



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,  
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



*Ministero dello Sviluppo Economico*

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Sviluppo di moduli integrati, completi di BMS

*M. Ceraolo, T. Huria, C. Zappacosta*



Report RdS/2011/

## SVILUPPO DI MODULI INTEGRATI, COMPLETI DI BMS

M. Ceraolo, T. Huria, C. Zappacosta (Dipartimento di Sistemi Elettrici e Automazione – Università di Pisa)

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Studio per lo sviluppo di materiali innovativi per il risparmio di energia nel settore elettrico con particolare attenzione ai materiali per i mezzi di trasporto collettivi: Nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto

Responsabile Progetto: Giovanni Pede, ENEA

Inquadramento programmatico.

Il Presente Report si inquadra nella Ricerca di Sistema Elettrico svolta dall'ENEA nell'ambito del relativo Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA.

La Ricerca di Sistema ha come obiettivo l'innovazione del Sistema Elettrico per migliorarne l'economicità, la sicurezza e la compatibilità ambientale, assicurando al Paese le condizioni per uno sviluppo sostenibile.

Per lo svolgimento delle attività di ricerca e sviluppo previste dal Piano Triennale della Ricerca di Sistema Elettrico il Ministero dello Sviluppo Economico ha stipulato Accordi di Programma con ENEA, CNR ed ERSE.

Le attività sono finanziate attraverso un fondo alimentato dalla componente A5 della tariffa di fornitura dell'energia elettrica, il cui ammontare viene stabilito dall'Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas.

Nell'Accordo di Programma sono previsti temi di ricerca fondamentale e studi di carattere sistemico e prenormativo a totale beneficio dell'utente di sistema elettrico nazionale.

Le ricerche sono condotte dall'ENEA in collaborazione con le principali Istituzioni universitarie nazionali (oltre 28 Atenei e 65 diversi Dipartimenti coinvolti) e con le partecipate SOTACARBO e FN Nuove Tecnologie Avanzate. Nell'ambito dell'Accordo di Programma Triennale, l'ENEA ha terminato le attività terzo anno di attività.

L'accordo è meglio definito da un piano annuale di realizzazione, suddiviso in Attività. Ogni attività ha un contesto scientifico-programmatico di riferimento, suddiviso in aree e tematiche di ricerca, in ognuna delle quali sono definiti specifici progetti di ricerca, a loro volta suddivisi in obiettivi da perseguire.

Nel dettaglio, l'inquadramento programmatico completo del presente report è il seguente:

**Accordo di Programma MSE-ENEA:** Attività di ricerca e sviluppo di interesse generale per il sistema elettrico nazionale

**Piano Triennale 2006-2008**

**Piano annuale di realizzazione Terza annualità (2008-2009):** da realizzarsi tra l'ottobre 2010 ed il settembre 2011

**Attività:** Risparmio di energia elettrica nei mezzi di trasporto: nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto

**Area di riferimento:** razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

**Tematica di ricerca:** risparmio di energia elettrica nei mezzi di trasporto elettrici

**Progetto 3.5:** studio per lo sviluppo di materiali innovativi per il risparmio di energia nel settore elettrico con particolare attenzione ai materiali per i mezzi di trasporto collettivi: nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto

**Obiettivo A:** Sviluppo di moduli integrati, completi di BMS (Battery Management System)

## Sommario

1. Introduzione	5
2. Problematiche comuni a tutte le applicazioni veicolari	6
2.1. Monitoraggio ed equalizzazione.....	6
2.2. condizionamento termico .....	8
3. Peculiarità delle batterie SLI	10
3.1. Introduzione.....	10
3.2. Il problema della tensione.....	10
3.3. Il problema dell'equalizzazione delle tensioni di cella.....	11
3.4. Il problema della capacità nominale e la CCA .....	12
3.5. Il problema della "shelf life" .....	14
3.6. Comparazione di batterie presenti sul mercato.....	14
4. Peculiarità delle batterie per veicoli elettrici e ibridi	16
4.1. Potenza specifica ed energia specifica dei sistemi di accumulo .....	16
4.2. Tensione del sistema di accumulo .....	17
4.3. Parametri di interesse per i veicoli elettrici a batteria.....	17
4.4. Parametri di interesse per i veicoli ibridi.....	18
4.5. Ricarica ad alte correnti e brevi durate .....	18
4.6. Vita a microcicli (shallow cycles) .....	19
4.7. Vita DOD XX% .....	20
4.8. Safety/Abuse.....	20
4.9. Comparazione di batterie presenti sul mercato.....	21
5. Peculiarità delle batterie per la nautica da diporto	24
5.1. Classificazione delle unità da diporto.....	24
5.2. Caratteristiche delle batterie per la nautica da diporto .....	25
5.3. Effetti dell'uso di batterie al litio nei natanti da diporto a motore.....	26
5.4. Effetti dell'uso di batterie al litio nelle imbarcazioni e navi da diporto a motore .....	27
6. Progettazione del modulo integrato	29
6.1. Sostegno meccanico delle celle .....	29
6.2. Condizionamento termico.....	29
6.3. Monitoraggio e protezione (BMS) .....	30
6.4. Bilanciamento della carica delle celle in serie (BMMS) .....	30
6.5. Standardizzazione (tensione, capacità, ...).....	31
7. Conclusioni	32
8. Bibliografia	33
8.1. Articoli scientifici.....	33
8.2. Siti internet .....	33

## **1. Introduzione**

L'attività discussa in questa sezione del documento riguarda un'analisi di mercato sulle tipologie di batterie Li-Ione adatte all'utilizzo come elemento base per la realizzazione di moduli commerciali di ampia diffusione per applicazioni veicolari (alimentazione della propulsione elettrica pura, della propulsione ibrida, dei sistemi ausiliari) nelle tre possibili applicazioni sopra elencate, e valutazioni costi/benefici per identificarne la competitività economica.

## 2. Problematiche comuni a tutte le applicazioni veicolari

### 2.1. Monitoraggio ed equalizzazione

Quando si realizza una batteria di accumulatori elettrochimici con elementi in serie, inizialmente tutti allo stesso stato di carica, in linea di principio lo stato di carica dovrebbe rimanere invariato durante il normale funzionamento.

In realtà sussistono elementi di naturale squilibrio della carica, dovuti alle reazioni parassite che avvengono in tutti gli accumulatori, in aggiunta alla reazione reversibile di carica/scarica.

tali reazioni causano ad esempio il fenomeno dell'autoscarica che porta la batteria a perdere percentuali significative della loro capacità in tempi dell'ordine delle settimane. La corrente di autoscarica, che comporta variazioni dello stato di carica senza erogazione di capacità verso l'esterno può essere molto differente da cella a cella. Questo quindi causa nelle batterie un progressivo squilibrio nello stato di carica degli elementi posti in serie.

La compensazione di questi squilibri può avvenire nelle batterie al piombo in modo semplice ed economico. Si mantiene la batteria, solo che è stata ricaricata, ad una tensione di valore opportuno, tipicamente intorno ai 2,35V/cella.

Gli effetti di questa corrente, detta corrente di tampone, possono essere valutati con riferimento al circuito riportato in fig.1 , che rappresenta un modello circuitale dell'accumulatore oggi molto usato, ma sviluppato dall'Università di Pisa molti decenni orsono..

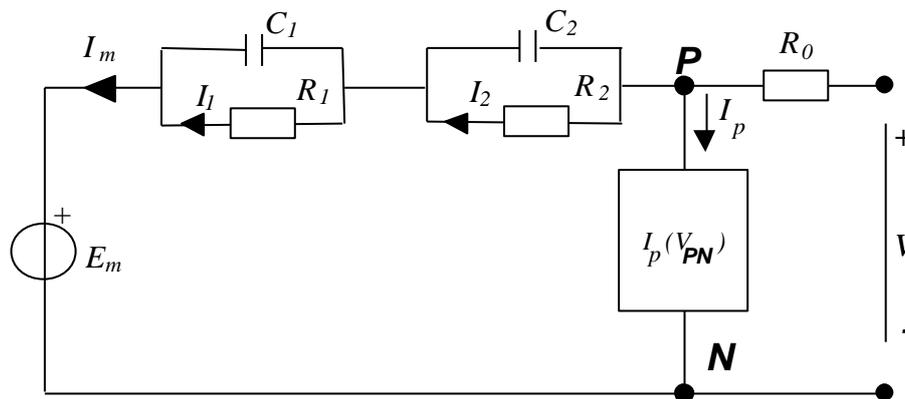


Fig 1: Modello circuitale generale di cella elettrochimica.

L'accumulo di carica all'interno della cella avviene per effetto della corrente  $I_m$  (m sta per "main" o "principale). Durante il normale funzionamento della cella, eccetto che a fine carica pressoché tutta la corrente che entra in batteria dal morsetto positivo viene convogliata nella reazione principale, e partecipa quindi alla carica/scarica dell'accumulo.

Se però la batteria viene lasciata alla tensione di tampone, quando essa si è ormai caricata in modo pressoché integrale, la tensione  $V_{PN}$  raggiunge valori superiori a 2,33 V/elemento, il ramo parassita PN comincia a drenare al corrente  $I_p$ , che va ad alimentare una leggera elettrolisi dell'acqua dell'elettrolita. Le normali batterie senza manutenzione sono di tipo VRLA, che consentono normalmente la ricombinazione dell'ossigeno ed idrogeno create con l'elettrolisi, e quindi l'elettrolisi stessa non comporta perdita di acqua. Sono in casi eccezionali la produzione di ossigeno ed idrogeno può superare la capacità di ricombinazione, ed in tal caso interviene una valvola tarata che fa emettere questi gas nell'ambiente, prevenendo così ogni rischio di esplosione.

Questo meccanismo costituisce uno strumento molto efficace di equalizzazione di celle in serie. Infatti se alla fine della carica di una batteria composta da più celle in serie una delle celle è più carica delle altre, essa raggiungerà prima la soglia di elettrolisi, ed in essa, si attiverà quindi il ramo PN, che drena la corrente in eccesso, impedendo un eccesso di carica nel ramo principale del circuito equivalente. Così, progressivamente, tutte le celle raggiungeranno la condizione di massima carica. Una lunga carica alla tensione di tampone può essere quindi definita (e così viene normalmente fatto) carica “equalizzatrice”.

Si è rammentato questo meccanismo sia per ricordare che alla lunga celle in serie, di qualunque chimica, presto o tardi tendono a disomogeneizzarsi dal punto di vista della carica accumulata, sia per notare come le batterie al piombo siano naturalmente in grado di provvedere alla riequalizzazione, semplicemente mantenendole in carica ad un opportuno valore di tensione. E' questa, fra l'altro, la ragione che ha portato i costruttori di sistemi di alimentazione di autovetture ad alimentare il sistema elettrico a tensioni così più alte della tensione nominale della batterie al piombo, come quelle riportate in fig. 2.

Le batterie al litio, invece, non possiedono purtroppo reazioni parassite a fine carica così significative con costituire strumento praticamente utilizzabile per l'equalizzazione. Pertanto occorre provvedere diversamente.

