scarica
- Distinzione tra **potenza continua** (massima potenza sviluppabile con una scarica prolungata → uso 'energetico') e **potenza ad impulso** (massima potenza sviluppabile in un intervallo molto limitato) ⇒ valori fissati in base a limiti di temperatura o formazione di prodotti di reazione pericolosi

Energia

- Determina la **durata dell'intervento** a fronte della potenza erogabile
- Valore teorico definito $V_0 \cdot C \Leftrightarrow$ valore pratico $\int (v \cdot i \, dt)$ calcolato tra l'istante corrispondente alla piena carica e l'istante corrispondente a V_{cut} (dipende dal tasso di scarica)
- Dipende dalle **modalità di scarica** ⇒ convenzionalmente fornito per un dato tasso di scarica (I=cost.) ad esempio C/5

Grafico di Ragone

- Legame potenza ed energia specifiche per batterie ed altri sistemi di accumulo
- Test a **potenza erogata costante** regolando il carico collegato e misurando l'energia corrispondente a $V=V_{cut}$
- Esecuzione di diversi test corrispondenti a diversi livelli di potenza

Caratteristiche principali batterie

Batterie	Energia specifica [Wh/kg]	Densità di energia [Wh/l]	Potenza specifica [W/kg]	Vita ciclica [cicli @80%DOD]	Temperatura [°C]	Prezzo vendita [\$/kWh]
Pb-A avanzato	44	120	200	800	Ambiente	120-150
Ni-Cd	50	110	150-180	>800	Ambiente	300-500
NiMH	50-70	115-190	170	750-1000	Ambiente	300-700
Na-NiCl	90-100	140	130	>1000	275	600
NaS (>50 kW)	150-240	150-250	150-230	2500	> 300 °C	500
Li-Ion	100-120	250	250-300	1200	Ambiente	1000
Li-pol	150	250	300	600	80	750-1300

Principali applicazioni

- **Trasporti** ⇒ alimentazione principale di veicoli elettrici stradali, alimentazione ausiliaria di veicoli ibridi, alimentazione per la marcia autonoma di veicoli pubblici urbani e ferroviari
- **Energia** ⇒ accumulo di energia elettrica con fonti di generazione rinnovabili (aleatorietà di produzione)
- **Industria** ⇒ funzioni di alimentazione di emergenza (UPS), alimentazioni di servizi ausiliari non raggiungibili dalla rete di alimentazione

Esempio di data-sheet



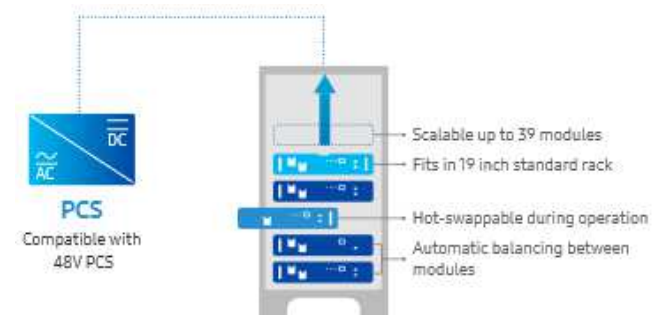
Product Lineup



Specifications

Performances of each battery system	24 V 82 Ah	24 V 164 Ah
Modul'ion®-14 24.82 MFe	1	2
Voltage window (V)	16.8 - 26.6	
Nominal voltage (V)	23.1	
Rated capacity (C/5) (Ah)	78	156
Typical capacity (C/5) (Ah)	82	164
Typical energy (C/5) (Wh)	1 894	3 788
Charging time*	1h10	
Max continuous discharge current (A)	100	
Max pulse discharge current in 5 s (A)	300	
Max charge current (A):		
• 0% - 90% SOC	90	162
• 90% - 100% SOC	82	90
Dimensions in mm (LxWxH)	648 x 156 x 627	
Weight (kg)	51	71
Operating conditions		
System operating temperature	-20°C to +45°C (-4°F to 113°F)	
Temperature for transport and storage	-40°C to +50°C (-40°F to 122°F)	
Protection class of the battery box	IP65	

Item		R3-M010	R1-M048
Component		Battery Module, BMS	Battery Module, BMS
Energy	kWh	1.0	4.8
Scalability	kWh	16 (16ea)	188 (39ea)
Operating Voltage	V	42~56	44~59
Dimension (W x D x H)	mm	169x377x86	484x450x159
Weight	kg	8	37
Operating Temperature	°C	-10 ~ 60	-10 ~ 50



Modelli per l'analisi dei processi di scarica

Equazione di Peukert \Rightarrow relazione empirica che lega corrente di scarica e tempo per arrivare a V_{cut} \rightarrow in quanto tempo si scarica la batteria e quanta carica è stata erogata

- Prova di scarica della batteria ad **$I=cost.$** da un SOC=100% fino a V_{cut}
- Ripetizione della prova con diversi valori di I misurando t_{cut} per ciascuna di esse



$$I^n \cdot t_{cut} = \lambda$$

- n, λ : parametri derivati per interpolazione
- $n \approx 1$ per basse correnti, $n \approx 2$ per alte correnti



$$\log(I^n \cdot t_{cut}) = \log(\lambda) \Leftrightarrow n \cdot \log(I) + \log(t_{cut}) = \log(\lambda)$$

$$\Leftrightarrow \log(I) = -\frac{1}{n} \cdot \log(t_{cut}) + \frac{1}{n} \cdot \log(\lambda)$$

In scala
logaritmica
è una retta



$$Q = I \cdot t_{cut} \Leftrightarrow Q = I \cdot \lambda / I^n \Leftrightarrow Q = \lambda / I^{n-1}$$

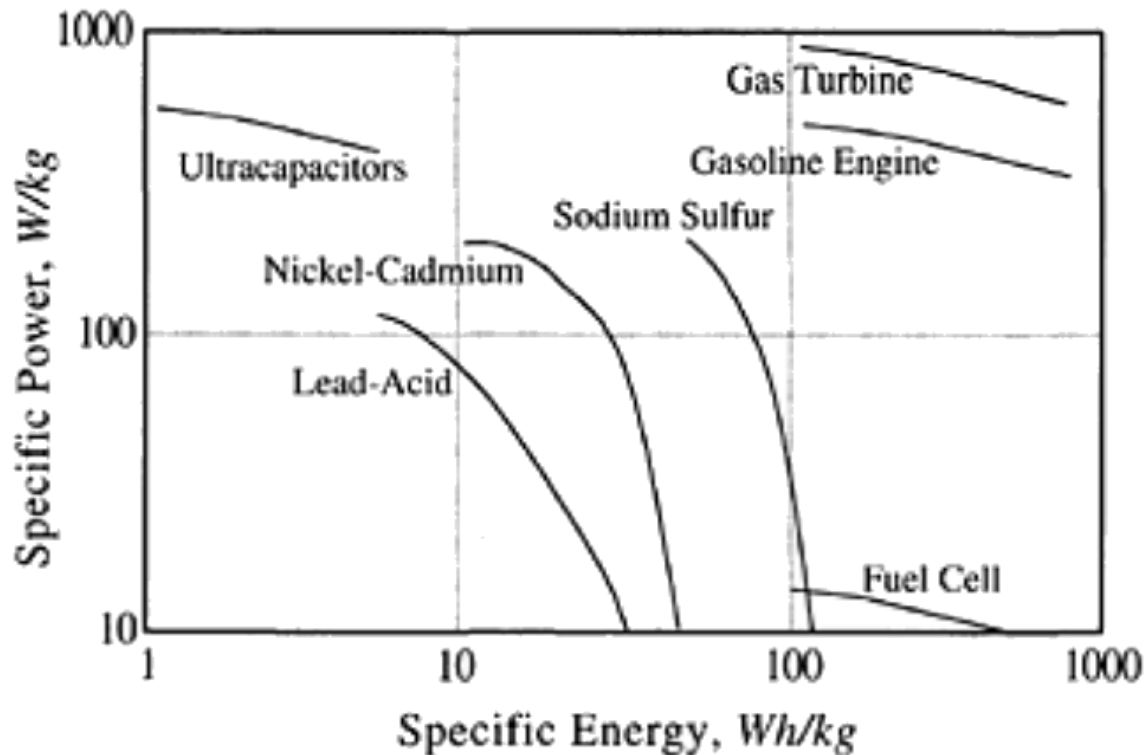
- Legame simile esistente tra energia specifica E_s e potenza specifica P_s erogate nella medesima prova (a $P=cost.$ per diversi valori di P)