Innanzitutto le batterie a litio vanno sempre monitorizzate con cura, con misura di tutte le tensioni di cella ed un numero congruo di temperature per consentire una mappa termica affidabile dell'intera batteria.

Se non si prevedono sistemi di equalizzazione esterni, la fine della carica dovrà essere comandata quando la più alta delle tensioni delle celle in serie raggiunge il valore massimo ammissibile, e la scarica va ultimata quando la tensione più bassa raggiunge il valore minimo.

Man mano che la vita della batteria procede, le celle perderanno omogeneità nell'accumulo interno di carica, e sempre meno a fine carica la cella più scarica verrà caricata e a fine scarica la cella più carica scaricata.

Nel tempo, quindi, si verifica un effetto di perdita della capacità utile semplicemente per il fatto che la disposizione in serie delle celle e la non omogeneità dello stato di carica comporta la necessità di non caricare a fondo né scaricare a fondo tutte le celle.

Il problema della disequalizzazione delle celle è stato affrontato da diversi costruttori di sistemi di accumulo al litio o di veicoli secondo differenti approcci:

- *Si rinuncia ad equalizzare.* Questo approccio, usato per lo più in passato per ragioni di semplicità realizzativa, non è molto efficiente, in quanto, come si è visto, comporta una progressiva perdita della capacità utile. Si conclude che per le batterie standard da proporre nel presente studio esso è da scartare.
- *Equalizzazione in fase di manutenzione.* Questo approccio può essere adoperato quando le batterie sono composte da celle fra di loro particolarmente omogenee. Se si può ritenere che fra una manutenzione programmata e la successiva (ad es. alla distanza temporale di un anno) la disomogeneizzazione che si verifica fra le celle sia sufficientemente contenuta, si può effettuare la riequalizzazione periodica soltanto presso il laboratorio di manutenzione,

utilizzando hardware e software non a bordo. In tal caso sarebbe sufficiente predisporre il sistema di accumulo di un connettore ad innesto rapido attraverso il quale il sistema di riequalizzazione può, con tecniche che possono essere le più disparate, procedere a riequalizzare le celle. L'approccio presenta l'indubbio vantaggio di semplificare l'hardware da portare a bordo, con vantaggi di costo, peso, complessità;. Peraltro può richiedere una preselezione delle celle, con aumenti di costo sull'acquisto delle celle stesse.

- *Equalizzazione quotidiana.* Questo approccio prevede di effettuare la riequalizzazione quando il sistema è inattivo, ad esempio durante le pause notturne. La caratteristica di avere batterie che non stanno erogando correnti di funzionamento, semplifica le procedure di equalizzazione, in quanto le tensioni di cella sono prossime alle tensioni di circuito aperto a riposo, e pertanto forniscono ottime indicazioni sugli stati di carica relativi delle celle, e quindi su dove e come sia opportuno equalizzare
- *Equalizzazione continua.* Questo approccio è il più sofisticato fra quelli proposti, ma è raramente adottato. Esso prevede infatti di possedere un sistema di stima continuo dello stato di carica delle singole celle, e di effettuare piccoli travasi di energia durante il normale funzionamento della batteria. Il problema principale connesso con l'uso di questo approccio consiste nella stima affidabile dello stato di carica delle batterie durante il normale funzionamento delle stesse. per fare questo sono stati proposti approcci basati su stimatori di stato classici della teoria dei sistemi, quali stimatori alla Luemberger o basati su filtri di Kalman.

Il BMS da installare a bordo del veicolo, a seconda dei casi sarà un “*Battery Monitoring System*” (se si rinuncia ad equalizzare con veicolo sconnesso da sistemi esterni, precedenti tecniche 1 e 2), ovvero, “*Battery Management System*”, se si effettua equalizzazione delle celle secondo una delle tecniche 3 o 4.

## **2.2. Condizionamento termico**

E' a tutti noto come le batterie al Litio necessitino di una accurata gestione della temperatura in quanto, oltre certi valori si possono innescare fenomeni a reazione positiva, del tipo *thermal runaway*, che possono portare alla distruzione della batteria, con pericolo anche delle persone che si trovano nelle vicinanze della batteria in caso di innesco del fenomeno.

Il rischio è amplificato a bordo dei veicoli, in quanto la perdita improvvisa del sistema di accumulo a bordo può essere causa di instabilità del veicolo con rischi aumentati di incidente stradale.

Occorrerà prevedere un attento monitoraggio termico della batteria, tipicamente con almeno 2-3 sensori di temperatura in modo da individuare una mappa termica sufficientemente aderente alla realtà della stessa.

Un caso di superamento dei limiti di ammissibilità della temperatura occorrerà provvedere ad immediata interruzione della corrente scambiata.

Ad esempio i costruttori delle batterie ad elettrolita polimerico NMC (Nickel Manganese Cobalto) prevedono un limite assoluto alla temperatura di batteria di 60°C: Il raggiungimento di questo limite a bordo di un veicolo in estati molto calde, è evento di probabilità non trascurabile. Se la batteria deve poter continuare a funzionare anche in ambienti molto caldi che porterebbero, in assenza di azioni correttive, la sua temperatura interna a superare i limiti, sarà necessario prevedere un sistema di condizionamento termico, ad esempio con raffreddamento a convezione forzata.

## **3. Peculiarità delle batterie SLI**

### **3.1. Introduzione**

Le batterie per l'alimentazione dei servizi ausiliari a bordo di veicoli a propulsione convenzionale, (ma anche, seppur con qualche differenza) a propulsione elettrica e ibrida, sono spesso designate con la sigla SLI: Starting-Lighting-Ignition.

In effetti due fra le funzioni più importanti alle quali devono assolvere sono l'alimentazione del motorino di avviamento, del sistema di illuminazione, del sistema di accensione del combustibile nel caso di motori ad accensione comandata. Esse devono inoltre fornire alimentazione ad una miriade di altri carichi ausiliari, da quelli per l'intrattenimento (autoradio, navigatore satellitare, luci di cortesia) a quelli di ausilio al comfort di vita a bordo (vetri e specchi elettrici, regolazioni elettriche dei sedili, ecc.) a sistemi per la sicurezza (sensori di parcheggio, sistemi antintrusione), ecc.

Più che la sigla SLI, quindi il termine più appropriato appare quello di batteria di alimentazione dei carichi ausiliari, ovvero tutti i carichi di bordo non direttamente connessi con la funzione di propulsione veicolare.

Per questo tipo di applicazioni lo standard de facto indiscusso è costituito da accumulatori al piombo acido, effettivamente molto convenienti dal punto di vista del costo e della maturità della tecnologia.

La recente disponibilità di accumulatori basati sul litio, con caratteristiche anche molto differenti da un modello all'altro, congiunta con la continua crescita del grado di elettrificazione a bordo e di conseguenza della quantità di energia da stoccare nell'accumulatore per l'alimentazione dei carichi ausiliari, rende sempre più interessante la possibilità di utilizzare, anche per questa applicazione accumulatori al litio.

Peraltro questo tipo di applicazione richiede un elevato grado di standardizzazione della produzione, per la riduzione dei costi e di compatibilità con i sistemi elettrici di bordo attualmente esistenti. Pertanto occorrerà valutare preventivamente se e quali delle tecnologie realizzative di batterie al litio sono in grado di inserirsi nei sistemi elettrici degli autoveicoli attuali con impatto pressoché nullo sul dimensionamento delle altre parti del veicolo stesso.

Le seguenti quattro sezioni si propongono di affrontare queste tematiche [1].

### **3.2. Il problema della tensione**

La tensione nominale delle batterie SLI attualmente utilizzate è pari a 12V, in quanto esse sono realizzate ponendo in serie 6 elementi del piombo-acido, avente ciascuno una tensione nominale di 2V.

Peraltro il sistema viene mantenuto ad una tensione ampiamente più elevata di questo valore, intorno ai 14 V, come ad esempio illustrato dalle caratteristiche di regolazione di a due alternatori in commercio riportate in fig. 2.

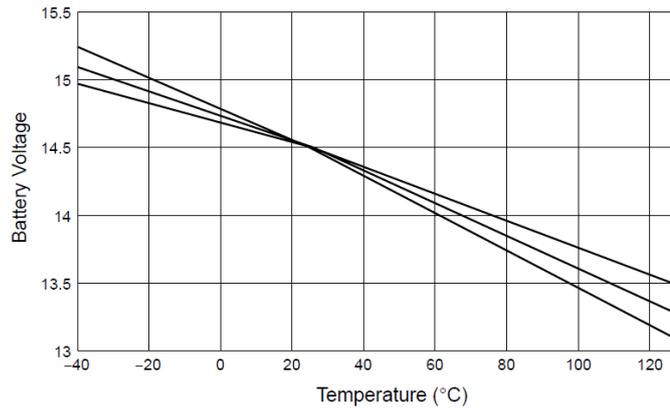
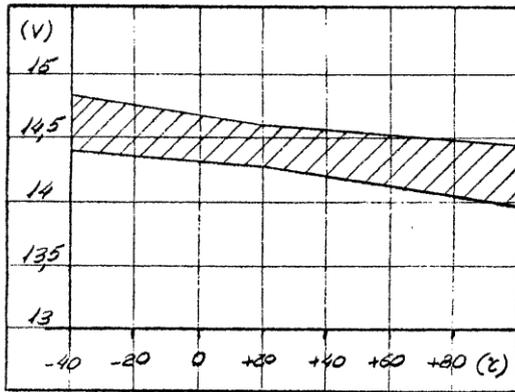


Fig. 2: Andamento della tensione del regolatore di tensione di due sistemi di generazione/regolazione presenti sul mercato

Tutti i carichi del veicolo sono quindi compatibili con questo tipo di finestre di tensione, che vanno quindi, tipicamente dai 13,5V ai 15 V. Soltanto durante l'avviamento è normalmente prevista, in condizioni estreme (secondo tentativo alla temperatura ambiente stabilizzata di  $-18^{\circ}\text{C}$ ) una tensione minima molto più bassa, fino a 6V<sup>(1)</sup>.

Una nuova batteria che si voglia sostituire alle batterie esistenti dovrà analogamente fornire tensione in questo intervallo.

Potrà anche essere accettabile una batteria che, operando nel normale funzionamento nella finestra di tensione sopra definita di 13,5-15V richieda all'alternatore una profilatura della tensione di tampone leggermente differente da quella del sistema esistente di cui va a sostituire la batteria; nell'ambito di questo intervallo, infatti sarà sufficiente richiedere al costruttore dell'alternatore, che integra sempre il regolatore di tensione, una diversa taratura del regolatore, per massimizzare la funzionalità e la vita della nuova batteria.

Il problema della tensione impatta particolarmente nella selezione delle tipologie di celle da considerare per l'adozione come elementi base di batterie SLI.

Se si considerano ad esempio batterie NCA Nickel-Cobalto-Alluminio, comunemente denominate, dalle iniziali degli elementi che compongono il catodo, la finestra di tensione di normale funzionamento della singola cella + 3,0-4,2V, che porta all'impossibilità pratica di restare all'interno della finestra di tensione sopra individuata: 3 elementi comportano tensioni troppo basse, mentre 4 elementi comportano valori troppo elevati.

### 3.3. Il problema dell'equalizzazione delle tensioni di cella

E' ben noto che le batterie al piombo possono operare correttamente in stringhe anche lunghe di celle in serie senza soverchi problemi di disequalizzazione della carica accumulata nelle varie celle, in quanto una naturale equalizzazione avviene in fondo ad ogni carica profonda. Soltanto per alcune applicazioni per le quali è richiesto lo sfruttamento della massima capacità erogabile da tutte le celle (ad es. nei sommergibili) viene periodicamente effettuata una carica particolarmente profonda, detta carica equalizzatrice.

E' altrettanto ampiamente noto, per contro che le batterie al litio non possiedono questa naturale capacità di riequalizzarsi, e devono pertanto essere equalizzate con dispositivi esterni, per garantire una capacità utile sfruttabile nel tempo relativamente costante. Pertanto i sistemi di monitoraggio

<sup>1</sup> Norma CEI EN 50342-1, art. 5.3.5.

che comunque devono sussistere per ragioni di sicurezza, vengono normalmente integrati da sistemi di equalizzazione che effettuano un bilanciamento della carica presente nelle varie celle in serie, scaricando quelle più cariche e/o caricando quelle meno cariche.

Va inoltre valutato attentamente se sia opportuno procedere ad un'equalizzazione di tipo dissipativo, più semplice, o attivo energeticamente più efficiente.

In prima istanza appare preferibile l'equalizzazione attiva, in quanto la specificità dell'applicazione che richiede un funzionamento a batteria pressoché carica per lunghissimi periodi, comporta flussi di equalizzazione molto superiori rispetto ad altre applicazioni, e pertanto i benefici energetici di un'equalizzazione attiva hanno un 'impatto particolarmente positivo.

Le batterie SLI presentano notevoli peculiarità dal punto di vista dell'equalizzazione, che vengono qui commentate.

1. *Equalizzazione a fine carica o a fine scarica?* Le tecniche di equalizzazione più diffuse tendono ad equalizzare la carica delle celle in serie o a fine carica ovvero a fine scarica: questo perché in queste condizioni estreme (batterie completamente piena o completamente vuota) è molto più semplice valutare le necessità in termini di carica delle varie celle. E' evidente che per loro natura le SLI dovranno pertanto essere equalizzate a fine carica, in quanto esse vengono normalmente mantenute in condizione di carica pressoché completa, mentre solo in casi eccezionali sono scaricate a fondo.
2. *Quale logica di equalizzazione?* Le logiche normalmente adottate per l'equalizzazione a fine carica prevedono di scaricare leggermente, ovvero caricare meno, le celle che appaiono più cariche, nell'ultima fase di un processo di carica. Queste logiche partono dal presupposto che la fase di carica abbia una durata limitata. Per le batterie operanti in tampone, pertanto, esse vanno riviste, in modo da evitare che vi sia un continuo processo di equalizzazione, specie se dissipativo, che stresserebbe le celle e provocherebbe inutili perdite energetiche. Occorrerà quindi prevedere delle soglie di squilibrio degli stati di carica al di sotto delle quali il processo di equalizzazione stesso non si inneschi.

E' inoltre da considerare che una riduzione della necessità di equalizzazione si può ottenere attraverso una severa preselezione delle celle da mettere in serie, selezionando quelle che hanno simili valori della corrente di autoscarica. Questa tecnica si ritiene non sia però applicabile al caso delle batterie SLI in quanto ne farebbe lievitare fortemente i costi.

### **3.4. Il problema della capacità nominale e la CCA**

La capacità nominale delle batterie SLI è scelta sia sulla base di alcuni criteri:

le batterie devono fornire una necessaria riserva di energia, per consentire il funzionamento dell'autovettura in caso di guasto del sistema di ricarica (ad ausiliari attivati al minimo indispensabile), per un tempo sufficiente. Tipicamente si considera la necessità che la batteria eroghi per 60 minuti una corrente di 25A, stimando in tal modo in 300 W la potenza media richiesta

dal veicolo in condizioni di emergenza. Il tempo di erogazione di 25A di batteria carica, alla temperatura di 25°C è definito “riserva di capacità” (reserve capacity) <sup>(2)</sup>.

le batterie devono alimentare i carichi di comfort del veicolo (ad es. l'autoradio) per un tempo ragionevole. Normalmente la capacità di riserva è considerata sufficiente anche a questo scopo di comfort

Una certa capacità nominale può non essere assolutamente sufficiente agli scopi di una batteria SLI di autovettura. Infatti è fondamentale che la batteria sia in grado di consentire l'avviamento del motore a combustione interna, e quindi del veicolo a, che nelle condizioni più estreme. Alle latitudini europee la minima temperatura considerata dalle normative è di -18°C. La corrente che la batteria è in grado di erogare per 10 s, con tensione che permane al di sopra di 7,50V, a -18°C è denominata prestazione all'avviamento o, in ambito internazionale CCA (Cold Cranking Amps)[5]. A livello di normativa, invece, si definisce la CCC (Cold Cranking Capacity) che misura gli Ah erogati nelle suddette condizioni di temperatura <sup>(3)</sup>.

Le batterie funzionanti in ambienti a basse temperature, subiscono una temporanea diminuzione della capacità disponibile. Un aumento della temperatura della batteria comporta un aumento della sua capacità. La fig. 3 si riferisce al regime di scarica di 10 ore per una batteria al piombo. L'effetto della temperatura sulla capacità è dovuto alle variazioni della viscosità e della resistenza dell'elettrolito. Alle basse temperature la viscosità aumenta e ciò riduce il regime di diffusione dell'acido nei pori della materia attiva.

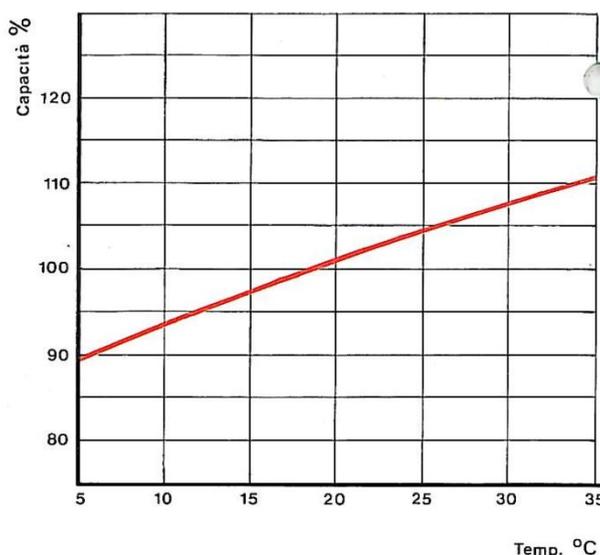


Fig. 3: *Variazione della capacità per effetto della temperatura per batteria al piombo*

In assenza di informazioni più specifiche, un'idea del comportamento della batteria alla temperatura che è necessario considerare in applicazioni automobilistiche (ovvero, alle normali latitudini, di -18°C) può essere ottenuta estrapolando la curva riportata in figura 3.

La sostituzione di una batteria di avviamento tradizionale con una batteria di altro tipo, quindi, deve mantenere sostanzialmente invariate tutti e tre i tipo di prestazioni. Questo risulterà possibile se si avranno valori equivalenti di :

- capacità nominale
- capacità di riserva

<sup>2</sup> Norma CEI EN 50342-1, art. 5.2.

<sup>3</sup> Norma CEI EN 50342-1, art. 5.3.6.

- prestazione all'avviamento.

La capacità nominale delle batterie al piombo, per antica tradizione, è misurata per scariche alle 20 ore. La capacità di riserva sarà ovviamente minore alla capacità nominale. Il degrado della capacità di erogare carica delle batterie al litio, di qualunque chimica, al variare della corrente di scarica è inferiore a quello del piombo. Pertanto è da attendersi che a parità di capacità nominale la capacità di riserva delle batterie al Litio risulterà sempre superiore al corrispondente valore delle batterie al piombo. In definitiva, per quando riguarda la capacità di erogazione di corrente da parte delle batterie, la compatibilità andrà verificata con riferimento ai seguenti due parametri:

- capacità nominale
- prestazione all'avviamento.

### 3.5. Il problema della "shelf life"

Le batterie automobilistiche di tipo SLI solo in casi eccezionali vengono scaricate a fondo. Normalmente, invece, esse sono soggette a piccole scariche poco profonde, e il loro invecchiamento è dovuto all'effetto combinato di questi microcicli e dell'invecchiamento naturale man mano che passa il tempo a prescindere dall'uso che se ne fa.

Per valutare l'utilizzabilità di una batteria al litio in applicazioni SLI andranno quindi valutati con attenzione le i seguenti parametri:

- invecchiamento per scariche poco profonde
- invecchiamento cronologico (shelf-life).

A titolo di esempio viene fornito nella fig. 4 l'andamento della *shelf life* di una batteria al piombo di un costruttore nazionale. E' evidente la riduzione di capacità dovuta al solo trascorrere del tempo, anche in assenza di utilizzo (scariche e ricariche) della batteria.

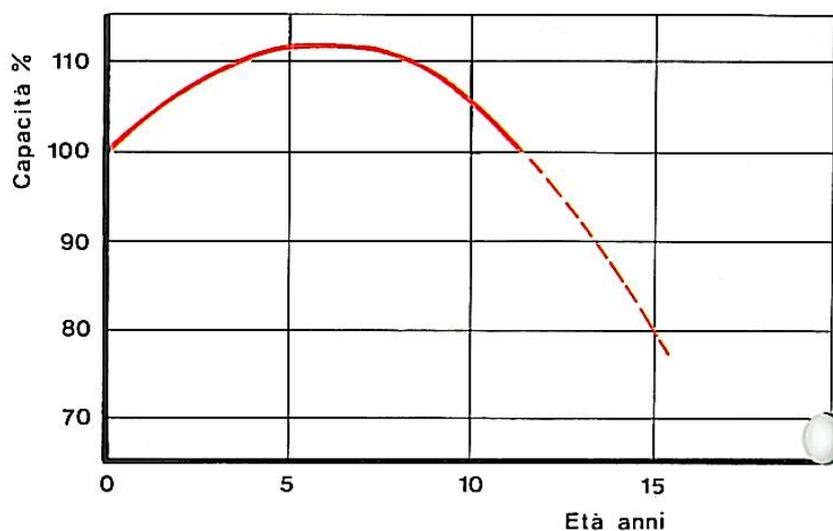


Fig. 4: Andamento della capacità nel tempo ('Shelf life') per batteria al piombo

### 3.6. Comparazione di batterie presenti sul mercato

Nei precedenti paragrafi si è proceduto all'individuazione dei parametri di maggiore significatività o per un confronto razionale delle tipologie esistenti di batterie al litio in rapporto all'utilizzazione SLI.

Nel presente paragrafo si forniscono, ove disponibili, dati numerici per tali parametri dei vari costruttori presenti sul mercato internazionale.