$$P_s^m \cdot E_s = \mu$$

Diagramma di Ragone in scala
logaritmica coincide con una retta

Diagramma di Ragone



- Batterie \Rightarrow andamenti lineari (scala logaritmica) per un ampio range di potenza
- Migliori performance per le batterie NaS (alta E_s , caratteristica 'rigida' \rightarrow stabilità)
- Prestazioni non paragonabili con le macchine a combustione interna di tipo convenzionale

Esempio \Rightarrow calcolo coefficienti con regressione lineare (provare con Excel !!)

P_s (W)	t_{cut} (h)	E_s (Wh)
150	6.75	1012.5
450	0.85	382.5
900	0.23	207
1650	0.073	120.45

$\log(P_s)$	$\log(E_s)$	$\log(P_s)_{intp}$	scarto (%)
2.1761	3.0054	2.1782	0.10%
2.6532	2.5826	2.6536	0.01%
2.9542	2.3160	2.9535	-0.03%
3.2175	2.0808	3.2179	0.01%


$$\log P_s = -\frac{1}{m} \log E_s + \frac{1}{m} \log \mu$$

$$y = ax + b$$

$a=-1/m$	$b=\log(\mu)/m$	m	μ
-1.12454	5.55785	0.889	1.224

Fractional depletion model (FDM)

- Fase di scarica con corrente ***i* variabile** istante per istante
- Applicazione dell'equazione di Peukert in un generico intervallo ***dt*** in cui la corrente si possa ritenere costante (variazioni di corrente 'lente')




$$d(DOD) = \frac{i \cdot dt}{Q} = \frac{i \cdot dt}{\lambda / i^{n-1}} = \frac{i^n}{\lambda} dt \quad \Rightarrow \quad DOD(t) - DOD(t_0) = \int_{t_0}^t \frac{i^n}{\lambda} dt \quad [\%]$$

*Quantità di carica erogata alla corrente *i* da 0 a *t**


 Se la batteria è inizialmente carica $\Rightarrow DOD(t) = \int_0^t \frac{i^n}{\lambda} dt \quad [\%]$


- Formulazione analoga in termini di energia e potenza specifica
- ***f_r***: frazione di energia erogata rispetto a quella disponibile all'istante ***t₀***



$$df_r = \frac{dE_s}{E_s} = \frac{P_s \cdot dt}{\mu / P_s^m} = \frac{P_s^{m+1}}{\mu} dt \quad \Rightarrow \quad f_r(t) = \int_0^t \frac{P_s^{m+1}}{\mu} dt \quad [\%]$$

Equazione di Peukert

FDM basato sulla densità di potenza

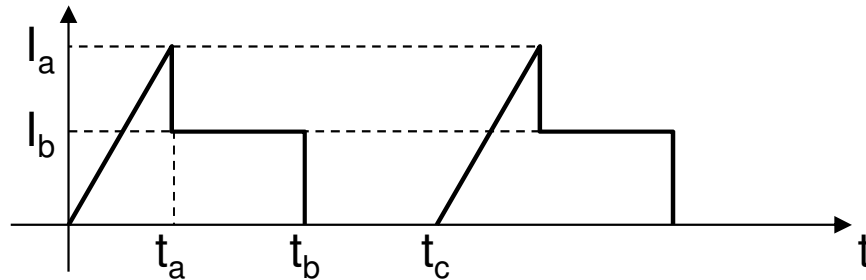

 Se in *t* tutta l'energia disponibile è stata erogata $\Rightarrow 1 = \int_0^t \frac{P_s^{m+1}}{\mu} dt \quad [\%]$

Esempio

- Modello analitico di scarica della batteria: $\log(I) = -0.74 \cdot \log(t_{cut}) + 4.787$

da regressione
lineare

- Profilo di scarica su un ciclo di funzionamento periodico



- $t_a = 19 \text{ s}$, $t_b = 38 \text{ s}$, $t_c = 72 \text{ s}$
- $I_a = 100 \text{ A}$, $I_b = 35 \text{ A}$

- Calcolare il numero di cicli N prima di avere la scarica della batteria

➤ Calcolo dei coefficienti dell'equazione di Peukert: $\Rightarrow n = 1/0.74 = 1.35$

$$\Rightarrow \frac{1}{n} \cdot \log \lambda = 4.787 \Rightarrow \lambda = 645 \text{ Ah}$$

➤ Scarica dopo 1 ciclo $DOD_{N=1}$: (FDM) $\Rightarrow DOD_{N=1} = \int_0^{72} \frac{i^{1.35}}{645 \cdot 3600} dt$
Per riportarsi a [s]

$$DOD_{N=1} = 4.31 \cdot 10^{-7} \left[\int_0^{19} \left(\frac{100 \cdot t}{19} \right)^{1.35} dt + \int_{19}^{38} (35)^{1.35} dt \right] = 4.31 \cdot 10^{-7} \left[9.41 \frac{19^{2.35}}{2.35} + 121.5 \cdot 19 \right] = 2.74 \cdot 10^{-3}$$

➤ N cicli \Rightarrow scarica completa

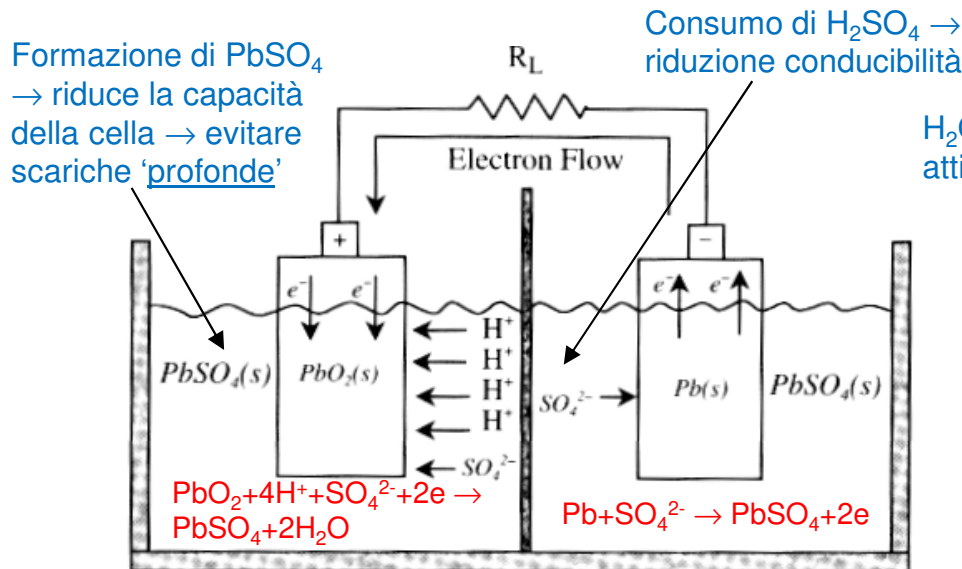
$$N = \frac{DOD_{100\%}}{DOD_{N=1}} = \frac{1}{2.74 \cdot 10^{-3}} = 365$$

Definisce la durata in cui la batteria può essere utilizzata senza ricariche

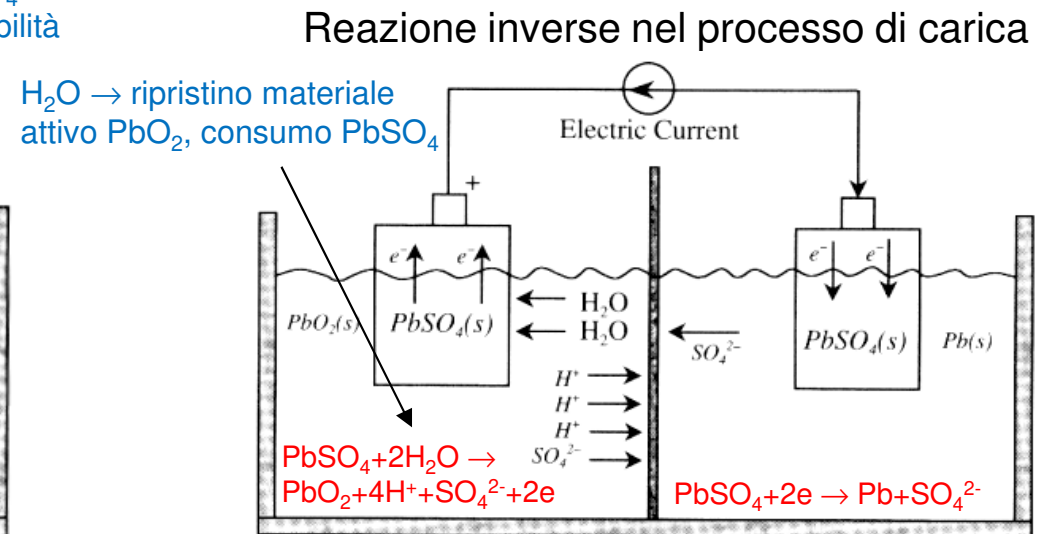
Batterie Pb-A

- Vantaggi in termini di **basso costo**, **disponibilità** di materia prima (Pb,S), **facilità di costruzione** ed **affidabilità**
- **Elettrodi negativi** realizzati in **Pb** (o leghe, depositato su griglie di rame \Rightarrow **CSM** copper stretch metal \rightarrow riduzione 20% resistenza interna) interposti ad **elettrodi positivi** in Pb addizionato con calcio o antimonio (per aumentare la durezza del materiale \rightarrow problema costo), sui cui viene depositato materiale attivo (**PbO₂** o PbSO₄) \rightarrow ampia superficie per immagazzinamento di energia elettrochimica (elettrodi porosi, uso di stack comprendenti fino a 30 griglie)
- **Separatore** in materiale microporoso per avere la reazione chimica (trasporto degli ioni dell'acido), evitando il corto-circuito tra gli elettrodi
- Elettrodi saldati ai rispettivi terminali ('+' e '-'), inseriti in un contenitore in polipropilene ed immersi in una **soluzione acido solforico** (circa 37% in peso a piena carica) e **acqua distillata (elettrolita)**

Scarica



Carica

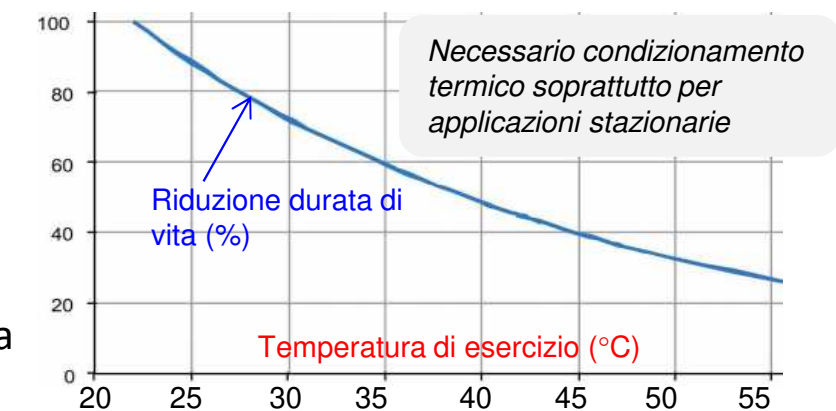
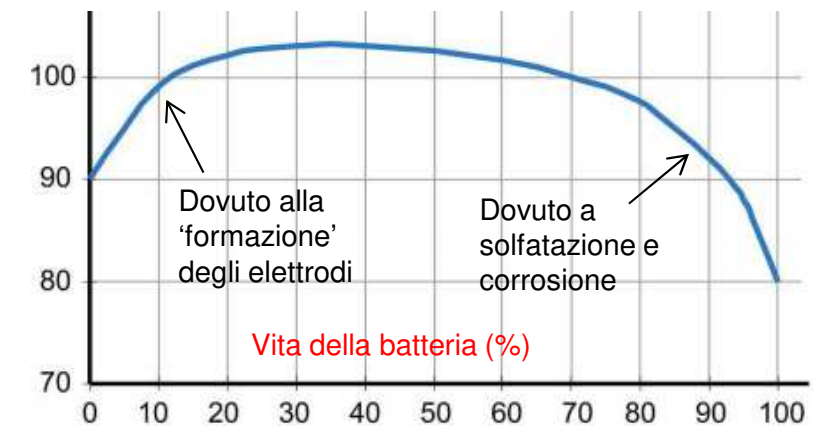
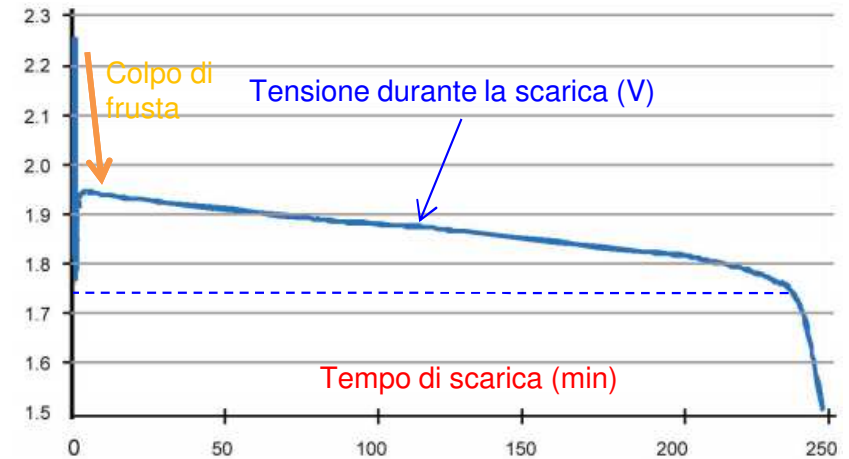


Principali caratteristiche delle Pb-A

- **Tensione di cella:** open circuit voltage (OCV) fino a 2.15 V, ma durante la scarica arriva fino a 1.75 V (V_{cut}) ed a piena ricarica fino a 2.5 V
- Fenomeni rilevanti alla **scarica/ricarica**
 - **‘Colpo di frusta’:** forte riduzione della tensione ad inizio scarica prodotta dalla reazione sull’elettrodo positivo → può causare un fuori servizio dell’elettronica di potenza
 - **‘Gassing’:** formazione di idrogeno ed ossigeno per elettrolisi dell’acqua durante la ricarica quando viene superata una certa tensione (2.39 V) → riduzione efficienza, incremento pressione interna, necessario ripristino dell’acqua
- **Variazioni della capacità**