Per quanto riguarda le tensioni, si vede dai dati riportati in tab. I come la compatibilità con l'applicazione SLI si ha con certezza utilizzando **una serie di 4 celle aventi la chimica LFP**, mentre appare anche *possibile l'utilizzo di celle LiTi, impiegando 5 celle per la creazione di un modulo*, sebbene non sono disponibili dati di dettaglio sulla finestra di tensione che possano consentire una valutazione completa.

*Tabella I: Tensioni possibili con batterie al litio delle diverse chimiche. Le soluzioni praticabili contemplano 4 celle in serie LFP o 5 celle LiTi*

Chimica	Tensione Celle (V) (Max-Nom-Min)	Tensione Batteria (V) con 3 celle in serie (Max-Nom-Min)	Tensione Batteria (V) con 4 celle in serie (Max-Nom-Min)
LFP	3.65-3.2-2.5	10.95-9.6-7.5	14.6-12.8-10
NMC	4.2-3.7-2.7	12.6-11.1-8.1	16.8-14.8-10.8
NCA	4.2-3.6-3.0	12.6-10.8-9.0	16.8-14.4-12.0
LiTi	2.4		12 (2.4 x 5)

Entrambe le tipologie, tuttavia, richiedono un leggero adeguamento nella finestra del regolatore di tensione prima dell'adozione. Per i veicoli convenzionali, si propone di uniformare le batterie in tre categorie: 30 - 60- 90 Ah per soddisfare l'intera gamma di automobili. Se si effettua questo tipo di scelta le batterie disponibili sul mercato si riduce fortemente, in quanto a seguito dell'indagine bibliografica effettuate appaiono utilizzabili soltanto le celle delle marche Hipower e Gaia, evidenziate in verde nella tab. II.

*Tabella II: Compatibilità delle varie celle Li-ion con le tensioni e le capacità prescelte*

Costruttore	Tipo	Tensione Batteria (Max-Nom-Min) con 4 celle in serie (Volt)	Capacità (Ah)	CCA (-18°C)	Shelf Life	Shallow cycle life
<a href="#">A123</a>	LFP	14.6-3.2-10	4.4			
<a href="#">K2</a>	LFP	14.6-12.8-10	2.6			
<a href="#">Hipower</a>	LFP	15.4-12.8-10	30, 60, 100, 200			
<a href="#">EIG</a>	LFP	14.6-12.8-8	7, 14			
<a href="#">Lishen</a>	LFP	14.6-12.8-8	10.5			
<a href="#">GAIA</a>	LFP	15.2-12.8-10	38			
Toshiba	LiTi	NA-12-NA	4.2			

## 4. Peculiarità delle batterie per veicoli elettrici e ibridi

Le batterie per veicoli elettrici e ibridi avranno ovviamente contenuti energetici e potenze molto superiori a quelle previste per applicazioni di tipo SLI.

Le tematiche prevalenti sulla base delle quali effettuare una valutazione delle batterie disponibili sul mercato sono di seguito riportate.

### 4.1. Potenza specifica ed energia specifica dei sistemi di accumulo

Un accumulatore elettrochimico può essere scaricato con correnti più o meno elevate. Sia l'energia che la potenza che l'accumulatore è in grado di erogare variano al variare della corrente di scarica, ma con comportamento opposto: con elevate correnti di scarica è elevata la potenza erogata e bassa l'energia, e viceversa accade con basse correnti.

Il diagramma che mostra i possibili punti di lavoro su assi potenza/energia (o potenza energia specifica) in scala log-log è detto diagramma di Ragone per singolo dispositivo ed è del tipo di quello riportato in fig. 5.

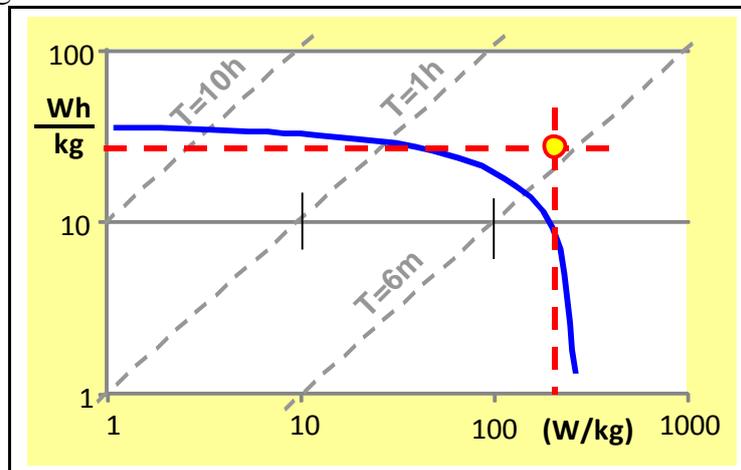


Fig. 5 Relazione fra potenza specifica ed energia specifica di un sistema di accumulo al litio (diagramma di Ragone per singoli dispositivi)

Il grafico può in qualche modo essere semplificato idealizzandone la forma a forma rettangolare, come indicato nella medesima figura mediante rette tratteggiate di colore rosso. Con diagramma rettangolare l'accumulatore può essere immaginato come caratterizzato da potenza ed energia (o potenza specifica ed energia specifica) indipendenti l'una dall'altra, sebbene la costruzione fatta ci ricorda che il valore di energia o energia specifica ottenuto va considerato valido solamente con scariche a basse correnti: quando si usa la massima energia la potenza di scarica deve essere bassa, e viceversa quando si usa la massima potenza l'energia di scarica è in effetti limitata.

Sebbene non esista un comportamento uniforme degli operatori (costruttori di accumulatori, costruttori di veicoli) del settore, un valore frequentemente adoperati per valutare l'energia e l'energia specifica di un sistema di accumulo è quello relativo a scariche in un'ora, mentre un valore del tempo di scarica spesso adoperato per la valutazione della potenza e della potenza specifica è il minuto.

Una maniera sintetica per caratterizzare le varie batterie dal punto di vista del comportamento in potenza ed in energia consiste nell'indicare il rapporto energia/potenza nel punto di incrocio del diagramma rettangolare convenzionale (potenza a un minuto, energia ad un'ora).

Le batterie più orientate alla potenza hanno valori di tale rapporto dell'ordine di pochi minuti (ad es. 5min), mentre batterie orientate all'energia possono arrivare a 0,5-0,7h.

## **4.2. Tensione del sistema di accumulo**

Il sistema di accumulo presente a bordo dei veicoli a propulsione elettrica e ibrida deve sempre interfacciarsi con un convertitore elettronico, qualunque sia lo schema adottato.

Pertanto dei vincoli significativi alla determinazione della tensione massima di batteria è dovuto alla standardizzazione de facto esistente sui componenti dei convertitori elettronici.

Le taglie in tensione dei componenti elettronici di interesse, in particolare degli IGBT sono 1200 V e 600 V.

Viene normalmente affermato dai costruttori di convertitori che a IGBT realizzati con componenti da 1200 V (600 V) non possono tollerare tensioni DC superiori a 800 V (400 V) rispettivamente.

In linea di massima quindi i livelli di tensione di 400 V e 800 V sono di particolare interesse. Infatti appare ragionevole ritenere che una volta che si debba adottare una data tipologia componenti elettronici per convertitori se ne sfrutti al massimo la capacità in tensione, per ridurre le correnti in gioco, con vantaggi sulla taglia dei componenti stessi e, normalmente, anche sulle perdite.

Si ritiene auspicabile, quindi che eventuali moduli standard, abbiano tensioni *massime* di funzionamento che siano sottomultipli interi di 400V e 800V rispettivamente.

## **4.3. Parametri di interesse per i veicoli elettrici a batteria**

Una volta noto il comportamento dei sistemi di accumulo, andiamo a valutare qualitativamente quali sono le necessità dei veicoli a propulsione puramente elettrica (a batteria) ed dei veicoli a propulsione ibrida.

I veicoli puramente elettrici a batteria devono prelevare l'intera energia di propulsione dal sistema di accumulo.

E' a tutti noto che anche le migliori batterie esistenti sul mercato hanno una energia per unità di massa enormemente inferiore a quella attualmente disponibile con i combustibili di origine fossile (benzina, gasolio). Pertanto l'autonomia dei veicoli a propulsione elettrica è comunque fortemente condizionata dalla ridotta capacità di accumulo di energia nelle batterie, per unità di volume e di massa. Ogni miglioramento di un esemplare o di una tipologia rispetto ad un'altra ha pertanto importanza notevole, in quanto impatta direttamente l'utilizzabilità del veicolo. Batterie a più alta energia specifica consentono di aumentare le autonomie a parità di massa od di ingombro del sistema di accumulo, o aumentare gli spazi a bordo e ridurre i pesi (con vantaggi anche sui consumi) a parità di autonomia.

Un parametro quindi di fondamentale importanza, per le applicazioni in veicoli a propulsione elettrica pure è costituito dall'energia accumulata per unità di massa e di volume del sistema di accumulo.

Al fine di favorire il confronto fra diverse tipologia di accumulo, poi, l'energia va confrontata su basi omogenee: Si è sopra ricordato che l'energia erogabile da un sistema di accumulo dipende dalla corrente di scarica. Essa dipende inoltre dalla temperatura ambiente.

Per quanto riguarda la durata della scarica, normalmente la disponibilità della capacità di scarica viene fornita da parte dei costruttori per scariche fra 1h e 10 h, il tempo di scarica suggerito per i

confronti è di 1h, tempo, fra quelli considerati, più prossimo al tipico utilizzo a bordo del veicolo a propulsione elettrica alimentato a batteria.

Le batterie per veicoli elettrici dovranno necessariamente essere orientate all'energia, con rapporto caratteristico energia/potenza quindi dell'ordine di 0,5h (par. 4.1).

L'energia richiesta dalla propulsione è di 100 Wh/(tkm). per autonomie oggi considerate appena accettabili di 100 km, quindi, vanno installate a bordo almeno 10-15 kWh, con il risultato di avere una potenza massima per le accelerazioni di 20-30 kW che sono normalmente sufficienti alle necessità propulsive.

Di conseguenza il dimensionamento dei sistemi di accumulo per veicoli elettrici normalmente fa uso di batterie orientate all'energia, prevede il dimensionamento del pacco batterie sulla base delle necessità energetiche, e solo una verifica a posteriori della potenza disponibile.

Il parametro di energia specifica è pertanto prevalente su quello di potenza specifica.

Per quanto riguarda la temperatura, si può pensare di effettuare i confronti fra i vari sistemi di accumulo basandoli sulla temperatura ambiente tipica (quindi nell'intervallo 20°C-25°C), considerando che normalmente durante il funzionamento le batterie vanno ad operare a temperature maggiori per via della generazione di calore interna, con aumento della capacità erogabile e che, per il funzionamento in condizioni termiche particolarmente rigide può essere previsto un sistema di preriscaldamento e una marcia depotenziata nei primi minuti di esercizio del veicolo.