Modalità d’uso → riduzione della capacità per **processi di solfatazione** con batteria non operativa e parzialmente scarica (uso di una **‘float charging’** ricarica lenta a bassa corrente che evita deposito di solfato di piombo e l’auto-scarica della batteria)

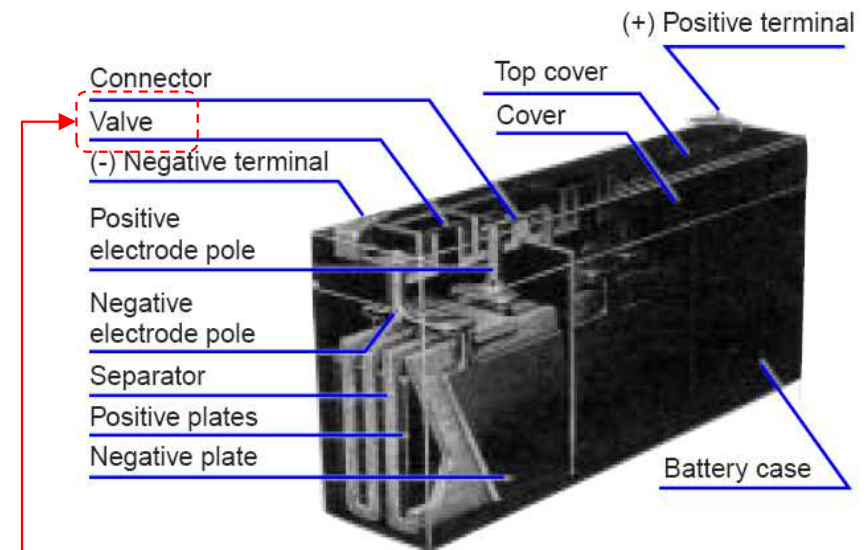
Temperatura → il passaggio da 25 a 0°C porta ad una riduzione di capacità anche del 30%, innalzamento > 25 °C riduce la durata di vita



Batterie PbA avanzate (VRLA)

- **Problemi delle PbA convenzionali** ('flooded')
 - manutenzione (controllo periodico almeno una volta al mese per evitare l'essiccazione delle celle)
 - sicurezza per la presenza dell'acido libero (posizionamento della batteria per evitare fuoriuscite)
 - scarsa efficienza nella diffusione dell'ossigeno e influenza della temperatura esterna
- Uso di **costruzioni ermetiche** ('sealed') praticamente prive di manutenzione e facili da installare
 - Controllo pressione interna per la formazione di idrogeno (sovraccarica) \Rightarrow valvola che interviene in situazioni di emergenza impedendo in condizioni normali la fuoriuscita dell'ossigeno
 - Recupero e mantenimento dell'ossigeno \Rightarrow rientra nella formazione degli elettrodi
- **Tipologie** \Rightarrow modalità con cui l'elettrolita viene immobilizzato
 - Absorbed glass microfiber (AGM) \rightarrow materiale separatore spugnoso che assorbe l'elettrolita
 - Pb-gel \Rightarrow sale aggiunto all'elettrolita \rightarrow composto gelatinoso che consente la diffusione dell'ossigeno
- **Limiti** rispetto alle PbA convenzionali
 - minore durata di vita (10 anni rispetto a circa 30)
 - problemi di surriscaldamento
 - range di tensione molto più limitato
 - molto sensibili alle sovraccariche/scariche

Cella prismatica AGM (Panasonic)

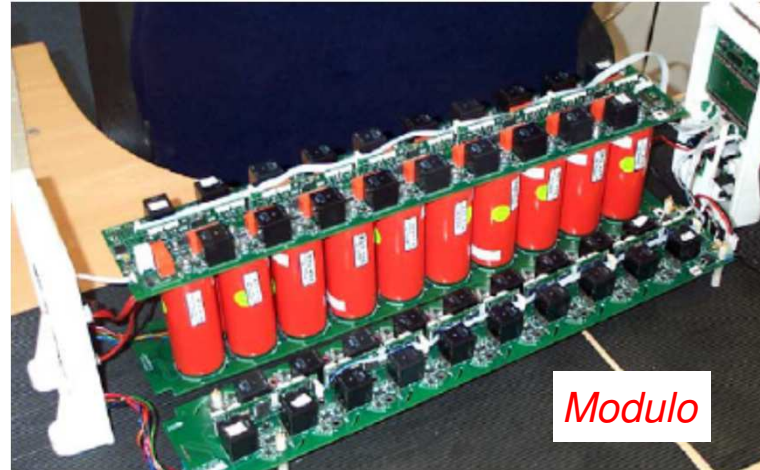


*Riequilibra la pressione (7.1÷43.6 kPa), evitando lo scoppio
In materiale flessibile (neoprene) che consente un elevato numero di operazioni*

Batteria PbA a forma cilindrica



Cella (AGM)



Modulo

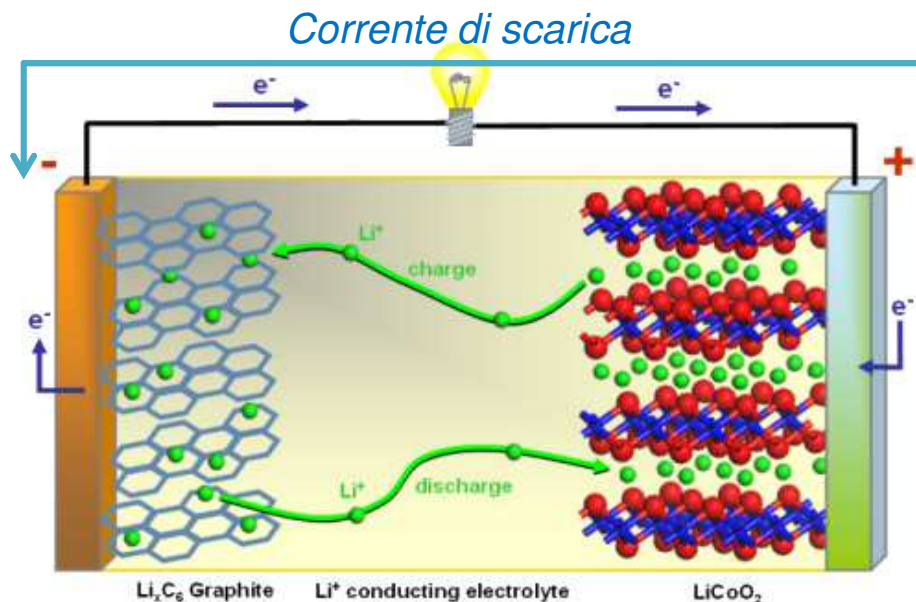


Assemblaggio

- Uso di una **geometria cilindrica** (elettrodi a spirale) per una **migliore tenuta** alle pressioni interne ed aumentare le condizioni di **compressione degli elettrodi** \Rightarrow maggiore numero di cicli, assemblaggio facilitato, ampio spazio per il controllo termico
- Funzioni del '**battery management system**' (BMS)
 - ✓ **By-pass di una o più celle** presenti in un modulo in modo da poter continuare ed essere operativo in condizioni di sicurezza anche in presenza di celle guaste
 - ✓ **Controllo del flusso dell'energia** ('conditioning process') una cella per volta anche durante il funzionamento, non solo in condizioni di test
 - ✓ **Controllo termico** (gestione del calore molto problematica nelle batterie VRLA)