#### **4.4. Parametri di interesse per i veicoli ibridi**

L'utilizzo del sistema di accumulo a bordo di un veicolo ibrido è di supporto all'erogazione di potenza da parte del convertitore primario (generatore di potenza a partire da combustibile fossile). In particolare, in tutti i tipi di ibrido, è prevista da parte del sistema di accumulo l'erogazione di potenza aggiuntiva durante le accelerazioni e l'assorbimento di consistenti potenze durante la frenatura, per recuperare notevoli quantità dell'energia cinetica del veicolo nel sistema di accumulo, e migliorare così l'efficienza energetica globale del veicolo.

La quantità di energia di interesse dell'accumulo dipende dalla *vocazione* del veicolo: per veicoli plug-in che devono normalmente essere dotati anche di una certa autonomia di funzionamento in modalità puramente elettrica l'energia richiesta sarà relativamente alta; molto minore sarà per i veicoli ibridi di altro tipo, in particolare per i cosiddetti ibridi moderati (*mild*) o minimi.

Si conclude che per quanto riguarda i veicoli ibridi non si può tracciare una considerazione di tipo generale sulla prevalenza del parametro di potenza o energia specifica; per altro, se ci si riferisce, anche per rimarcare la differenziazione con i veicoli puramente elettrici, a veicoli ibridi minimi o *mild*, risulta evidente che il parametro di potenza specifica è prevalente, e occorrerà utilizzare batterie orientate alla potenza, con rapporto energia/potenza dell'ordine di alcuni minuti.

Un tema aggiuntivo di grande rilevanza sui veicoli ibridi riguarda l'accettazione della carica durante la frenatura, e la asimmetria, ad essa collegata, del funzionamento in carica e scarica rapida.

Questo argomento è affrontato nel seguente paragrafo

#### **4.5. Ricarica ad alte correnti e brevi durate**

Molto spesso i costruttori di batterie al litio, anche per alte potenze, consentono un funzionamento per brevi durate ed alte correnti solo quando si tratta di correnti di scarica, mentre per la carica vengono forniti limiti molto più severi.

Ad esempio le batterie Ultra-High-Power della Kokam, possono sopportare, secondo il costruttore, scariche impulsive con fattori di corrente  $I/C_n$  fino a 20 A/Ah, mentre per la carica è prevista una corrente massima di 3 A/Ah.

Questa differenza costituisce una fortissima limitazione all'uso delle batterie a bordo di veicoli ibridi, in quanto la capacità di accettare elevate correnti di carica di breve durata è fondamentale durante la frenatura a recupero.

L'argomento è stato oggetto di valutazioni sperimentali da parte dell'Università di Pisa che hanno mostrato come in realtà il limite fornito dal costruttore può essere ampiamente superato.

In funzionamenti tipici a bordo di veicoli ibridi valori di fattori di corrente in carica di 6-9 A/Ah sono accettabili.

Si ritiene che questa discrepanza sia dovuta al fatto che tradizionalmente le limitazioni in carica vengono fornite dai costruttori soltanto per cariche complete, e correnti di carica elevate producono durante le cariche complete notevoli riscaldamenti dell'accumulatore, con timori di *thermal runaway*. Scariche brevi ed interalate da pause, tipiche dei veicoli ibridi, non sono invece causa di preoccupazione soprattutto se, come è comunque indispensabile, l'andamento delle temperature delle celle viene continuamente monitorato dal BMS del sistema di accumulo.

#### **4.6. Vita a microcicli (*shallow cycles*)**

Un tema di grande importanza per la selezione di accumulatori per veicoli elettrici e ibridi è la durata di vita.

In particolare occorre osservare che la caratteristica di utilizzazione a bordo di veicoli ibridi (non di tipo plug-in) prevede comunque un numero molto elevato di scariche molto poco profonde (*shallow cycles* o *microcycles*).

Si valuta ad esempio che in un ciclo NEDC, per percorrere 10 km si effettuano 15 microcicli.

Se si vuole prevedere una durata di vita della batteria pari a 100Mm, è evidente che la batteria non dovrà degradarsi eccessivamente per un numero di cicli molto elevato, pari a  $1,5 \times 10^6$ .

D'altronde questo non è irrealistico. E' infatti ben noto come la vita in cicli di un sistema di accumulo sia fortemente dipendente dalla profondità di scarica e aumenta fortemente al ridursi della capacità di scarica stessa.

Sussiste però il problema che i costruttori, nella migliore delle ipotesi, forniscono la vita in cicli per scariche che partono da batteria completamente carica fino ad un certo livello di profondità di scarica, ad esempio fino a 100%, 80%, e 60% di profondità di carica.

Chi volesse valutare comparativamente l'utilizzabilità delle varie tipologie di batterie al litio come standard per i veicoli ibridi, avrebbe bisogno di informazioni specifiche, ad esempio la vita in cicli per cicli poco profondi intorno ad un livello di carica intermedio, ad es. scariche di  $\pm 5\%$  intorno a un livello variabile fra 40% e 60%.

E' però purtroppo sostanzialmente impossibile reperire questo tipo di dati e occorre pertanto estrapolare, utilizzando forse anche un eccesso di fantasia, i dati disponibili per scariche poco profonde a partire da batteria carica, oppure ricorrere a lunghe e costose prove sperimentali specifiche.

#### **4.7. Vita DOD XX%**

A differenza dei veicoli a propulsione ibrida, in quelli puramente elettrici e batterie vengono normalmente scaricate con cicli profondi.

Sebbene l'opzione *ricarica rapida* dei veicoli elettrici sia un interessante complemento al loro normale utilizzo, tutti concordano infatti che l'utilizzo più naturale e frequente di questi veicoli ne prevede essenzialmente la ricarica notturna eventualmente integrata, in casi particolari come quelli di flotte di autobus, da una ricarica da metà giornata.

La ricarica notturna infatti combina molti vantaggi che la ricarica rapida non può fornire:

è lenta, quindi richiede un modesto impegno di potenza dalla rete, basse correnti di carica, con conseguente alte efficienze di carica

avviene ricarica durante fasi in cui la rete elettrica è notevolmente scarica con benefici di vario genere: sia tariffario sul costo dell'energia, sia sul funzionamento del sistema elettrico nel suo complesso in termini di efficienza della generazione e distribuzione.

Il fatto che la ricarica notturna è, e si prevede resterà per lungo tempo, il metodo principe di ricarica dei veicoli elettrici, implica che essi dovranno far fronte alle necessità di trasporto di un'intera giornata di lavoro con l'energia accumulata in batteria durante la notte. Pertanto, quotidianamente occorre ipotizzare una scarica relativamente profonda dell'accumulo a bordo.

La scarica non sarà però al 100% per due ordini di ragioni:

il veicolo deve ritornare al punto di ricarica con un adeguato margine di energia per evitare di rimanere privo di energia prima di essere arrivato a destinazione

le scariche molto profonde degli accumulatori ne intaccano la vita molto di più delle scariche relativamente poco profonde. Ad es. il costruttore Kokam indica una vita utile per le sue batterie di 1500 cicli, se scaricate al 100%, di 7000 se scaricate all'80%.

Pertanto per una corretta valutazione dei sistemi di accumulo per veicoli elettrici puri, anche al fine di individuare una soluzione da standardizzare, occorrerà tener conto della vita in cicli con scariche da 0 a XX%. Ad esempio si possono considerare scariche fino all'80%.

#### **4.8. Safety/Abuse**

Le batterie al Litio sono note per presentare una certa problematicità dal punto di vista della sicurezza, in quanto, in caso di utilizzo non corretto, possono riscontrarsi problemi di *thermal runaway*, che può a sua volta essere causa di scoppio dell'involucro con emissione di vapori ad alta temperatura in prossimità della batterie stessa.

In qualche maniera l'esperienza ha mostrato che al crescere dell'energia specifica accumulata negli accumulatori, si riduce la loro regione di asintotica stabilità, e quindi maggiori devono essere le accortezze da mettere in campo per un loro utilizzo sicuro.

In taluni casi si può preferire una batterie con un'energia specifica un po' minore, ad es. 100 Wh/kg in luogo di 150Wh/kg, ma che dia maggiori garanzie di stabilità anche a fronte di maltrattamenti.

Particolare attenzione va riposta negli aspetti termici, e quindi anche nell'ubicazione dell'accumulatore a bordo del veicolo, in quanto i fenomeni di thermal runaway sono tanto più facilmente innescabili quanto più la batteria parte da una temperatura a riposo elevata.

#### 4.9. Comparazione di batterie presenti sul mercato

Nei precedenti paragrafi si è proceduto all'individuazione dei parametri di maggiore significatività o per un confronto razionale delle tipologie esistenti di batterie al litio in rapporto all'utilizzazione su veicoli a propulsione elettrica e ibrida.

Nel presente paragrafo si forniscono, ove disponibili, dati numerici per tali parametri dei vari costruttori presenti sul mercato internazionale.

Questi risultati riassunti nella tab. III, per i veicoli a propulsione puramente elettrica, e nella tab. IV per i veicoli a propulsione ibrida.

Nella tabella IV due colonne sono riportate in grigio in quanto i relativi parametri sono di interesse solo per una categoria di veicoli ibridi, quelli di tipo plug-in.

In entrambe le tabelle i casi si sono volutamente riportate colonne di interesse per l'applicazione considerata anche qualora i corrispondenti dati non fossero reperibili, per evidenziare da una parte una certa immaturità dell'utilizzazione delle batterie al Litio nel campo automobilistico, dall'altra la necessità comunque di poter disporre di questi dati, o attraverso consultazione diretta con il costruttore o attraverso prove sperimentali.