Batterie Li-ion

- **Litio** adatto come **elettrodo negativo** per il basso peso specifico, l'alto potenziale di riduzione e la bassa resistenza elettrica
- **Elettrodo positivo in ossido di litio e cobalto** ed elettrodo negativo in litio in forma ionica inserito in composti di grafite con **elettrolita liquido organico** (a base di carbonati)
- Tensione di cella nominale **3.7 V** (a vuoto $\approx 4V$), elevate energia e potenza specifica (**>100 Wh/kg** e fino a 500 Wh/L – **250 W/kg**)



Reazioni

Anodo (-)

Catodo (+)



x: frazione in movimento dall'elettrodo negativo (valore tra 0 e 1) a quello positivo

- **Litio corrosivo** e soggetto ad incendiarsi in presenza di umidità, **elettrolita spesso tossico** → necessarie opportune procedure per il riciclaggio
- **Ricarica:** a corrente costante (0.7-1 C) fino alla tensione limite **4.2 V**, poi a tensione costante fino a quando la corrente scende al valore C/10-C/30
- **Vantaggi:** buone prestazioni al variare della temperatura (-60 – 100 °C), elevata efficienza, bassa auto-scarica (2%-8%/mese), assenza di effetto di memoria, possibilità di utilizzare un elettrolita polimerico (assenza di sversamenti, non infiammabile e minore resistenza interna)

Tipologie Li-ion

Lithium iron phosphate (LFP, LiFePO_4)

Metal oxides (NCM, NCA, Cobalt, Manganese)

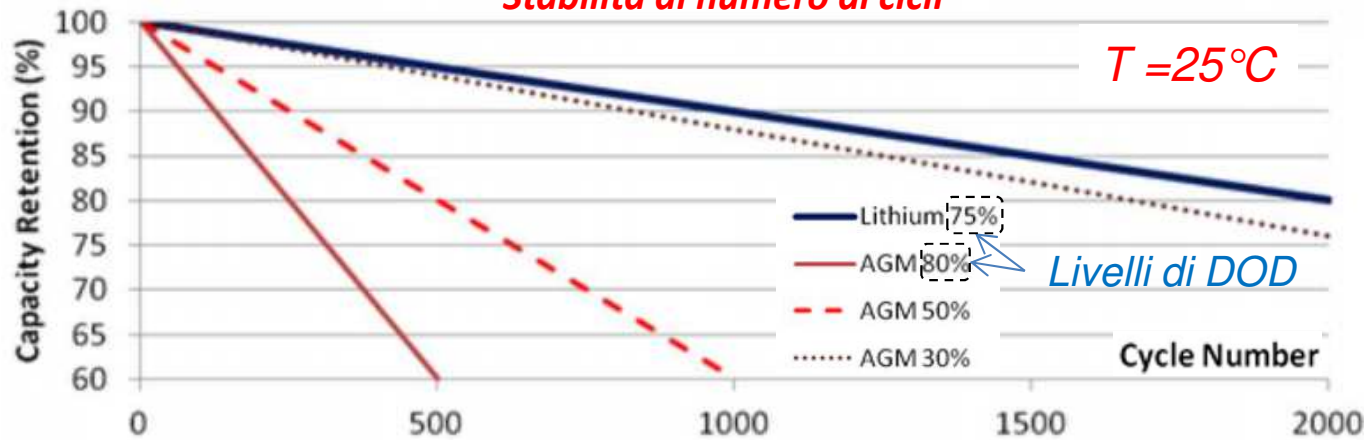
	LFP	LiNCM
Voltage	3.3 V nominal (2-3.6 V/cell)	3.7 V nominal (2.7-4.2 V/cell)
Energy Density	300 Wh/L	735 Wh/L
Specific Energy	128 Wh/kg	256 Wh/kg
Power	1000 W/kg <i>Arrivano fino a 2400 W/kg o 4500 W/L</i>	512 W/kg
Cycle Life	2,000 @ 100% DoD 3,000 @ 80% DoD	750 @ 100% DoD 1,900 @ 80% DoD
Calendar Life	6 years	8 years
Max recommended temperature	40°C	55°C
Safety	High	Moderate
Commercial Suppliers	A123, Valence, BAK, BYD, K2, Lishen, many Chinese vendors	Sanyo, Panasonic, Samsung, DowKokam, Sony, LG Chem, Moli

Litio-Ferro: usano nano-fosfati come materiale per l'elettrodo positivo

Cobalto molto costoso e prodotto in paesi 'a rischio' → deve essere riciclato

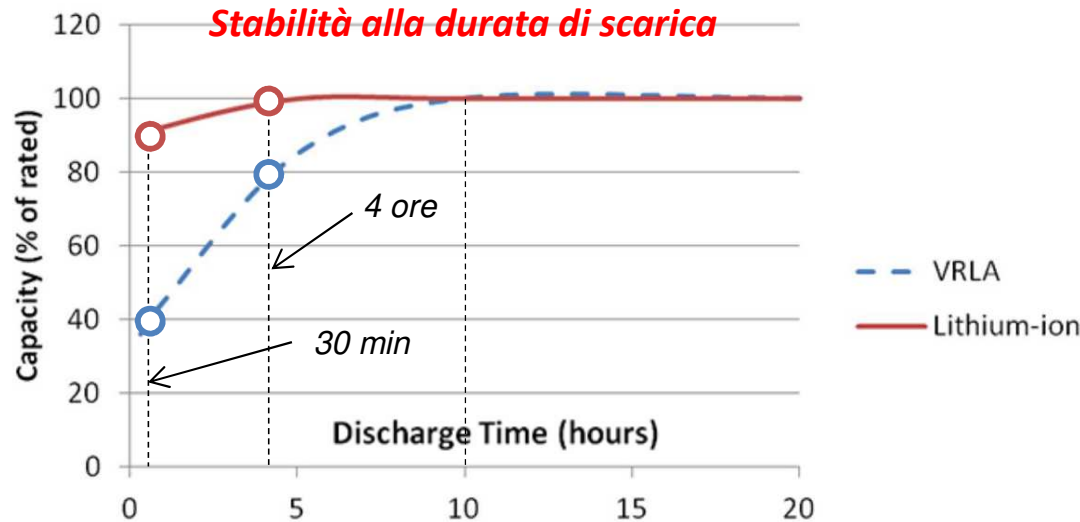
Confronto con batterie VRLA

Stabilità al numero di cicli



- Batteria AGM (absorbed glass microfiber) deve avere una **capacità almeno 2.5 volte più alta** per ottenere lo stesso numero di cicli (vedi AGM 30%)
- $T \rightarrow 33^{\circ}\text{C} \Rightarrow$ Li-ion invariato, AGM (DOD=30%) arriva al 60% di capacità totale residua già con 1700 cicli (si abbassa la caratteristica)

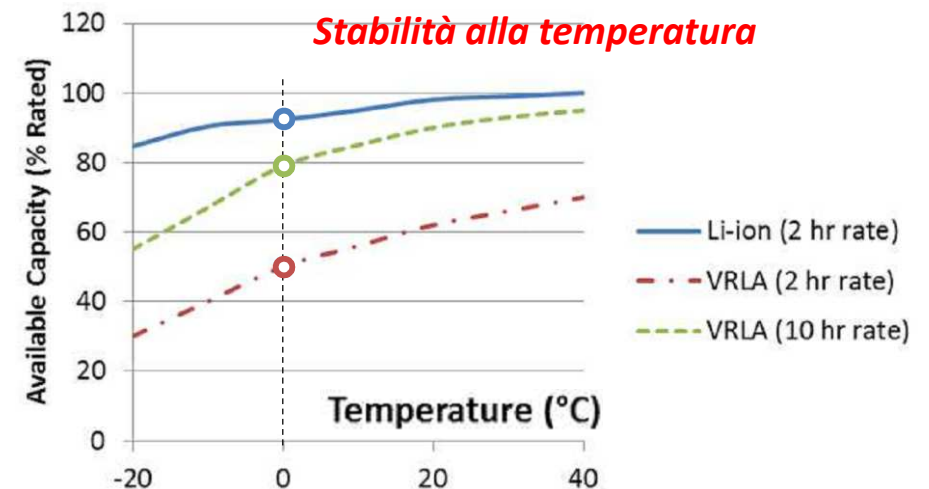
Stabilità alla durata di scarica



Batteria **PbA** mantiene prestazioni in scarica confrontabili solo con **scariche molto lente** (>10 h)