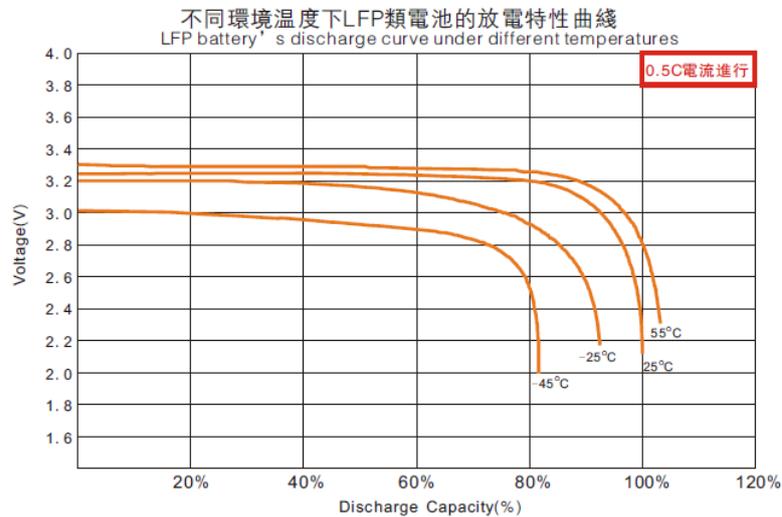
*Tabella III: Adattabilità di celle commerciali Li-ion per veicoli a propulsione puramente elettrica*

Costruttore	Tipo	C <sub>1</sub> (Ah)	Vita (cicli 80%)	Vita (cicli 60%)	Shelf Life (anni)	Specific Energy Wh/kg	riduzione capacità -18°C	Safety/abuse
A123	LFP	4.4						**
K2	LFP	2.6	>1000					**
Hipower	LFP	30	2000			83.5		**
	LFP	60	2000			94.1		**
	LFP	100	2000			100.9		**
	LFP	200	2000			100		**
EIG	LFP	14	3000			120		**
	LFP	7	3000			95		**
Lishen	LFP	10.5						**
GAIA	LFP	18	>1000	>2000		62		**
	LFP	38	>1000	>2000		84		**
Thundersky	LFP	60	>3000	>5000 (DOD 70%)			<10%	**
Toshiba	LiTi	4.2	>6000 (DOD85%)					***

NOTA la classificazione riguardo alla stabilità e alla tolleranza agli abusi è stata effettuata con riferimento alla sola tecnologia chimica, secondo il seguente criterio, basato sulle informazioni reperibili in letteratura:

- Batterie LiTi. Sono considerate le più sicure e hanno ricevuto \*\*\*
- Batterie LFP. Sono considerate sicure, ma meno delle LiTi e hanno ricevuto \*\*
- Altre tipologie. La loro sicurezza è più marcatamente dipendente da un corretto dimensionamento, gestione termica e gestione della carica. Non si tratta quindi di batterie intrinsecamente insicure, ma di batterie che necessitano di maggiore cura nella valutazione della potenziale pericolosità. La loro sicurezza è quindi comparativamente inferiore e hanno ricevuto pertanto un singolo asterisco.

In applicazioni veicolari è di fondamentale importanza l'utilizzabilità delle batterie anche a temperature estreme. In particolare è significativa la prestazione per temperature rigide fino a (alle latitudini temperate) 18°C. Normalmente i costruttori non forniscono molti dati a riguardo. Però la dipendenza della capacità erogabile dalla temperatura delle batterie al litio non è molto marcata, sicuramente meno marcata di quella delle batterie al piombo, come illustrato a titolo di esempio dai grafici riportati in fig. 3.



*Fig. 6: Degrado della capacità con la temperatura per una batteria di tipo LFP (da dati Thundersky)*

*Tabella VV: Adattabilità di celle Li-ion commerciali per veicoli ibridi elettrici  
(dati ricavati dai siti Internet dei costruttori [6-21])*

Costruttore	Type	C <sub>1</sub> (Ah)	Vita (cicli 80%) (*)	Corrente breve durata (I/Cn)	Specific Power W/kg	Shallow cycle life (??)	Capacità basse temp. (*)	Shelf Life (anni)	Safety/ abuse
A123	LFP	4.4							**
K2	LFP	2.6	>1000	19.23 (30s)					**
Hipower	LFP	30	2000	5 (60s)	417				**
	LFP	60	2000	5 (60s)	471				**
	LFP	100	2000	5 (60s)	404				**
	LFP	200	2000	5 (60s)	500				**
EIG	LFP	14	3000	1.43 (<10s)	2500				**
	LFP	7	3000	4.29 (<10s)	3200				**
Lishen	LFP	10.5							**
GAIA	LFP	18	>1000	15 (15s) 44 (2s)	2120				**
	LFP	38	>1000	6 (10s) 25 (2s)	1630				**
Thundersky	LFP	60	>3000	≤20					**
Kokam	NMC	40	>800	10					*
	NMC	70	>800	10					*
	NMC	240	>800	4					*
EIG	NMC	20	1000	10 (<10s)	2300				*
GAIA	NCA	7.5	>1000	16 (15s) 40 (2s)	2340				*
	NCA	27	>1000	6 (15s) 27.8 (2s)	1910				*
	NCA	45	>1000	6 (15s) 27.8 (2s)	2080				*
	NCA	55	>1000	2 (15s) 16 (2s)	1460				*
LG	NCA	2.4	500						*
Samsung	NCA	2.79							*
Panasonic	NCA	3.3							*
Sanyo	NCA	2.9							*
Lishen	NCA	2.4							*
Toshiba	LiTi	4.2	>6000 (DOD85%)	6.25 (≤0.3s)					***

(\*) Parametri di particolare interesse solo per gli ibridi di tipo plug-in.

## 5. Peculiarità delle batterie per la nautica da diporto

### 5.1. Classificazione delle unità da diporto

Per un esame accurato delle opportunità di utilizzo delle batterie al litio nell'ambito della nautica da diporto e dei vantaggi che queste potrebbero comportare soprattutto in termini di minor peso e ingombro, non si può prescindere da un'analisi dei vari sistemi di bordo che si diversificano principalmente in relazione alle caratteristiche dimensionali e di confort delle unità da diporto stesse.

Innanzitutto, occorre sottolineare che si parla di unità da diporto quando si indicano sistemi destinati alla navigazione sportiva e ricreativa. Questi vengono classificati in base alla tipologia di propulsione, a remi, a vela e, o a motore, e secondo le dimensioni in lunghezza. Secondo quest'ultimo criterio si individuano tre grandi categorie: i natanti, le imbarcazioni e le navi.

In dettaglio:

- per *natante da diporto* si intende un'unità che può essere a remi, a motore o a vela. Per essere considerato un natante, l'unità non deve superare i dieci metri di lunghezza. Come categoria da diporto, i natanti esistono solamente nella legislazione italiana e sono beni mobili non registrati in quanto non necessitano di alcuna iscrizione formale al registro navale italiano, il cosiddetto RID. I limiti di navigazione per i natanti sono correlati alle condizioni meteomarine e di fatto consentono un'utilizzo abbastanza restrittivo;
- le *imbarcazioni da diporto* sono unità che hanno una lunghezza che varia dai dieci ai ventiquattro metri. A differenza dei natanti, l'imbarcazione da diporto va iscritta presso il registro navale italiano. I limiti di navigazione delle imbarcazioni da diporto sono riportati sulla licenza di navigazione e dipendono dal tipo di progettazione dell'unità stessa.
- nella categoria *nave da diporto* rientrano tutte le unità da diporto che abbiano una lunghezza superiore ai 24 metri. Così come per le imbarcazioni, anche le navi da diporto sono beni mobili registrati presso il registro navale italiano. Non vi sono particolari limiti alla navigazione.

Dalla classificazione riportata e dalle limitazioni di utilizzo si evince facilmente che i sistemi elettrici di bordo differiscono molto da categoria a categoria, si va dal semplice apparato di starting dei natanti più piccoli a impianti molto complessi delle imbarcazioni di grandi dimensioni e delle navi da diporto con potenze installate crescenti in base alle dimensioni e agli standard di sicurezza e di confort. Ovviamente al crescere delle dimensioni e al diminuire delle limitazioni di navigazione le norme del settore impongono vincoli più stringenti sui sistemi elettrici di bordo soprattutto in termini di continuità del servizio e di obblighi relativi agli impianti di emergenza. Da quanto detto si deduce facilmente che all'interno della nautica da diporto vi è un largo uso di batterie di accumulatori sia per funzioni di avviamento, dei motori di propulsione e dei gruppi elettrogeni del sistema elettrico di bordo, sia per utilizzi stazionari atti a garantire la continuità di una serie di servizi essenziali e ad alimentare gli impianti di emergenza.

In tale contesto risulta interessante studiare l'impatto della sostituzione delle batterie di accumulatori comunemente utilizzati con tecnologia a ioni di litio che garantirebbero un risparmio di peso e volume, nonché una maggior vita in cicli.

## **5.2. Caratteristiche delle batterie per la nautica da diporto**

Nella nautica da diporto a motore le esigenze di accumulo di energia sono legate da una parte all'avviamento dei motori di propulsione e dei gruppi elettrogeni del sistema elettrico di bordo, dall'altra nelle barche di maggiori dimensioni alle applicazioni cicliche relative all'alimentazione dei servizi e degli impianti di emergenza.

Nei natanti da diporto, unità fino a dieci metri nelle quali si annoverano anche i tender, ovvero i gommoni o le scialuppe con funzione di appoggio a navi più grandi, solitamente si trovano solo batterie per l'avviamento dei motori termici di propulsione ad eccezione delle barche più grandi, quelle cabinate prossime alla lunghezza di dieci metri utilizzate per la navigazione turistica e sportiva entro le 12 miglia, nelle quali si trovano anche accumulatori di modeste capacità dedicati ai servizi. In ogni caso, nei natanti da diporto si ricorre alla medesima tecnologia utilizzata nelle autovetture e nei mezzi industriali (camion, trattori, ecc.), nei quali lo standard indiscusso sono gli accumulatori a piombo acido.

Nelle categorie imbarcazioni da diporto (10m – 24m) e navi da diporto (maggiori di 24m), le batterie vengono utilizzate per l'avviamento dei motori di propulsione e dei gruppi elettrogeni, per garantire continuità di alimentazione a buona parte dei servizi di bordo, per alimentare la radio di emergenza, per alimentare l'illuminazione di emergenza. In questi casi, vista la mancanza di limitazioni di navigazione e le conseguenti condizioni di lavoro certamente non sempre orizzontali, si utilizzano tecnologie ermetiche e senza manutenzione, quali GEL e AGM.

Le tensioni nominali utilizzate per gli apparati sopra riportati sono 12V e 24V, quest'ultimo soprattutto nelle categorie imbarcazioni e navi da diporto; i 12V corrispondono direttamente alla tensione nominale delle batterie utilizzate, mentre i 24V vengono realizzati mettendo in serie batterie da 12V nel caso dei sistemi di avviamento, mentre nelle applicazioni per i servizi e l'illuminazione di emergenza, viste le grandi capacità richieste, si trovano a seconda delle scelte progettuali in alcuni casi la serie di batterie da 12V e in altri la serie di moduli da 2V.

Si tratta sempre di moduli con tensione nominale di 12 V o il suo multiplo intero 24 V, per cui dal punto di vista della compatibilità in termini di tensione con le applicazioni esistenti si possono ripetere le considerazioni già svolti per l'applicazione SLI, riportata nel par. 3.2.

Dal punto di vista dei requisiti in termini di potenza ed energia delle varie applicazioni si può osservare che nelle applicazioni navali che sono prevalentemente orientate all'avviamento di motori, sarà prevalente il requisito sulla potenza, mentre per quelle orientate all'alimentazione dei servizi e dell'illuminazione di emergenza sarà prevalente il requisito in termini di energia.

In casi combinati occorrerà gestire con un'unica batteria entrambi i requisiti. Quando le quantità di energia richieste dall'alimentazione dei servizi una batteria orientata all'energia può essere adeguata anche all'avviamento dei motori, in quanto la corrente richiesta, per quanto elevata, risulta un multiplo intero non elevato della corrente nominale della batteria scelta sui requisiti di energia.

Nella precedente sezione riguardante le batterie SLI è stato già rilevato come le necessità di compatibilità di tensione impongano l'uso di batterie al litio della chimica ferro-fosforo. Questo tipo di batterie sono caratterizzate da un'erogazione potenza/energia che possiamo definire bilanciata, in quanto la corrente erogabile per 60 s si aggira, per i vari costruttori intorno a 5 volte la corrente erogabile in 1 h. Contemporaneamente, le energie specifiche sono di 90/100Wh/kg, con potenze specifiche intorno ai 500 W/kg.