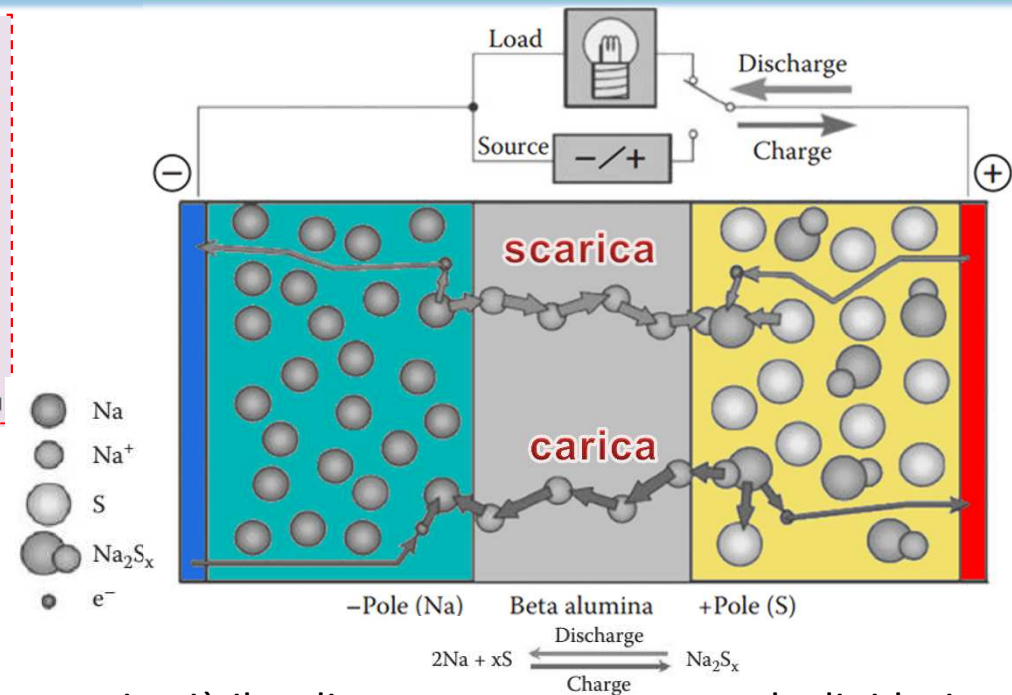
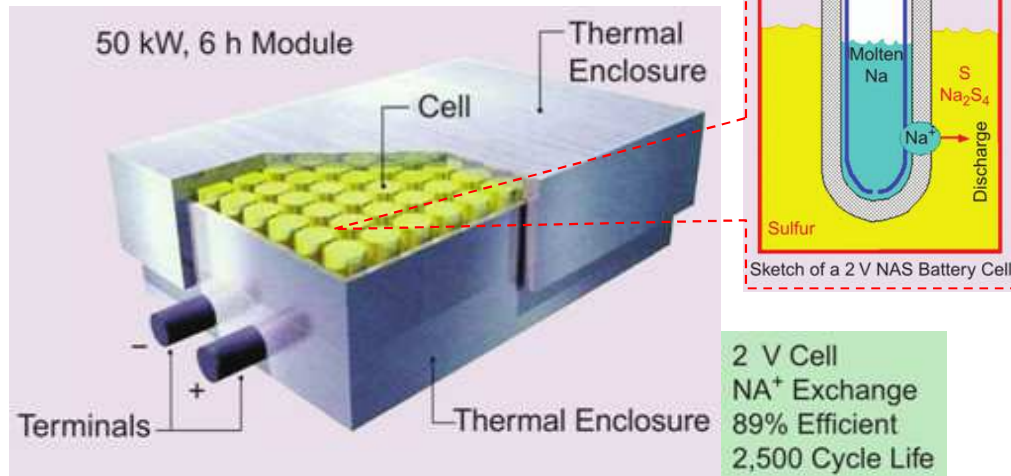
Abbassamento carica erogabile con scariche più rapide molto accentuata per le **PbA** (-20% su 4 ore, -60% su 30 min), mentre per **Li-ion** è molto limitata (max -10%)

Stabilità alla temperatura

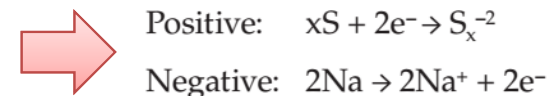


Miglior tenuta delle Li-ion alle basse temperature: a **0°C** è in grado di erogare **+40%** della carica con lo stesso tasso di scarica e **+10%** con un **tasso di scarica 5 volte più alto**

Batterie NaS



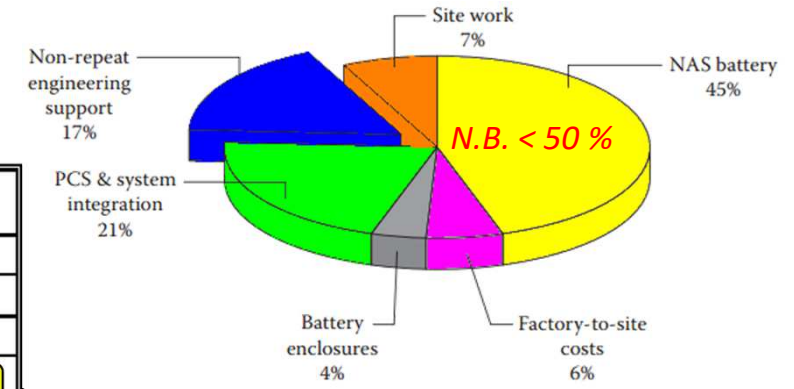
- Materiali largamente **disponibili in natura** e di **basso costo**, in più il sodio presenta alto potenziale di riduzione e basso peso atomico \Rightarrow applicazioni ad **alta energia specifica 150-200 Wh/kg**
- Materiale attivo a base di sodio liquido (elettrodo negativo) con elettrolita ceramico in beta-allumina ($\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$) che presenta un'alta conducibilità ionica a 300°C
- Cella a forma cilindrica allungata, racchiusa da un **recipiente metallico inerte** e resa **ermetica** da un coperchio di alluminio (problema **infiammabilità** e **corrosione** del sodio)
- Alta temperatura di funzionamento ($\approx 300^\circ\text{C}$), per mantenere i materiali attivi allo **stato fuso**, ma mantenuta costante **dal calore generato durante i processi di carica e scarica** e dalla configurazione in blocco modulare delle celle (non necessaria sorgente separata di calore)
- **Scarica**: ossidazione del sodio all'interfaccia con l'elettrolita, formando ioni Na^+ (cessione di $2e^-$) che si combinano con lo zolfo (riduzione) formando polisolfuro di sodio ($\text{Na}_2\text{S}_x \rightarrow$ assorbimento di $2e^-$)
- **Carica**: reazioni chimiche invertite \Rightarrow al '+' si ha la formazione di zolfo e ioni di Na con cessione di $2e^-$, al '-' si ha la ricombinazione degli Na^+ con $2e^-$ per formare Na