In tutti i casi occorrerà tenere attentamente di conto dei problemi di *thermal runaway*, in quanto la tecnologia a ioni di litio prevedono un limite massimo di temperatura intorno ai 60°C; tale valore in estate e non solo è molto facile da raggiungere in mare aperto. Probabilmente sarà necessario prevedere un sistema di condizionamento termico.

Nei paragrafi successivi verranno osservati gli effetti in termini di ingombro e di peso conseguenti alla sostituzione delle batterie al piombo con quelle al litio nei natanti da diporto (unità fino a 10m) e in un'imbarcazione tipo di circa 36m fuori tutto.

Per calcolare il risparmio di potenza a parità di prestazioni è stata utilizzata la legge dell'Ammiragliato:

$$P = cD^{2/3}V^3$$

Dove  $P$  è la Potenza,  $D$  il Dislocamento,  $V$  la velocità,  $c$  una costante.

Questa formula, risulta particolarmente comoda per valutare i risparmi in termini di potenza propulsiva relativi a riduzioni di peso conseguenti alla sostituzione di batterie al piombo con batterie al litio. Dalla formula dell'ammiragliato discende immediatamente infatti che:

$$\frac{dP}{P} = \frac{2dD}{3D} \quad (°)$$

Di conseguenza, ad esempio ad una riduzione dello 1% di massa (cioè di dislocamento) corrisponde una riduzione dello 0,67% della potenza propulsiva richiesta.

Una volta nota questa riduzione si può calcolare agevolmente il risparmio di combustibile, e confrontarlo, considerando tutta la vita del sistema di accumulo, con il maggior costo della batteria al litio rispetto a quella al piombo.

Al vantaggio della riduzione della massa, e della conseguente riduzione dell'impegno di potenza per la propulsione, andrà sommata la riduzione degli spazi impegnati a bordo, con ulteriori vantaggi quantificabili economicamente caso per caso.

Occorre precisare che ogni unità da diporto ha una propria caratteristica del sistema di bordo e che anche a parità di dimensioni ci possono essere carichi elettrici e scelte progettuali profondamente diversi.

### **5.3. Effetti dell'uso di batterie al litio nei natanti da diporto a motore**

Come affermato in precedenza nella categoria natanti da diporto rientrano anche i tender, ovvero gommoni e scialuppe a servizio di navi più grandi.

Sui tender a bordo è presente un'unica batteria atta all'avviamento.

Prendendo a riferimento un gommone medio di lunghezza 4,5m, con motore da 100HP, dislocamento di 550kg e velocità max di 40kn, troveremo che solitamente per l'avviamento viene utilizzata una batteria da 12V, con almeno 450A di corrente di spunto.

Utilizzando una batteria composta da 4 celle litio ferro fosforo da 100Ah per avere le correnti avviamento richieste, si può ottenere rispetto ad una batteria a GEL tradizionale (di almeno 85Ah per questa situazione [2]) una diminuzione dell'ingombro di circa il 23,5% e una diminuzione di massa del 3,5% a cui corrisponde una riduzione della potenza alla velocità massima di circa il 2,3%.

Occorre, però, tenere presente che vi sono case costruttrici di batterie al piombo [3] che, ottimizzando una propria linea preposta all'avviamento, sono riuscite ad ottenere ottime performance allo spunto tenendo contenuta la capacità nominale e, quindi, ingombri e pesi; in relazione a queste ultime, per ottenere le medesime prestazioni in termini di correnti di avviamento

sarebbe sufficiente una batteria al Pb da 48 Ah, da confrontarsi con la LFP da 100 Ah nominali. da questo punto di vista le batterie LFP non sono competitive e non conviene utilizzarle in sostituzione delle batterie al piombo.

Questo tipo di batterie verranno indicate nel seguente quadro sinottico con la sigla HP (High Power)

Passando ad analizzare il caso di un natante da diporto a motore e cabinato, utilizzabile per attività turistica e sportiva, viene presa in esame una unità da 7,5m, con due motori per la propulsione da 160HP, un dislocamento di 4500kg, una velocità massima di 23 kn. Sul natante preso in esame vengono utilizzate due batterie al piombo ad acido libero [4] da 12V e 135Ah per l'avviamento e due batterie AGM [4] da 12V e da 150Ah per i servizi.

Utilizzando batterie al litio ferro fosforo con idonee specifiche, probabilmente 4 accumulatori di circa 12V (12,8V) e da 160Ah, si può ottenere una diminuzione dell'ingombro delle batterie di circa il 35% e una diminuzione della potenza alla velocità massima di circa l' 1,25%.

Per quanto concerne la categoria dei natanti è opportuno sottolineare che per unità molto piccole sono già in commercio sistemi con propulsione a motore fuoribordo totalmente elettrico con potenze dai 360W a 1kW e batterie al Litio Manganese da 30Ah incorporate.

I dati numerici sono riportati in maniera sinottica nella seguente tab. V, ricordando che le valutazioni relative a tutte le soluzioni, sia con batterie al piombo che al litio, sono effettuate dimensionando i sistemi di accumulo sulla base delle informazioni disponibili sui carichi da alimentare e dei dati funzionali di accumulatori esistenti sul mercato, e non fanno quindi pertanto riferimento a specifiche batterie attualmente installate.

Tab. V: Effetti della sostituzione Piombo-Litio in due natanti di esempio

Natante	Piombo					LFP		$\Delta V / L$		$\Delta m\%$ (*)		$\Delta P\%$	
	AGM			HP		M	V	LFP-AGM	LFP-HP	AGM	AGM-HP	AGM	AGM-HP
	D	M	V	M	V								
tender	550	32,6	12	16,6	8	13,6	9,2	2,8	-1,2	3,4	0,54	2,3	0,4
cabinato	4500	168	87,7	-	-	83,7	56,8	30,9	-	1,87	-	1,25	-

(\*) riduzione percentuale massa dell'intera imbarcazione

#### 5.4. Effetti dell'uso di batterie al litio nelle imbarcazioni e navi da diporto a motore

Nelle categorie imbarcazioni e navi da diporto a motore i sistemi di bordo diventano molto complessi sia a causa delle dimensioni, sia per adempiere alle norme vigenti.

Per fare un esame preliminare degli effetti dell'uso di batterie al litio su questo tipo di unità da diporto è stata analizzata un'imbarcazione di 35,5m di lunghezza fuori tutto, con due motori per la propulsione da 2600HP, un dislocamento da 145 Mg, una velocità massima di 24 nodi.

Nell'imbarcazione in oggetto l'utilizzo delle batterie [2] può essere sintetizzato nel modo seguente:

- circuito avviamento motori principali: per ogni propulsore una serie (per avere 24V) di due batterie AGM di 12V da 225Ah e con una corrente di spunto da 1300A;
- circuito avviamento Gruppi Elettrogeno: per ogni gruppo una serie (per avere 24V) di due batterie AGM di 12V da 130Ah e con una corrente di spunto da 935A;
- circuito radio: una batteria al GEL di 12V e da 120Ah;
- circuito servizi: serie (per avere 24V) di dodici elementi a GEL di 2V e da 750Ah;

- circuito illuminazione di emergenza: serie (per avere 24V) di dodici elementi a GEL di 2V e da 500Ah.

Ipotizzando la sostituzione di tutti gli accumulatori con batterie al litio potremmo avere:

- circuito avviamento motori principali: per ogni propulsore una serie (per avere almeno 24V) di otto elementi al litio di 3,2V (tensione totale 25,6V), da 200Ah e con una corrente di spunto da 1000A;
- circuito avviamento Gruppi Elettrogeno: per ogni gruppo una serie (per avere almeno 24V) di otto elementi al litio di 3,2V (tensione totale 25,6V), da 180Ah e con una corrente di spunto da 900A;
- circuito radio: una serie (per avere almeno 12V) di 4 elementi al litio di 3,2V (tensione totale 12,8V), da 100Ah;
- circuito servizi: il parallelo di otto serie (per avere almeno 24V) di otto elementi al litio di 3,2V (tensione totale 25,6V), da 100Ah;
- circuito illuminazione di emergenza: il parallelo di cinque serie (per avere almeno 24V) di otto elementi al litio di 3,2V (tensione totale 25,6V), da 100Ah.

In termini di ingombro utilizzando solo batterie al litio ferro fosforo si otterrebbe una diminuzione dell'ingombro degli accumulatori di oltre il 36% e una riduzione di massa (quindi di dislocamento) di quasi 1000 kg che consentirebbe alla velocità massima una diminuzione della potenza di propulsione di oltre lo 0,4%.

I dati numerici sono riportati in maniera sinottica nella seguente tab. VI, ricordando che le valutazioni relative a tutte le soluzioni, sia con batterie al piombo che al litio, sono effettuate dimensionando i sistemi di accumulo sulla base delle informazioni disponibili sui carichi da alimentare e dei dati funzionali di accumulatori esistenti sul mercato, e non fanno quindi pertanto riferimento a specifiche batterie attualmente installate.

*Tab. VI: Effetti della sostituzione Piombo-Litio in una imbarcazione di esempio (35,5m fuori tutto)*

<i>D</i>	<i>Piombo</i>		<i>LFP</i>		$\Delta V / L$	$\Delta m\% (*)$	$\Delta P\%$
	<i>M</i> kg	<i>V</i> L	<i>M</i> kg	<i>V</i> L			
145	1489	598	562	380	218	0,64	0,43

*(\*) riduzione percentuale massa dell'intera imbarcazione*

## 6. Progettazione del modulo integrato

La progettazione del modulo integrato di celle al litio deve tener conto delle varie specificità delle applicazioni considerate.

Riassumendo quanto delineato nelle precedenti sezioni si può riassumere le problematiche nelle seguenti:

- sostegno meccanico delle celle (importante per i veicoli)
- condizionamento termico
- monitoraggio e protezione (BMS)
- bilanciamento della carica delle celle in serie (BMS<sub>2</sub>)
- standardizzazione (tensione, capacità, ...)

Nelle seguenti sezioni vengono svolte considerazioni specifiche su queste problematiche.

### 6.1. Sostegno meccanico delle celle

La realizzazione di moduli comporta la creazione di un assieme meccanicamente omogeneo che incorpori le celle e il BMS.

Questo fatto, imprescindibile da tutte le applicazioni del sistema di accumulo elettrochimico, presenta delle specificità nelle applicazioni veicolari legate alle sollecitazioni meccaniche che ad esse corrispondono.

Le vibrazioni e le accelerazioni a cui le batterie devono essere sottoposte, sono particolarmente elevate.

Questo richiede l'esecuzione di un'ingegneria meccanica del modulo particolarmente accurata.

Per quanto le celle siano montate all'interno dei moduli su supporti smorzanti, una parte delle vibrazioni e delle accelerazioni del modulo vengono trasferite alle celle. Questa aliquota andrà valutata nella progettazione eseguita e trasferita in termini di specifiche tecniche delle celle.