Celle commerciali

Caratteristiche celle NGK NAS®

Costi impianto (7.2 MWh)



Parameter	NAS T5 Cell	NAS Battery Modules		
		E50 PS Module	G50 Module	PQ50 Module
Nominal Voltage, V_{dc}	2	64 or 128		640
Operating Temperature	[290 to 360C]			
Cell Arrangement ("s" series; "p" parallel)	Single	(8s x 6p) x 8s or (8s x 12p) x 4s	(8s x 5p) x 8s or (8s x 10p) x 4s	320s
Electrical Protection	NA	Internal fuse within each 8s string		DC breaker and external fuse
Rated PS Capacity (Notes 1, 2)	628 Ah	430 kWh _{ac}	360 kWh _{ac}	
Rated PS Power (Notes 1, 3)	NA	50 kW _{ac}		
Max Power for Interval Noted (Note 1, 4)	NA	100 kW _{ac} for ~2hr		250 kW _{ac} for 30sec
Pulse Factor (Note 5)	NA	2		5
Projected Calendar & Cycle Life	15 years: 4500 to 90%, 2500 to 100% DOD cycles			
Avg DC Efficiency, %	90	85		
Standby Heat Loss, kW	NA	3.4		2.2 (PQ) 3.4 (PQ+PS)
Dimensions, mm (in)	515L x 91Φ	2,270W x 1,740D x 720H		
	(20.3L x 3.6Φ)	(89.4W x 68.5D x 28.4H)		
Weight, kg (lb)	5.5 (12.1)	3500 (7920)		

Celle serie (alta tensione) più adatte al regime pulsato

Buona sovraccaricabilità anche in regime pulsato

Importante non arrivare ad una scarica a fondo (può arrivare a 10000 cicli con 40% DOD), durata di vita non eccezionale

Tipo moduli (rete alta potenza)

PS: peak shaving (funzionamento prolungato con predefiniti cicli di lavoro)

PQ: power quality (interventi di soccorso in caso di guasto)

Notes:

1. AC rating based on 95% inverter efficiency
 2. Design basis Rated PS Capacity based on 1.82V_{pc} OCV at end of discharge and end-of-life
 3. Design basis Rated PS Power for reference peak shaving profile yielding 100% DOD
 4. Maximum power for short duration discharges (typically yield less than 100% DOD)
 5. Pulse Factor: Ratio of maximum power to rated power for stated duration.
- (Values above are the maximum achievable with operating temperature and electrical protection designs for the battery module.)

Altre batterie

Nickel-Cadmio

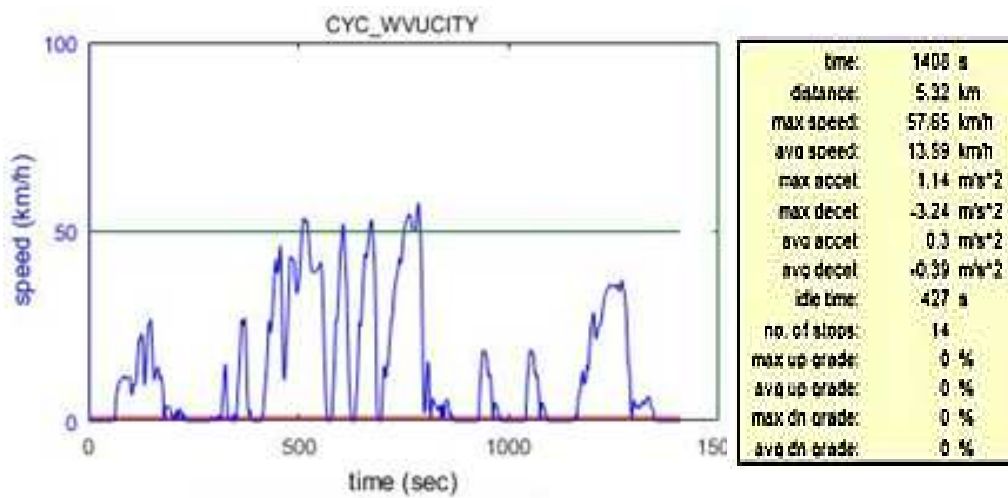
- Batterie alcaline: (+) → **ossido di nickel**, (-) → **cadmio metallico**, elettrolita → **idrossido di potassio**
- Tensione di cella **1.2-1.3 V** ed energia specifica paragonabile alle PbA (**50 Wh/kg**)
- Vantaggi: resistenza alle basse temperature, caratteristica di scarica piatta (possibilità di scariche profonde), lunga durata e manutenzione ridotta
- Svantaggi: costo elevato e **tossicità del cadmio** (problema smaltimento)
- Poco adatte per i veicoli, più utilizzate **per UPS e applicazioni stazionarie**

Nickel-idruri metallici (NiMH)

- Rispetto alle NiCd: (-) → lega metallica in cui può essere immagazzinato e rilasciato idrogeno (ioni H^+) in certe condizioni di pressione e temperatura (lega di titanio, zirconio e nickel)
- Tensione di cella come Ni-Cd ma **energia specifica superiore (80 Wh/kg)**
- Vantaggi: come Ni-Cd ma con possibilità di riciclaggio
- Svantaggi: costo relativamente elevato, **alta resistenza interna soprattutto alle basse temperature**, bassa energia specifica e bassa resistenza alle alte temperature
- Impiegate in molti **prototipi e veicoli commerciali**

Dimensionamento per mobilità

- **Caratteristiche del veicolo:** massa M_v (telaio + ruote, compresa inerzia masse rotanti) resistenze al moto $R(s, v)$, potenza richiesta dai servizi ausiliari P_{aux}
- **Dati di tipo elettrico:** tensione nominale circuito principale V_n , dati motore elettrico (massa M_{me} , potenza P_{me} e rendimento η_{me})
- **Ciclo di guida di riferimento:** diagramma orario $v(t), s(t)$ (collegato al tipo di servizio)
- **Caratteristiche della cella elettrochimica** (o modulo): capacità nominale C_0 , tensione nominale V_{bn} , massa M_b , massima corrente di scarica $I_{b,max}$



Descrizione	Caratteristiche
Veicolo di piccola taglia	$M_v = 600 \text{ kg}$
	$P_{aux} = 700 \text{ W}$
Batteria agli ioni di litio (singolo modulo)	$C_0 = 6 \text{ Ah}$
	$V_{bn} = 10.7 \text{ V}$
	$M_b = 28 \text{ kg}$
	$I_{b,max} = 22 \text{ A}$
Motore elettrico in c.a.	$P_{me} = 60 \text{ kW}$
	$\eta_{me} = 0.92 \text{ (nom)}$
	$M_{me} = 73 \text{ kg}$

Dimensionamento per mobilità

Forza e potenza totali

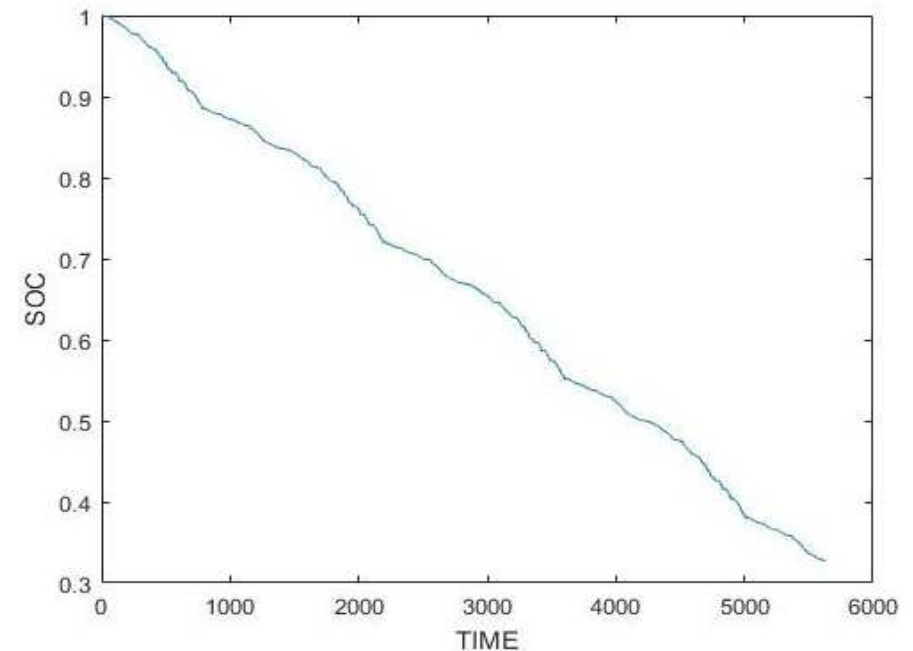
$$f_T(t) = M_T \frac{dv(t)}{dt} + R(s, v, M_T) , p_T(t) = f_T(t)v(t)$$

M_T : massa totale veicolo e componenti
 s : spostamento (eventuali pendenze)

Energia e capacità batterie

$$p_b(t) = \frac{p_T(t)}{\eta_{me}} + P_{aux} , E_b = \int_0^t p_b(t)dt , C_b = \frac{E_b}{V_n 3600 (1-SOC_{fin})} [Ah]$$

- Es. auto per servizio di car-sharing (**4 cicli di 5 km** ciascuno → totale 20 km)
- **$SOC_{fin} \geq 0.3$** , **$V_n = 267 V$** → 25 moduli in serie
- Energia calcolata singolo ciclo $\approx 3.8 MJ$
 - Energia richiesta: **$3.8 \times 4 \cong 15.2 MJ \cong 4.2 kWh$**
- Valore capacità: **$C_b = 22.6 Ah$**
 - 4 moduli in parallelo: **$C_b = 24 Ah$**
 - massa complessiva del veicolo: **$970 kg$**
- Simulazione profilo SOC tramite software Advisor®

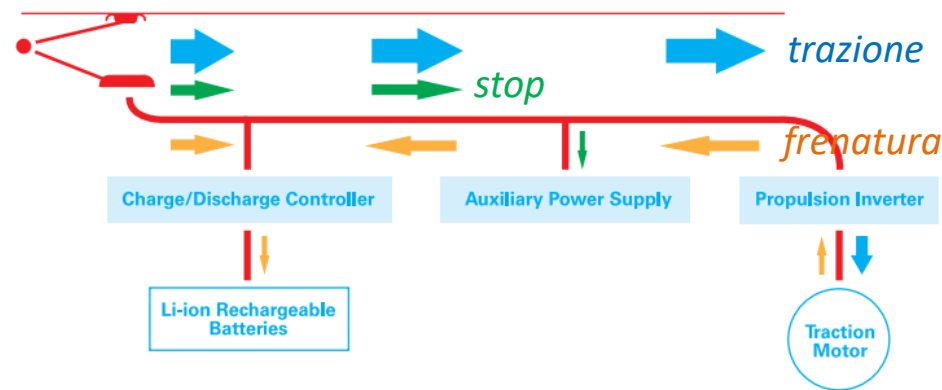


KinkiSharyo AmeriTram™

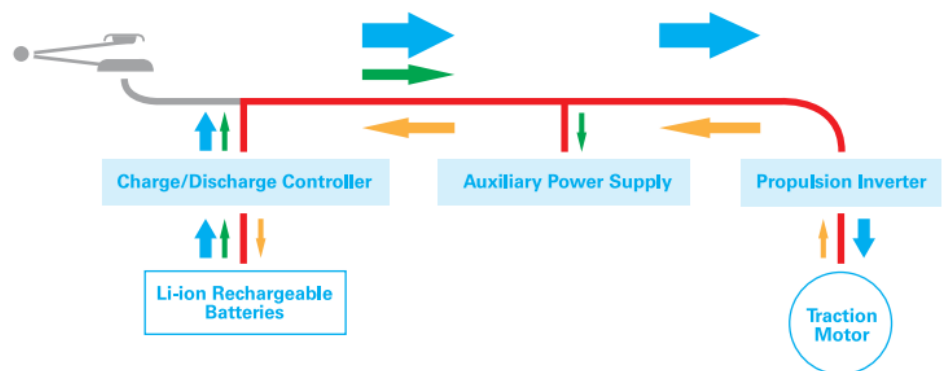


- Veicolo con **alimentazione 'ibrida'** da catenaria e da batteria a bordo
 - Alimentazione da catenaria: potenza tutta prelevata dalla linea per ricarica batterie (anche da frenatura rigenerativa), ausiliari e motori di trazione
 - Alimentazione da batterie Li-Ion: alimentazione ausiliari e motori nei tratti (urbani) privi di catenaria
- **No linee interrate** → maggior sicurezza per persone e mezzi, insensibilità a depositi dovuti ad eventi atmosferici o a danneggiamenti da traffico
- **Principali caratteristiche**

Powered by Catenary



Powered by Li-ion Batteries



Propulsion control	VVVF inverter control (IGBT) with regenerative and rheostatic brake	
Auxiliary power supply	AC440V-60Hz, DC24V	
Battery equipment	Li-ion rechargeable battery 40kWh	
Trucks	Wheel	Resilient wheel
	Wheel base	1800 mm (5.9ft 70.8in)
	Gear ratio	44/7 = 6.29
	Brake system	Spring applied hydraulic brake Electrical regenerative brake Track brake
Motor	120kw x4, 550V, 2370rpm (self-cooling type)	



External dimensions	I, w, h: 389, 231, 147 (mm)
Nominal voltage	28.8V
Nominal capacity	30Ah
Maximum pulse current	600A
Operating temperature	0~45 °C
Weight	19.5Kg
Nominal cell voltage	3.6V
Operating voltage range	23.2~33.2V
Continuous current	100A
Monitoring system	Monitors each cell voltage and module temperature

Riepilogo

- Scelta tecnologie basata su **varie caratteristiche** non solo il costo
 - **tensione di cella** → numero connessioni serie
 - **temperatura** → pre-riscaldamento/isolamento dei moduli
 - **elettrolita** → liquido-solido, tossico-riciclabile
 - **resistenza interna** → rendimento, specialmente con frequenti ed intense cariche/scariche
 - **forma adattabile** al luogo di installazione es. veicolo
 - **degrado prestazioni** → effetto memoria, formazione di residui sugli elettrodi
- Connessione di **più celle in serie/parallelo** in base alla **tensione** ($\approx 400-600$ V) ed **all'energia richiesta** dal servizio
- Vincoli sulla **massima corrente** e controllo della **temperatura di funzionamento**
- Monitoraggio dello **stato di carica individuale** (tensione a vuoto, integrazione della corrente erogata → previsione dello stato di carica) per garantire una scarica uniforme delle celle (BMS: battery management system)
- **Dipendenza delle prestazioni** (specialmente rendimento) da corrente di scarica/scarica, SOC e temperatura \Rightarrow ad es. in condizioni ottimali il rendimento è compreso tra 70-90%
- Mantenimento del **SOC_{min} tra il 30% ed il 40%** per garantire una durata di vita accettabile