### 6.2. Condizionamento termico

Rispetto alle batterie al piombo quelle al litio presentano aspetti di sicurezza particolarmente marcati legati alla temperatura di esercizio. Per molte chimiche i costruttori concordano nel prescrivere un divieto assoluto di funzionamento delle celle quando le loro temperature superano i 60 °C.

Questa delicatezza, come si è visto, può comportare dei vincoli relativi alla selezione delle posizioni di installazione della batteria all'interno del veicolo. In alternativa, può essere previsto un sistema di raffreddamento attivo (ad aria o acqua forzata), che intervenga nei casi in cui è richiesto che la batteria operi anche in condizioni critiche, ad esempio con temperature ambiente intorno ai 40°C, e con correnti elevate che comportino una generazione termica interna di particolare significatività.

Per contro, in tutte le applicazioni nelle quali le batterie siano chiamate a avviare motori a combustione interna (ad esempio veicoli stradali, piccole imbarcazioni), è di fondamentale importanza anche la capacità di erogare alte correnti a temperature molto rigide, fissate in ambito automobilistico per le aree temperate del pianeta in 18°C.

Molte chimiche di batterie al litio presentano una drastica capacità di erogare alte correnti a temperature così rigide. Pertanto il dimensionamento della batteria non potrà prescindere dalla accurata valutazione di questo vincolo progettuale. Un approccio può essere quello di scegliere la capacità delle batterie sufficientemente ampia da consentire l'avviamento a bassissima temperatura del motore. Questa caratteristica è denominata tradizionalmente CCA (cold-cranking amperes) della batteria. Dimensionare la capacità della batteria sulla CCA nel caso di applicazioni veicolari può, con la batteria al litio creare un sovradimensionamento della stessa, con incrementi di costi. In alternativa, si può effettuare una progettazione che consideri l'eventualità di avviamento a  $-1^{\circ}\text{C}$  evento sufficientemente raro da poter essere affrontato con un incremento di tempo di avviamento. In questo caso si potrebbe ad esempio:

- dimensionare la batteria in maniera di avviare il motore a combustione interna fino ad una temperatura superiore alla minima possibile, ad es.  $-10^{\circ}\text{C}$
- prevedere una procedura di preriscaldamento della batteria stessa la quale, in caso di temperature estremamente basse (ad es.  $-18^{\circ}\text{C}$ ) prelevando energia dalla batteria stessa ne riscaldi le parti attive, prima di consentire l'avviamento del motore a combustione interna. In tal caso, per l'appunto da considerarsi molto raro, potrebbe essere richiesto all'utente di attendere, prima dell'avviamento effettivo un tempo di preriscaldamento dell'ordine di 10-15 minuti

### **6.3. Monitoraggio e protezione (BMS)**

In tutte le applicazioni delle batterie al litio è fondamentale prevedere la presenza di un sistema di monitoraggio almeno della tensione di tutte le celle .

E' inoltre altrettanto importante poter stimare la temperatura a cui tutte le celle operano, misurando un congruo numero di temperature. Non è indispensabile misurare tutte le temperature di celle, in quanto le caratteristiche dell'assemblaggio meccanico può consentire, partendo dalla misura di un numero parziale di misure, stimare la temperatura di tutte le celle in serie. Ad es. un modulo contenente 4 celle in serie potrebbe essere correttamente identificato da punto di vista termico mediante la misura di 1-2 temperature.

In caso di superamento del valore massimo ammissibile della tensione di una singola cella, il che avviene durante le fasi di carica, la corrente di carica andrà tempestivamente limitata o annullata.

In caso di abbassamento valore della tensione di una singola cella al di sotto di un valore minimo ammissibile il che avviene durante le fasi di scarica, la corrente di scarica andrà tempestivamente limitata o annullata.

### **6.4. Bilanciamento della carica delle celle in serie (BMMS)**

Se non si vuole avere una progressiva riduzione della capacità utile dovuta alla inevitabile disegualizzazione delle celle in serie, sarà inoltre opportuno integrare il BMS di funzioni di equalizzazione, le quali provvederanno ad uniformare la carica delle varie celle in serie.

L'equalizzazione può essere effettuata a fine carica, riducendo alla fine del processo di carica la corrente entrante nelle celle più cariche della stringa di celle in serie, o alla fine del processo di scarica, scaricando un po' di più le celle che mostrano di avere più carica delle altre celle con esse in serie.

Inoltre può essere di tipo dissipativo, in modo da fare uso di resistenze per l'equalizzazione, o di tipo attivo, metodo secondo il quale si trasferisce energia dalle celle più cariche a quelle più

scariche. Il sistema passivo è più economico, mentre quello attivo presenta una migliore efficienza energetica.

Un BMS che faccia sia funzioni di monitoraggio che di equalizzazione è talvolta denominato BMMS o BM<sub>2</sub>S.

### **6.5. Standardizzazione (tensione, capacità, ...)**

L'adozione di moduli integrati ha la sua fondamentale ragione d'essere nella possibilità di standardizzazione.

Per quanto riguarda la tensione la tensione a cui standardizzare i moduli appare senza dubbio essere quella che li renda compatibili con le applicazioni che ad oggi richiedono batterie costituite da 6 celle al piombo in serie, ovvero le note batterie da 12 V.

E' stato però mostrato nel documento che la valutazione della sola tensione nominale non è sufficiente, in quanto occorre valutare che nelle varie situazioni la tensione può essere anche molto differente dal valore nominale, e che i sistemi elettrici nei quali si pensa di sostituire una batteria al piombo esistente con una batteria al litio sono compatibili con le tensioni delle attuali batterie al piombo da 12 V.

Un'analisi di questo tipo ha portato alla considerazione che alcuni tipi di celle sono più indicati di altre alla realizzazione di moduli integrati. Ad es. le celle NMC con tensioni nella finestra 3.6-4.2V mal si prestano alla realizzazione di questi moduli in quanto 3 celle in serie sarebbero poche, 4 troppe. Una tipologia particolarmente adatta allo scopo è quelle delle batterie LFP, che hanno una finestra delle tensioni di cella adatta alla sostituzione di moduli al piombo mediante la realizzazione di assemblati contenenti 4 celle in serie.

Per quanto riguarda la capacità nominale, tutte le analisi svolte hanno portato ad ipotizzare capacità multipli interi di 30 Ah. Ad esempio per applicazioni SLI, una batteria da 30 Ah potrebbe essere adatta per vetturette, da 60 per vetture medie, da 90 Ah per i segmenti di mercato più alti.

## 7. Conclusioni

Sono state svolte analisi della possibilità di utilizzare moduli integrati per svariati tipi di applicazioni ed in particolare:

- batterie SLI di autoveicoli
- batterie SLI di piccole imbarcazioni da diporto e tender
- batterie *general purpose* per imbarcazioni da diporto medie e grandi
- batterie di propulsione di veicoli elettrici e ibridi.

E' stato concluso che le batterie LFP presentano molteplici caratteristiche di interesse per le applicazioni su autoveicoli e imbarcazioni, e che la standardizzazione potrebbe prevedere moduli sostitutivi delle attuali batterie da 12 V (che funzionano nei sistemi a 14 V) con moduli LFP con 4 celle in serie

E' stato osservato che questo tipo di standardizzazione può portare importanti benefici ai veicoli a propulsione elettrica e plug-in di piccola taglia, mentre per i veicoli ibridi e per i veicoli a propulsione elettrica di taglia maggiore è ragionevole presumere, almeno nel breve periodo che il costruttore vorrà avere pieno controllo del dimensionamento della batteria, e che quindi non aderirà a soluzioni standard che inevitabilmente limitano i gradi di libertà del progettista del veicolo.

Per quanto riguarda la capacità è stato valutato che la maggior parte delle applicazioni trarrebbe notevoli benefici da una standardizzazione in termini di multipli interi di 30 Ah.

La realizzazione dei moduli integrati dovrà tenere in adeguato conto le specificità delle applicazioni veicolari, le quali sono state dettagliate e le linee progettuali da perseguire sono state tracciate.

## 8. Bibliografia

### 8.1. *Articoli scientifici*

- [1] M. Ceraolo, T. Huria, G. Pede, F. Vellucci: “Lithium-ion Starting-Lighting-Ignition Batteries: Examining the feasibility”, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Sept 6-9 2011
- [2] M. Ceraolo, G. Lutzemberger, M. Marracci: “High power lithium batteries usage in hybrid vehicles”, Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010, IEEE Lille (France) 1-3 Sept. 2010, ISBN 978-1-4244-8220-7
- [3] S. W. Moore, P. J. Schnieder: “A review of Cell Equalisation Methods for Lithium Ion and Lithium Polymer Battery Systems”, SAE World Congress 2001, Paper 2001-01-0959
- [4] T. Reddy, “Linden’s Handbook of Batteries”, 4<sup>th</sup> Edition, 2010, McGraw Hill, ISBN 978-0071624213
- [5] Bosch Handbook for Automotive Electrics - Automotive Electronics, 5th Edition, Bentley Publishers, MA, 2008

### 8.2. *Siti internet*

- [6] A123 Systems battery data, <http://www.a123systems.com/products-cell-32113-cylindrical-cell.htm>
- [7] K2 Energy, <http://www.peakbattery.com/products-26650EV.html>
- [8] Hipower, [http://www.hipowergroup.com/products/LiFePO4\\_batteries/](http://www.hipowergroup.com/products/LiFePO4_batteries/)
- [9] Energy Innovation Group, <http://www.eigbattery.com/eng/product/cell.htm>
- [10] Tiajin Lishen Battery, <http://en.lishen.com.cn/newEbiz1/EbizPortalFG/portal/html/index.html>
- [11] GAIA, <http://www.gaia-akku.com/en/gaia-cells.html>
- [12] Valence Advanced Energy Systems, <http://www.valence.com/energy-storage/lithium-phosphate-battery-data-sheets>
- [13] Thundersky Winston Battery, [http://www.thunder-sky.com/products\\_en.asp](http://www.thunder-sky.com/products_en.asp)
- [14] Toshiba super-charge ion battery, <http://www.toshiba.com/scib>
- [15] Altair Nano battery, <http://www.altairnano.com>
- [16] Enerdel lithium cell, <http://www.ener1.com/?q=content/enerdel-products>
- [17] Kokam superior lithium polymer battery, [http://www.kokam.com/english/product/battery\\_main.html](http://www.kokam.com/english/product/battery_main.html)
- [18] LG Chemicals, <http://www.lgchem.com> (seguire: “Products”, e poi “Batteries”)
- [19] Samsung SDI , <http://www.samsungsdi.com/battery/polymer-rechargeable-battery.jsp>
- [20] Panasonic Industrial Co., <http://www.panasonic.com/industrial/batteries-oem/oem/lithium-ion.aspx>
- [21] Sanyo battery, [http://battery.sanyo.com/en/product/lithiumion\\_2.html](http://battery.sanyo.com/en/product/lithiumion_2.html)